

بررسی بعد فرکتالی چاله بیجار با تأکید بر تغییرات سطح اساس

غلام حسن جعفری^۱

هزیر محمدی^۲

چکیده

تغییرات سطوح اساس از مهم‌ترین عوامل ناتعادلی فرم‌ها و فرایندهای در حوضه‌های آبریز است. حوضه آبریز قزل‌اوزن از زیرحوضه‌های دریای خزر، در طی کواترنری به‌شدت تحت تأثیر نوسانات سطح اساس بوده است. برای بررسی ژئومورفولوژیکی این اثرات در سراب قزل‌اوزن، با استفاده از نرم‌افزار GIS و نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی آبراهه‌ها و لیتولوژی رقومی گردید و با توجه به شواهد تغییرات سطح اساس (اسارت و انحراف رودخانه‌ها و آبراهه‌های شعاعی همگرا) محدوده‌ی ژئونون بیجار شناسایی شد. با استفاده از تئوری هندسه فراکتال و روش رتبه‌بندی هورتن-استرالر، نسبت انشعاب، طول آبراهه‌ها و بعد فرکتالی زیرحوضه‌ها محاسبه گردید. آثار تغییرات سطوح اساس محلی، به‌صورت تراکمی در ۶ زیرحوضه انگوران چای، حسن‌آباد یاسوکنند، یول کشتی، قروه و دهگلان، گرماب و سجاس‌رود شناسایی و تجزیه و تحلیل شد. در اطراف چاله بیجار ۳ تراس دریاچه‌ای در ارتفاع ۱۵۶۱، ۱۵۴۰ و ۱۵۱۵ متری مشاهده گردید درحالی‌که در مرکز چاله فرایند کاوشی غلبه دارد. عدد ۲/۱۲ بعد آشوبناکی (فرکتالی) حوضه‌ی آبریز بیجار، دال بر شرایط تقریباً متعادل شبکه‌ی آبراهه‌ای در کل حوضه است که نشان‌دهنده متوقف شدن فرسایش قهقراپی در سرشاخه‌های رتبه‌ی یک است. در دو زیرحوضه یول کشتی و قروه دهگلان با بعد فرکتالی کمتر از ۴ دال بر ضریب انشعاب

۱- دانشیار ژئومورفولوژی دانشگاه زنجان، زنجان. Emai:jafarihas@znu.ac.ir

۲- کارشناس ارشد هیدروژئومورفولوژی، دانشگاه زنجان، زنجان.

سر آب زیرحوضه‌های انگوران چای، سجاس‌رود و گرماب سرشاخه‌ها قادر به شکل‌گیری و عقب‌نشینی هستند. زیرحوضه حسن‌آباد یاسوکنند با بیشترین عدد فرکتالی در بین زیرحوضه‌ها (۳/۲۵) به بیشترین حد تعادل خود رسیده و کمترین فرسایش قهقرایی در سرشاخه‌های آن مسلط است. بررسی رابطه‌ی بین بعد فراکتال نسبت انشعاب با مساحت حوضه‌های مورد مطالعه دال بر یک رابطه‌ی معکوس و منفی است.

واژگان کلیدی: سطح اساس، ژئونرون، قزل‌اوزن، اسارت، انحراف.

مقدمه

کواترنری با دو اقلیم یخچالی و بین یخچالی همراه بوده و در هر دوره اقلیمی، شرایط محیطی خاصی حکم‌فرما بوده است. گاه این تغییرات با بالا رفتن دما، ذوب یخچال‌ها، بالا رفتن حجم تبخیر و در نتیجه پایین آمدن سطح دریاچه‌ها و خشک شدن آن‌ها همراه بوده و زمانی برعکس با کاهش دما، گسترش یخچال‌ها، کاهش تبخیر و افزایش رطوبت نسبی و در نتیجه با افزایش مقدار آب موجود در چاله‌ها دریاچه‌ها را شکل داده یا پرآب‌تر نموده که از آن‌ها به‌عنوان دریاچه‌های پلوویال یاد می‌کنند (رامشت، ۱۳۸۲: ۹۶-۹۵). در اواخر عصر یخبندان با عقب‌نشینی یخچال‌های طبیعی، بر اثر گرم شدن هوا و فزونی میزان تبخیر بر بارش، بیشتر دریاچه‌هایی که بسیاری از دشت‌های پست و محدوده‌های هموار در دل کوهستان‌ها و مناطق کویرهای فعلی کره زمین را فراگرفته بودند، خشک شدند (پاشایی، ۱۳۸۸: ۱). در کوتاه‌مدت معمولاً به‌جز سطح اساس در هر حوضه رودخانه‌ای، سایر بخش‌ها وضع ثابت ندارند (خیام، ۱۳۹۰: ۵۹). ولی در درازمدت سطح اساس رودخانه نیز دچار تغییرات زیادی می‌شود (کمانه و همکاران، ۱۳۹۰: ۸۴-۷۱). بررسی پدیده‌ها به‌صورت حوضه‌ای در ژئومورفولوژی اساسی‌ترین واحد طبیعی در مقیاس منطقه است (رامشت و شاه‌زیدی، ۱۳۹۰: ۲۱۱). اگر ورودی سیستم رودخانه قزل‌اوزن دومتغیره عمده ماده و انرژی فرض شود حوضه‌ی قزل‌اوزن در دوره آنالگیشیال با کاهش نسبی انرژی تابشی و افزایشی

ورودی بارش مواجه بوده است (جعفری و بختیاری، ۱۳۹۵: ۲۴۲-۲۲۱؛ معیری و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۳۰-۱۰۹).

در ارتباط با این موضوع، تحقیقات فراوانی انجام شده از جمله: کلینسلی (۱۹۷۰: ۳۴۴) در تحقیقاتش تراس‌های دیرینه ۶۰ دریاچه داخلی را که تحت شرایط اقلیمی مرطوب‌تر در پلئستوسن ایجاد شده‌اند شناسایی کرد. بی^۱ و همکاران (۲۰۱۲: ۱۶۲-۱۵۱) با بررسی خصوصیات فراکتال لندفرم‌های زمین در بلوک اوردو^۲ چین بر مبنای شبکه‌های رودخانه‌ای آشوبناک دریافتند که تغییرات ویژه خواص فرکتالی پستی و بلندی‌ها را نشان می‌دهند. مهرشاهی (۱۳۸۱: ۱۴۸-۱۳۳) معتقد است که واکنش دریاچه‌ها نسبت به تغییرات (بلندمدت) و نوسان‌ها (کوتاه‌مدت) اقلیمی کواترنری با احتمال زیاد یکسان نبوده است. موسوی و تقی زاده (۱۳۸۹: ۳۵-۳۰) مطرح نموده‌اند که در دوران کواترنری، به علت تغییرات گسترده‌ی اقلیمی و همچنین پیش روی و پس‌روی آب دریاها درائش‌های فازهای یخچالی و تغییرات سطح اساس رودخانه در دوره کواترنری، نرخ فرسایش رودخانه‌ای در دشت خوزستان بیش از دوره‌های قبل و امروز بوده و فرم‌زایی رودخانه‌ای در این دوره بسیار فعال بوده است. کرم (۱۳۸۹: ۸۲-۶۷)، با استفاده از نظریه‌ی آشوب بین فرم (بعد فراکتال) و فرایند (خودسازمان‌دهی) در پدیده‌های ژئومورفولوژیک روابطی برقرار کرد. رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۰: ۱۳۹-۱۱۹) با بررسی تغییرات الگوی هندسی رودخانه قزل‌اوزن به این نتیجه رسیدند که در سال‌های موردبررسی بیشترین تغییرات در بازه شریانی بوده است. عزیزی و همکاران (۱۳۹۱: ۲۰-۱) طبق محاسبه‌ی شاخص‌های اقلیمی و تحلیل پالینولوژیکی رسوبات دریاچه‌ی نئور بیان داشتند که طی هولوسن پیشین دو فاز مرطوب به ترتیب در حدود ۹۶۵۰ و در ۸۲۰۲ سال پیش و همچنین یک‌فاز خشک در حدود ۹۴۷۹ سال قبل دریاچه نئور را فرامی‌گرفته است. عزتیان و دانش‌آموز (۱۳۹۱: ۴۰-۱) خصوصیات هیدروژئومورفولوژی حوضه آبریز خیرآباد را با استفاده از روش حوضه‌ای بررسی و به این نتیجه رسیدند که قدرت و سرعت جریان‌های سطحی همراه با سازندهای سست و

^۱. Bi

^۲. Ordou

فعالیت‌های انسان، باعث تکوین اشکال فرسایشی آب‌شده است. داداش زاده و همکاران (۱۳۹۳: ۲۴۲-۲۳۱)، یکی از تأثیرات مهم هم‌جواری حوضه‌ها را وقوع پدیده فرسایش قهقرائی و به دنبال آن رخ دادن پدیده اسارت دانستند و معتقدند چاله اردبیل نیز از این قاعده مستثنا نبوده و تحت تأثیر حوضه مجاور خود در شرف وقوع پدیده فرسایش قهقرائی است که در ادامه به اسارت و انحراف شبکه اصلی زهکش‌های این دریاچه قدیمی خواهد انجامید. خالقی و همکاران (۱۳۹۵: ۱۳۸-۱۱۹) در بررسی قابلیت اتومای سلولی در شبیه‌سازی میزان تحول و فرسایش در سیستم رودخانه‌ای حوضه‌ی آبریز لیقوان به این نتیجه رسیدند که مطالعات پیشین و شواهد میدانی بیانگر نتایج قابل قبول رویکرد اتومای سلولی می‌باشد. جانانه و رجبی (۱۳۹۵: ۱۲-۱) در بررسی اثرات دوره کوتاه‌تری در دریاها و دریاچه‌های ایران دریافتند که تغییر سطح اساس دریاها و دریاچه‌های ایران در دوره‌های یخچالی و بین یخچالی کاملاً مشابه تغییر در مقیاس جهانی است. کیانی و همکاران (۱۳۹۵: ۳۴-۱۹) با ارزیابی و بررسی مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از تغییرات اقلیمی در حوضه ابرکوه به این نتیجه رسیدند که تغییر نسبت پارامترهای محیطی حال به دوره‌های سردتر همگی از آستانه‌های پایداری عبور و وضعیت عمومی سیستم‌های محیطی در آستانه‌ی اضمحلال است. ملک‌محمدی و همکاران (۱۳۹۵: ۲۴۷-۲۵۷) رده‌بندی هیدروژئومورفیک تالاب‌ها به منظور تعیین عملکردهای اکولوژیکی در تالاب چغاخور را ارزیابی نمودند.

مبانی نظری

ارزیابی نقش آنالیز سیستمی در مطالعات ژئومورفولوژیکی پایه، حاکی از آن است که نگرش سیستماتیک به واحدهای ژئومورفولوژیک و همچنین روابط متقابل بین فرآیندها و فرم‌ها از جمله مواردی هستند که باید در پژوهش‌های ژئومورفولوژی مورد توجه قرار گیرند (عشقی، ۱۳۸۱: ۳۷۱). ساختار ژئونروئیک در شبکه‌های آبراهه از ساختار شبکه‌ی عصبی انسان الهام گرفته شده است. منظور از ژئونرون‌ها در شبکه‌های زهکش رودخانه، فضاهایی است که سبب اجتماع روان آب‌ها در محدوده خاصی می‌شوند (رامشت، ۱۳۸۵: ۵۵). باوجود گستردگی طبیعت و وجود انواع موجودات پیرامون انسان‌ها، نظم خاصی بر همه‌چیز حاکم

است که با پیشرفت علوم بشری، این نظم بیش‌ازپیش مشخص‌تر می‌شود و با دقت در پدیده‌های به‌ظاهر بی‌نظم مشخص می‌گردد که نظم خاصی در پشت آن‌ها نهفته است (اعتباریان، ۲۰۰۸: ۳۵-۳۸). هندسه فرکتالی به توصیف اشیایی می‌پردازد که خود متشابه و متقارن هستند (باس^۱، ۲۰۰۲: ۳۱۱). مطابق نظریه آشوب، پدیده‌های طبیعی همچون رودخانه که در ظاهر پیچیده و بی‌نظم هستند، با استفاده از روابط هندسه درختان فرکتالی، می‌توانند منظم در نظر گرفته شوند (آریزا^۲، ۲۰۱۳: ۸۶). بنیان‌گذاران تفکر کاتاستروفیسم رکن تحلیل‌های خود را بر تبیین فرایندهای ژئومورفولوژی در سه محور اساسی تغییرات اقلیمی، سطوح اساس دریا‌های آزاد، رخدادهای تکتونیکی و تأثیرات عملکرد انسان قرار داده و به‌جای بیان ایده‌های کلی در مورد تحول چهره پوسته خارجی زمین در قالب زمان به تحلیل فرایندها در قالب سه محور یادشده همت گماشته‌اند (فیروزی، ۱۳۵۲: ۱۶۲-۱۵۸).

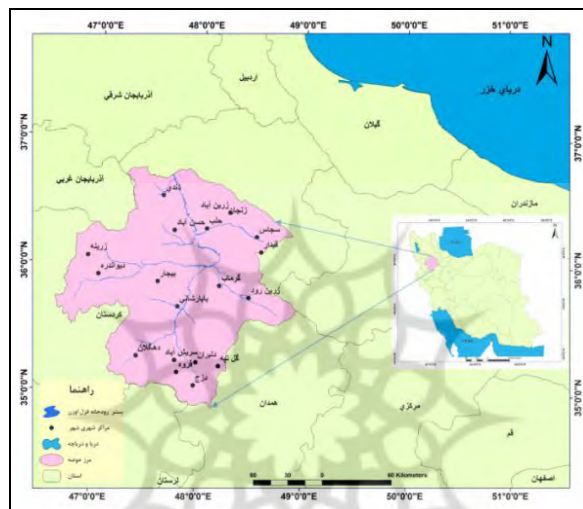
داده‌ها و روش‌ها

حوضه‌ی بیجار در بخش جنوبی و جنوب غربی حوضه آبریز قزل‌اوزن (در قسمت سراب) است که از ارتفاعات چهل چشمه کردستان سرچشمه می‌گیرد. رودخانه قزل‌اوزن از طریق تنگ ماهنشان به چاله زنجان رود منتقل می‌شود. علت انتخاب این محدوده به‌عنوان حوضه مستقل در این مقاله، همگرایی آبراهه‌ها در کل زیرحوضه‌های منطقه است. مساحتی بالغ بر ۲۴۸۰ کیلومترمربع دارد و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۲۲۶۸ متر است. این حوضه در مختصات ریاضی ۴۶ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). چاله بیجار از نظر تقسیم‌بندی واحدهای زمین‌شناسی جزء زون سنج-سیرجان و ایران مرکزی است در مسیر رودخانه قزل‌اوزن واحدهای مختلف از جمله سازند قم شامل مارن و ماسه‌سنگ‌های مارنی بامیان لایه‌های آهکی، واحدهای سازند سرخ بالایی، واحد سرخ زیرین و واحدهای مختلف سازند کرج به همراه آهک‌های نازک لایه وجود دارد. همچنین سنگ‌های آتش‌فشانی شامل

^۱. Bass

^۲. Ariza

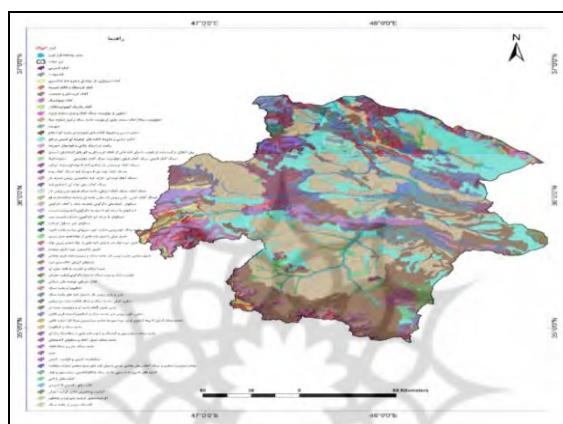
آندزیت، بازالت، ریولیت، الیت و توف‌های اسیدی به همراه نهشته‌های مربوط به نئوژن و کواترنری به چشم می‌خورد.



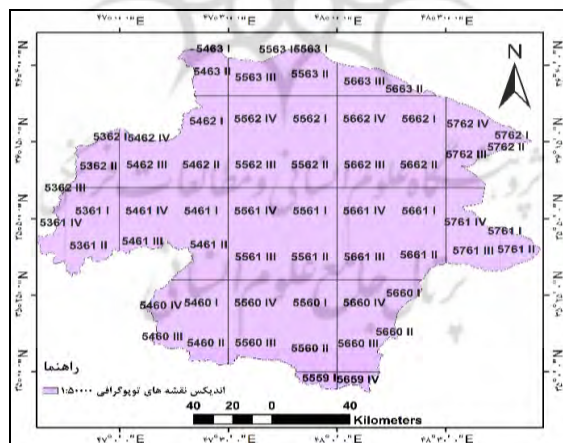
شکل ۱: موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه

روند اکثر گسل‌های منطقه شمال غربی - جنوب شرقی است. مهم‌ترین گسل این منطقه گسل حلب با راستای خم‌دار شمال غربی - جنوب شرقی، با طول ۶۰ کیلومتر در حاشیه غربی استان زنجان واقع گردیده است. گسل مذکور دارای شیب زیاد به سمت شمال شرقی است و بدین ترتیب سازند قم بالایی با شیب زیاد را در برابر نهشته‌های آبرفتی پلیوکواترنر قرار داده است (پور کرمانی و آرین ۱۳۷۸: ۳) (شکل ۲). تغییر سطح اساس نقش مهمی در تحولات ژئومورفولوژیکی حوضه‌ی قزل‌اوزن داشته است. تغییر مسیر آبراهه‌ها نیز حاکی از تغییرات سطح اساس است. انحراف و اسارت رودخانه دال بر ناتعادلی حوضه است. برای بررسی تحولات ژئومورفولوژیکی در منطقه‌ی مورد مطالعه، ابتدا 30*30 DEM محدوده مورد نظر از سایت www.earthexplorer.usgs.gov ماهواره SRTEM استخراج گردید و با استفاده از نرم‌افزار Arc map-Arc GIS، لایه خطوط منحنی میزان

تهیه گردید. با استناد به نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی شیت زنجان، ماهنشان، حسن‌آباد یاسوکنند، بیجار، قروه و دهگلان، قیدار و دیواندره لایه‌های لیتولوژی رقومی و مورداستفاده قرار گرفت. رودخانه‌های منعکس شده در نقشه‌های توپوگرافی (شکل ۳) با کمک نرم‌افزار Arc GIS رقومی گردید.



شکل ۲: نقشه ساختار زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه



شکل ۳: اندکس نقشه‌های توپوگرافی مورد استفاده

در حوضه بیجار ۶ زیرحوضه گرماب، سجاس‌رود، انگوران چای، حسن‌آباد یاسوکنند، یول کشتی و قروه- دهگلان با استفاده از ایکستشن Hydrology در Arc GIS از روی DEM تعیین حدود گردید. پروفیل‌های عرضی از سراب تا پایاب زیرحوضه‌ها ترسیم شد و اختلاف ارتفاع ناشی از تغییرات سطح اساس در مکان‌هایی که سطوح ارضی به‌صورت ناگهانی تغییر ارتفاع (افتادگی) داشته‌اند، برآورد گردید؛ وضعیت شیب و رسوب چنین مکان‌هایی در بازدیدهای میدانی مکرر تجزیه و تحلیل شد. علاوه بر سطوح فرسایشی، شبکه‌ی آبراه‌های همگرا در ۶ زیرحوضه نیز تأییدکننده مستقل بودن چاله بیجار در کواترنری است. بررسی‌های میدانی حاکی از وجود تراسی است که هنوز قابل‌رویت و مشهود است؛ بر اساس ارتفاع آن‌ها حدود و مرز دریاچه‌های گذشته در نرم‌افزار Arc GIS و Global mapper محاسبه شد. رتبه‌بندی استرالر یا رتبه‌بندی هورتن- استرالر روشی برای رتبه‌بندی آبراه‌ها و رودخانه‌هاست که رتبه‌بندی شاخه رودها بر اساس آن در یک سیستم زهکشی حوضه آبریز، آبراهه اصلی از ترکیب رده‌های اول، دوم، سوم و رده‌های بعدی تشکیل می‌شود. تمامی رده‌های آبراه‌های همراه با یک پیوستگی خاص و دقیق در شکل‌گیری سیستم زهکشی آن حوضه دخیل هستند. در این روش، شاخه رودهای کوچک می‌تواند در سرنوشت رتبه‌ی زهکش اصلی که آب‌ها را از منطقه خارج می‌کند مؤثر باشد (رامشت، ۱۳۷۵: ۳۹۲). تعداد کل آبراه‌های مرتبه‌ی i ام (N_i) برای یک درخت فرکتالی از مرتبه‌ی n با رابطه (۱) به دست می‌آید. نسبت انشعاب هورتن از رابطه‌ی (۲) و نسبت طولی مرتبه از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$N_i = \sum_{j=1}^n N_{ij} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$b = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$Rr = \frac{r_{i+1}}{r_i} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در روابط فوق N_i تعداد آبراهه مرتبه i ام و Π_i طول متوسط آبراهه مرتبه i ام است. مقادیر مستقل از مرتبه، برای شبکه زهکشی تقریباً ثابت هستند. با استفاده از بعد فرکتالی

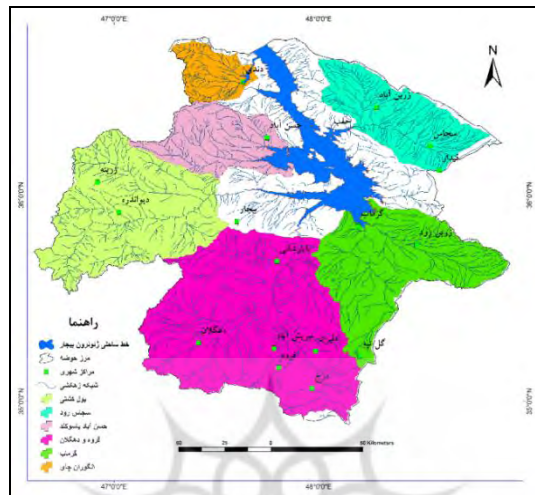
(D) برای شبکه‌های زهکشی، رابطه‌ی (۴) بین طول و مرتبه شبکه برقرار است (عملی زاده، ۱۳۹۳ به نقل از تارکوت^۱، ۲۰۰۷: ۳۰۸).

$$D = \frac{\ln Rb}{\ln Rr} \quad \text{رابطه (۴)}$$

بحث و نتایج

شبکه آبراهه‌ای همگرا در ۶ زیرحوضه انگوران چای، حسن‌آباد یاسوکند، یول کشتی، قروه و دهگلان، گرماب و سجاجس رود به‌گونه‌ای است که باعث تداعی یک حوضه‌ی آبی در ذهن می‌شود؛ در صورتی که در شرایط کنونی آب آن‌ها از طریق قزل‌اوزن به دریاچه خزر منتقل می‌شود. در واقع شبکه آبراهه همگرای نقطه‌ای حاکی از ورود آب کل حوضه به یک ژئونرون است. در بررسی‌های میدانی، شواهد یک تراس دریاچه‌ای در جاده زنجان-بیچار در ارتفاع ۱۵۶۱ متر از سطح دریا شناسایی شد. این تراس، بالاترین خط ساحل دریاچه گذشته را مورد تأیید قرار می‌دهد. با بازسازی تراس دریاچه‌ای، وسعت ژئونرون یا دریاچه گذشته بالغ بر ۱۵۴۷ کیلومتر مربع برآورد گردید (شکل ۴). با از بین رفتن دریاچه وضعیتی به وجود آمده که رودخانه‌ها مجبور به خارج شدن از چاله بیچار شده‌اند در این میان با تغییر سطح اساس بعضی از آن‌ها دچار اسارت و انحراف شده‌اند. چراکه در شرایط محیطی جدید وضعیت قرارگیری رودخانه‌ها نسبت به هم تغییر کرده و رودخانه‌هایی که در ارتفاع کمتر جریان داشته و چه‌بسا شیب بیشتری داشته‌اند منجر به اسارت یا انحراف رودخانه‌های مجاور خود شده‌اند.

¹. Turcotte

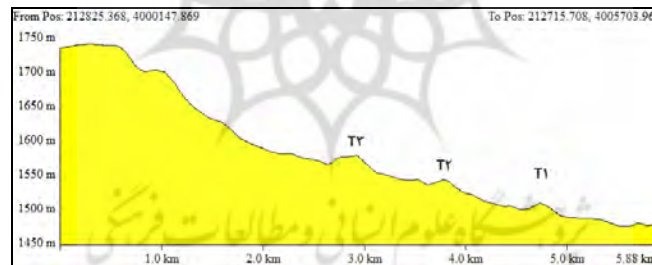


شکل ۴: نقشه حوضه بندی چاله بیجار

چنانچه دو رودخانه نزدیک به هم در سطح متفاوت جاری باشند و جریان آب یکی در سطح بالاتر از دیگری باشد و در زمینی که دو آب جاری از هم جدا می‌شود، شعبات رودخانه دیگر جاری باشد؛ به تدریج شاخه‌ی ابتدایی آن شعبات بر اثر عمل فرسایش قهقراپی عقب می‌رود و چنانکه شعبه‌های از رودخانه آن قدر پس‌روی کند که مسیر رودخانه بالاتر را قطع نماید و جریان را به سوی رودخانه که در ارتفاع پائین تر جاری است بکشاند اسرت رخ داده است (خیام، ۱۳۹۰: ۵۹). شواهد اسارت یا انحراف شبکه آبراهه‌ای در نقشه‌های توپوگرافی عبارت‌اند از: ۱- تغییر مسیر با زاویه ۹۰ درجه یا بیش‌تر در امتداد رودخانه‌های انگوران چای و حسن‌آباد یاسوکند. ۲- با توجه به شروع آبراهه در خط تقسیم آب حوضه و نبودن سطوح ارضی بالادست که آبی را فراهم نماید که موجب انتقال و تغییر شکل رسوبات شود، یک امر بدیهی است که در سراب رودخانه‌ها (جایی که تازه از به هم پیوستن جویبارها تازه رود در حال شکل‌گیری است) نباید رسوبات آبرفتی درشت دانه وجود داشته باشد. معمولاً عمل رسوب‌گذاری در قسمت پایاب یا میاناب، انجام می‌شود. وجود آبرفت‌های درشت دانه در خط تقسیم آب، حاکی از تغییر مسیر رودخانه است. خطوط منحنی میزان در چنین رسوباتی، با تضارس شکسته و بدون قلل هستند (رامشت، ۱۳۹۲: ۴۹). وجود چنین الگویی از منحنی

میزان و تأیید وجود رسوبات آبرفتی درشت‌دانه و گرد شده در سراب سرشاخه‌های قزل‌اوزن، حاکی از آن است که سراب سرشاخه‌های موردنظر در طی کواترنری محلی از رسوب‌گذاری بوده تا کاوش و برآثر تغییر مسیر رودخانه، اکنون محل کاوش شده‌اند. ۳- در بررسی شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی (AF) فرض بر این است که حوضه‌هایی که مقدار AF برابر ۵۰ باشد فاقد فعالیت تکتونیکی هستند (یمانی و علمی زاده، ۱۳۹۳: ۱۵)؛ البته تکتونیک می‌تواند سبب برهم خوردن چنین وضعیت شود؛ اما با توجه به دلایلی که در بالا به آن‌ها اشاره شد عامل اصلی عدم تقارن در زیرحوضه‌های موردنظر، تغییر مسیر رودخانه است. کوتاه‌تر بودن یا نبودن آبراهه‌ها در یک طرف رودخانه نسبت به طرف دیگر آن به همراه وجود رسوبات آبرفتی در خط تقسیم آب همان طرف، می‌تواند دلیلی بر تغییر مسیر رودخانه باشد. شیب کل حوضه در منطقه‌ی مورد مطالعه به طرفی از رودخانه است که آبراهه‌های کوتاه‌تری دارد؛ این طرف معمولاً در امتداد مسیر قبلی رودخانه قرار می‌گیرد و مسیر کنونی رودخانه عمود بر مسیر قبلی است. ۴- عدم تقارن ارتفاعی دوطرف حوضه‌های آبریز امر اجتناب‌ناپذیری است؛ اما زمانی که تفاوت ارتفاع زیاد همراه با طول آبراهه‌ی کمتر و وجود رسوبات آبرفتی دیاژنز نشده در خط تقسیم آب باشد حاکی از تغییر مسیر رودخانه است. طرفی که ارتفاع کمتری دارد در امتداد مسیر قبلی است. بارزترین آن‌ها در اطراف رودخانه مهرآباد و انگوران چای دیده شد. ۵- منحنی‌های میزان با سینوس‌های عمیق در بین و پایین دست منحنی‌های صاف تا سینوسی ساده دلیلی بر تغییر مسیر رودخانه هست (بختیاری، ۱۳۹۴: ۹۱). هرچه منحنی میزان‌ها در رسوبات دیاژنز نشده و سست صاف‌تر باشد، ناشی از طولانی بودن مدت‌زمان تعادل منطقه است. وجود پالس‌های عمیق، عدم تعادل را در چنین محیط‌هایی منعکس می‌نماید. انگوران چای از کوه بلقیس سرچشمه گرفته و پس از عبور از دندی از طریق تنگ بهستان (انگوران-بهستان) به قزل‌اوزن می‌پیوندد؛ با نگاهی دقیق یک تغییر مسیر ۹۰ درجه‌ای در مسیر رودخانه در انگوران مشاهده می‌شود. پالس‌های عمیق خطوط منحنی میزان در میسر دندی به ماهنشان در نقشه توپوگرافی شیت ماهنشان، فرسایش خندقی را منعکس می‌کند. زمانی که ژئوژن بیجار ماده و انرژی را بلوکه می‌کرده و حوضه‌ی مستقل بوده، انگوران چای با مسیری مستقیم از کنار روستای انگوران در امتداد شمال غرب- جنوب شرق جریان داشت. در ارتفاع ۱۵۷۰ متر با

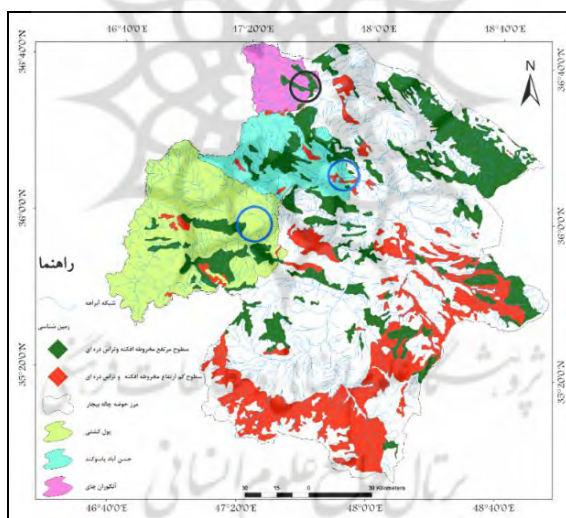
رودخانه یکی شده و وارد دریاچه می‌شد. در نقشه‌های زمین‌شناسی نیز تراس‌های قدیمی در مسیر انگوران چای به ایانلو دیده می‌شود. در سر آب رودخانه‌ایانلو (هرچند این رودخانه چندان طولانی نیست) معدن شن و ماسه‌ای فعالیت دارد که حاکی از حجم زیاد ماده و انرژی در زمان رسوب‌گذاری شن و ماسه است. با تخلیه ژئونرون بیجار و با پائین افتادن بستر قزل‌اوزن در حدود ۱۱۵ متر، فرسایش قهقرایی بر سرشاخه‌های قزل‌اوزن و از جمله بر روی یکی از سرشاخه‌ها در غرب روستای بهستان مسلط شده است. حوضه آبریز حسن‌آباد یاسو کند نیز از قره‌داش و قره‌گونی سرچشمه و با رودخانه گوزن به قزل‌اوزن می‌ریزد. در زمان حیات چاله بیجار، رودخانه گوزن در ارتفاع ۱۶۰۵ متر جریان داشته و به صورت مستقیم با جهت غربی - شرقی به ژئونرون بیجار وارد می‌شده است؛ در شرایط کنونی در قسمت انتهایی حوضه‌ی حسن‌آباد یاسو کند، رودخانه گوزن با چرخش ۹۰ درجه‌ای به قزل‌اوزن می‌پیوندد. با توجه به شناسایی سه تراس در چاله بیجار از بلندترین قسمت حوضه تا پست‌ترین بخش آن، چنین نتیجه گرفته شد که تخلیه چاله بیجار در طی سه مرحله انجام شده است (شکل ۵).



شکل ۵: پروفیل ترسیم‌شده در چاله بیجار حاکی از وجود سه تراس

احتمالاً در اولین فاز تخلیه، انحراف رودخانه گوزن رخ نداده است چون ساحل ژئونرون بیجار، ارتفاع فرسایش قهقرایی رودخانه گوزن هست؛ و قسمت انتهایی که انحراف رخ داده ارتفاعی کمتر از ساحل دارد و در انتهایی‌ترین تراس چاله بیجار، ۱۵۰۹ متر ارتفاع دارد؛ بعد از تخلیه اولیه چاله بیجار، رودخانه گوزن تغییر مسیر نداده و احتمالاً بعد از آخرین فاز تخلیه، فرسایشی که در قسمت شمال شرقی بستر قزل‌اوزن مسلط شده با تخلیه رسوبات آبرفتی باعث تغییر مسیر رودخانه شده است. اختلاف سطح اساس در حسن‌آباد یاسو کند در آخرین

مرحله‌ی فرسایشی به ۲۱۵ متر رسیده است. حوضه آبریز یول کشتی (گورانی) از ارتفاعات چهل چشمه کردستان شرقی سرچشمه و در جهت جنوب غرب- شمال شرق قزل‌اوزن می‌شود. این حوضه در سرچشمه‌ی قزل‌اوزن قرار دارد و کمتر دچار ناعدالی می‌شود؛ یعنی زمان پاسخ طولانی‌تری دارد؛ چون این حوضه در قسمت دورتر از تغییرات سطح اساس قرار گرفته و زمان پاسخ دیرتری داشته و آخرین انحراف رخ داده بوده است. وجود رسوبات مخروط‌افکنه‌ای قدیم در آبخیز حاکی از اثرگذاری رودخانه‌ها بر آن‌ها است. قطع ناگهانی رسوبات مخروط‌افکنه‌ای قدیم بر اساس نیروی فرسایشی به‌گونه‌ای است که نمی‌توان عامل برش را به چیز دیگری غیر از تغییرات سطح اساس نسبت داد؛ رسوبات مخروط‌افکنه‌ای قدیم کاملاً از محیط خارج‌شده و رسوبات زیرین که عمدتاً از مارن بوده رخ نمون شده‌اند. تغییرات مربوط به سطح اساس در این حوضه به ۱۲۵ متر می‌رسد (شکل ۶).



شکل ۶: مسیر اسارت و انحراف رودخانه‌ها و لیتولوژی آبرفتی

وجود سطوح تراکمی و کاوشی در مناطقی همچون حسن‌آباد یاسوکند، بیزینه‌رود، مسجدلر و مصرآباد نشان از توالی دوره‌های تراکمی و کاوشی در طی کواترنری است. در هر ۶ زیرحوضه شواهد تغییرات سطح اساس دیده می‌شود. در زیرحوضه قروه و دهگلان و در

نزدیکی مسجدر دشت‌های ساختمانی دیده می‌شود که تغییرات توانسته ۲۳۴ متر برش در آن‌ها ایجاد کند. این برش‌ها (پائین افتادگی ناگهانی) ناشی از تغییر سطح اساس سرشاخه‌های قزل‌اوزن است. در زمانی که سطح اساس بالا بوده با عمل رسوب‌گذاری، سطوح تراکمی شکل گرفته و با تغییر سطح اساس رودخانه و تغییر روند فرسایشی از تراکمی به کاوشی، سطوح کاوشی به وجود آمده‌اند (شکل ۷). مقدار اختلاف ارتفاع ناشی از پایین افتادگی ناگهانی بر اساس تغییرات سطح اساس از روی پروفیل محاسبه شد: رودخانه گوزن در حوضه‌ی حسن‌آباد یاسوکند ۲۱۵ متر، جاده بیجار ۱۵۶ متر، زرین‌رود ۱۰۰ متر، انگوران چای ۱۱۴ و یول کشتی ۱۲۵ متر تغییر سطح اساس را بعد از تخلیه شدن چاله بیجار تجربه کرده‌اند. این تغییرات به صورت سطوح متداخل منقطع انعکاس رودخانه‌ها نسبت به سه دوره فرسایشی چاله بیجار است. مقدار فرسایش در سراب‌ها کم و در پایاب نسبتاً بیشتر است (جدول ۱) (شکل ۸).



شکل ۷: سطوح تراکمی بریده‌شده در حسن‌آباد یاسوکند (نگاه به سمت شرق)

جدول ۱: مشخصات مربوط به نیمرخ‌ها

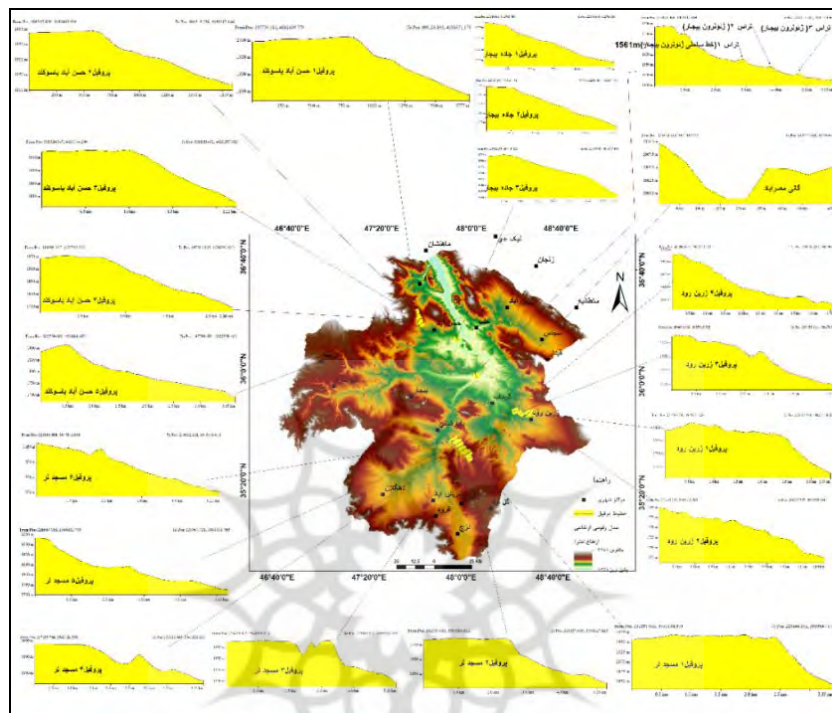
نام پروفیل	ارتفاع بستر رودخانه	ارتفاع افتادگی ناگهانی	اختلاف ارتفاع	حسن آباد یاسو کند P۵	۱۶۹۰	۱۹۰۵	۲۱۵
مسجدلر P۱	۱۸۴۳	۱۹۵۵	۱۱۲	جاده P۱ بیجار	۱۴۹۵	۱۵۸۴	۹۰
مسجدلر P۲	۱۸۱۸	۱۹۶۸	۱۵۰	جاده P۲ بیجار	۱۴۶۵	۱۵۷۲	۱۰۷
مسجدلر P۳	۱۷۹۲	۱۹۷۵	۱۸۳	جاده P۳ بیجار	۱۴۱۴	۱۵۷۰	۱۵۶
مسجدلر P۴	۱۷۵۰	۱۹۷۹	۲۲۹	گالی مصر آباد	۱۶۵۸	۱۶۶۹	۱۱
مسجدلر P۵	۱۷۲۱	۱۹۵۵	۲۳۴	زرین رود P۱	۱۷۱۳	۱۷۸۸	۷۶
مسجدلر P۶	۱۶۹۴	۱۸۵۲	۱۵۸	زرین رود P۲	۱۶۷۴	۱۷۸۴	۱۰۰
حسن آباد یاسو کند P۱	۱۸۴۰	۲۰۱۰	۱۷۰	زرین رود P۳	۱۶۴۹	۱۷۳۵	۸۶
حسن آباد یاسو کند P۲	۱۸۰۵	۱۹۹۳	۱۸۸	زرین رود P4	۱۶۱۵	۱۷۱۳	۹۸
حسن آباد یاسو کند P۳	۱۷۷۵	۱۹۷۰	۱۹۵	انگوران چای	۱۶۴۰	۱۵۲۶	۱۱۴
حسن آباد یاسو کند P۴	۱۷۵۰	۱۹۵۲	۲۰۲	بول کشتی	۱۷۲۸	۱۶۰۳	۱۲۵

چاله بیجار در واقع حوضه آبی مستقلی بوده که در جریان تحولات کواترنری استقلال خود را از دست داده است؛ به عنوان (ژئونون^۱) دریاچه قدیمی حوضه مستقلی بوده که در

^۱-Geonrone

جریان تحولات کواترنری استقلال خود را از دست داده است. از شواهد مستقل بودن چاله بیجار می‌توان انحراف رودخانه‌های انگوران چای، یول کشتی و حسن‌آباد یاسو کند اشاره کرد. شبکه آبراهه‌های ۵ زیرحوضه مذکور به صورت همگرایی نقطه‌ای در نزدیکی قجور به هم می‌پیوندند. در شهر دندی با یک‌خمش ۹۰ درجه‌ای مسیر رودخانه انگوران چای جنوب غرب- شمال شرق شده است. در امتداد مسیر اصلی حوضه (شمال غرب- جنوب شرق) به سمت چاله بیجار بعد از شهر دندی رسوبات رودخانه‌ای ضخیم و زیادی برجای مانده است. در بعضی از قسمت‌ها نیز مثل اطراف حسن‌آباد یاسو کند، بیزینه‌رود، مصرآباد و ورودی استان کردستان از طرف زنجان، تغییر ناگهانی در سطح زمین دیده می‌شود؛ قطع ناگهانی سطح مرتفع با رسوبات آبرفتی قابل کشاورزی به همراه سطوح وسیع و نسبتاً هموار پائین‌دست، این فرض علمی را مطرح می‌کند که تخلیه ژئونرون بیجار به صورت کاتاستروف بوده است چراکه اگر این عمل به تدریج اتفاق افتاده بود به محیط امکان انطباق بیشتری داده می‌شد و از ایجاد و تغییرات فاحش در سطوح ارضی جلوگیری می‌کرد.

به منظور محاسبه بعد فرکتالی زیرحوضه‌های چاله بیجار ابتدا با استفاده از روش هورتن - استرالر تمام شاخه‌های شبکه‌ی آبراهه‌ای رتبه‌بندی شد. در این راه رتبه و طول هر شاخه محاسبه و تعداد شاخه‌ها به تفکیک مرتبه و میانگین طولی شاخه‌ها تعیین شد. سپس از مقادیر میانگین نسبت انشعاب، نسبت طولی شاخه‌ها محاسبه گردید (جدول ۲). بعد فرکتالی حوضه‌های انگوران چای، حسن‌آباد یاسو کند، یول کشتی، قروه و دهگلان، گرماب و سجاس‌رود با استفاده از رابطه (۴) به ترتیب اعداد ۲/۱۲، ۳/۲۵، ۱/۲۴، ۱/۰۷، ۲/۷۹ و ۲/۲۴ به دست آمد. بررسی رابطه‌ی بین بعد فراکتال نسبت انشعاب با مساحت حوضه‌های مورد مطالعه در جدول (۲) دال بر یک رابطه‌ی معکوس و منفی است. به این ترتیب که حوضه‌های با بعد فرکتالی بالا، مساحت کم و حوضه‌های با بعد فراکتال کم، مساحت بیشتری دارند. پیدایش الگوهای شاخه درختی نتیجه پاسخ‌های غیرخطی جریانات رسوب و رواناب به ویژگی‌های ذاتی و بیرونی حوضه است که این پاسخ‌ها در قالب تراکم و تعداد شاخه‌های فرعی و میزان شعبات آن‌ها در یک سیستم آبریز بروز می‌کند.



شکل ۸: پروفیل‌های ترسیم‌شده در حوضه‌ی مورد مطالعه

جدول ۲: مشخصات هیدرو مورفومتری حوضه‌های مورد مطالعه

پارامتر	انگوران چای	حسن آباد یاسوکنده	یول کشتی	فروه و دهگلان	گراماب	سجاس رود
نسبت انشعاب Km	۱۱/۰۶	۹/۰۱	۸/۷۳	۹/۵۴	۶/۳۹	۶/۳۶
نسبت طول رودخانه Km	۳/۹۷	۱/۳۱۵	۵/۷	۸/۱۴	۱/۹۴	۱/۱۳
مساحت Km ²	۷۸۸	۱۷۹۰	۴۱۸۳	۶۷۲۱	۳۵۵۴	۲۰۸۴
بعد فرکتالی	۲/۱۲	۳/۲۵	۱/۲۴	۱/۰۷	۲/۷۹	۲/۲۴

در دیدگاه رفتارهای فرکتالی، ویژگی همانندسازی در طول زمان، الگوهایی را در بستر به وجود می‌آورد که بر اساس ویژگی‌های زایشی و چگونگی تحولات، عملکرد

منحصربه‌فردی را در طی بلوغ یک حوضه به نمایش می‌گذارند (خسروی و همکاران، ۱۳۹۵: ۲۰-۱). هرچه بعد فرکتالی حوضه بیشتر باشد تراکم زهکشی بیشتر و در زمان کمتر به جریان دائمی می‌رسید. هم‌چنین یکی از ویژگی‌های فراکتال در ژئومورفولوژی این است که کوچک‌ترین تغییر در یک پدیده باعث ایجاد تغییرات بزرگ‌تر در کل سیستم می‌شود به‌عنوان مثال می‌توان گفت که اگر دریکی از حوضه‌های موردنظر یکی از شاخه‌های فرعی قطع شود رتبه‌ی شاخه‌ی بعدی کم می‌کند که این خود در زمان آرامش جریان رودخانه تأثیر دارد. چنین می‌توان گفت که نقطه‌ی آغاز یک شبکه‌ی زهکشی باعث هم‌مانندی شبکه‌ی زهکشی در طول زمان می‌شود و شبکه آبراهه‌ای را به حالت تکامل می‌رساند. وقتی در دیدگاه دیویس صحبت از مراحل جوانی، بلوغ و پیری می‌شود در واقع تکوین یک‌چشم‌انداز ژئومورفیک در سه تابلو زمانی طرح و سپس برای هر یک از آن‌ها ویژگی‌ها و روابط معینی تعریف می‌شود و در این رهگذر مفهوم تعادل به‌عنوان خصیصه‌ای برجسته و بارز برای دوره رسیدگی و پیری بیان می‌شود (رامشت، ۱۳۹۲: ۱۵). زمانی که حوضه در مرحله‌ی جوانی قرار دارد طبعاً دارای یک ناعادلی و بی‌نظمی است که می‌توان گفت نسبت به حوضه‌های پیر بعد فرکتالی بالاتری دارد.

نتیجه‌گیری

تعادل و عدم تعادل حوضه‌های آبی وابسته به پایداری پارامترهایی است که گاه به‌اشتباه با توجه به شرایط کنونی تجزیه و تحلیل می‌گردند. سطح اساس یک رودخانه و سرشاخه‌های یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که تجزیه و تحلیل حوضه‌های زهکشی بدون در نظر گرفتن آن‌ها امکان‌پذیر نیست. نگاه مجرد و انتزاعی به حوضه و ثابت در نظر گرفتن سطح اساس آن تجزیه و تحلیل تحولات حوضه‌ای را به علل غیرعامل ربط می‌دهد. تغییر سطح اساس رودخانه‌های کواترنری به این معنی نیست که تغییر سطح اساس فقط باید توجه به سطح اساس امروزی رودخانه بررسی شود. وجود تنگ‌های متعدد از جمله: ماهشان، هشت‌چین، رجین، اندآباد، قم‌چق‌ای، میانه - طارم و بابارشانی و سطوح تراکمی وابسته به آن‌ها در بیجار: حسن‌آباد یاسوکند، مسجدلر، زرین‌رود، گرماب، جاده بیجار و یول کشتی، دال بر وجود سطح اساس محلی بوده که به احتمال زیاد بر اثر فراوانی نسبی آب‌های

ورودی به‌ویژه در طول دوره‌های مرطوب کواترنری و سرریز شدن آب از بین رفته است. در ناهمواری‌های این منطقه ترکیبی از هورست، آتش‌فشان و رسوبات چین‌خورده دیده می‌شود و وحدت خاصی در ساختمان ناهمواری‌ها وجود ندارد ولی در مجموع رودخانه قزل‌اوزن عمود بر امتداد ناهمواری‌ها جریان داشته و محور آن‌ها را قطع کرده است. حوضه آبی بیجار با وسعتی بیش از ۲۴۸۰۰ کیلومترمربع، در داخل خود شواهدی از جمله آبراهه‌های همگرا و تراس‌های دریاچه‌ای در ارتفاع ۱۵۶۱، ۱۵۴۰ و ۱۵۱۵ متری از سطح دریا دارد که دال بر استقلال حوضه در اوایل کواترنری و تخلیه چندمرحله‌ای این چاله است. استقلال حوضه به معنی وجود ژئونرونی است که خود به‌صورت مستقل محل تجمع ماده و انرژی بوده است. در ژئونرون بیجار سطوح تراکمی حسن‌آباد یاسوکنند، مسجدلر و گرماب شناسایی شد. همچنین در این چاله اسارت‌ها و انحراف‌های ۶ زیرحوضه انگوران چای، حسن‌آباد یاسوکنند، یول کشتی، قروه و دهگلان، گرماب و سجاس‌رود با استفاده از شواهد میدانی و اسنادی شناسایی شد. عدد ۲/۱۲ بعد آشوبناکی حوضه‌ی آبریز بیجار، حاکی از آن است که کل حوضه در شرایط تقریباً متعادلی به سر می‌برد و فرسایش قهقرایی در سرشاخه‌ها رو به متوقف شدن است. ولی در دو زیرحوضه یول کشتی و قروه دهگلان با بعد فرکتالی ۱/۲۴ و ۱/۰۷ بین ۱ و ۲ یا کوچک‌تر بودن آن از ۲ دال بر ضریب انشعاب بیشتر نسبت به مساحت حوضه است که بیان‌گر این مطلب است که هنوز حوضه ظرفیت برای تشکیل شاخه‌های فرعی در مناطق سر آب را دارد. سرشاخه‌ها در سر آب زیرحوضه‌های انگوران چای، سجاس‌رود و گرماب نیز در حال شکل‌گیری و عقب‌نشینی هستند؛ به‌عبارت‌دیگر فرسایش قهقرایی به‌طور کامل در حوضه از بین نرفته و حوضه به تعادل نرسیده است. زیرحوضه حسن‌آباد یاسوکنند با بیشترین عدد فرکتالی در بین زیرحوضه‌ها (۳/۲۵) به بیشترین حد تعادل خود رسیده و کمترین فرسایش قهقرایی در سرشاخه‌های آن تسلط دارد. بررسی رابطه‌ی بین بعد فراکتال نسبت انشعاب با مساحت حوضه‌های مورد مطالعه دال بر یک رابطه‌ی معکوس و منفی است.

منابع و مأخذ

- اعتباریان، اکبر (۲۰۰۸)، تغییر سازمانی از دیدگاه نظریه آشوب، *ماهنامه تدبیر*، سال هجدهم، شماره ۱۹۰، صص ۲۲-۱۸.
- بختیاری، فاطمه (۱۳۹۴)، بررسی آستانه‌های ژئومورفولوژیکی مطالعه موردی حوضه آبریز قزل‌اوزن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان.
- پورکرمانی، محسن و آرین، مهرا (۱۳۷۸)، تحلیل ساختاری گسل حلب، سومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ص ۳.
- جانانه، کریستینه؛ رجبی، معصومه (۱۳۹۵) اثرات دوره کوتاه‌تر در دریاها و دریاچه‌های ایران، دومین کنگره بین‌المللی علوم زمین و توسعه شهری، ص ۱۲.
- جعفری، غلام. حسن؛ بختیاری، فاطمه (۱۳۹۵)، بررسی هیدرو-ژئوتونوتیک حوضه آبی قزل‌اوزن، *جغرافیا و توسعه*، شماره ۴۵، صص ۲۲۱-۲۴۲.
- خالقی، سمیه؛ روستایی، شهرام؛ خورشید دوست، علی‌محمد؛ رضایی مقدم، محمدحسین و قربانی، محمدعلی (۱۳۹۵)، قابلیت اتومای سلولی در شبیه‌سازی میزان تحول و فرسایش در سیستم رودخانه‌ای (مطالعه موردی: حوضه‌ی آبریز لیقوان)، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، سال ۲۰، شماره ۵۸، صص ۱۱۹-۱۳۸.
- خسروی، عذرا؛ سپهر، عادل؛ عبدالله زاده، زهرا (۱۳۹۵)، رفتار فرکتالی و ارتباط آن با خصوصیات هیدرومورفومتری حوضه‌های آبریز دامنه شمالی بینالود، *هیدروژئومورفولوژی*، شماره ۹، صص ۱-۲۰.
- داداش زاده، زهرا، مختاری، لیلا گلی، آراء، هایده (۱۳۹۳)، کیاس فرسایشی و تحولات پیش‌بینی‌نشده چاله اردبیل، *مجله جغرافیا و توسعه*، سال ۲۵، پیاپی ۵۵، شماره ۳، صص ۲۴۲-۲۳۱.
- دریو، ماکس (۱۳۹۰)، *اشکال ناهمواری‌های زمین*، ترجمه مقصود خیام، انتشارات دانشگاه تبریز.
- رامشت، محمدحسین، ۱۳۸۲، *دریاچه‌های دوران چهارم بستر تبلور و گسترش مدنیت در ایران*، دانشگاه اصفهان، دوره ۱-۲، شماره ۱۵، صص ۸۲-۱۳.

- رامشت، محمدحسین، شاه زیدی، سمیه سادات، ۱۳۹۰، کاربرد ژئومورفولوژی در برنامه‌ریزی ملی، منطقه‌ای، اقتصادی، توریسم، انتشارات دانشگاه اصفهان، چاپ دوم، ص ۳۹۲.
- رامشت، محمد، حسین (۱۳۹۲)، نقشه‌های ژئومورفولوژی (نمادها و مجازها)، چاپ ۶، انتشارات سمت، ص ۱۹۰.
- رامشت، محمدحسین (۱۳۷۵) کاربرد ژئومورفولوژی در برنامه‌ریزی ملی- منطقه‌ای، انتشارات دانشگاه اصفهان.
- رامشت، محمدحسین، ۱۳۸۵، تحلیل تطبیقی رفتار هیدرولوژیک رودخانه کر در شبکه ژئونوتیک، مجله جغرافیا و توسعه‌ی ناحیه‌ای، شماره پنجم، صص ۶۹-۵۱.
- رضایی مقدم، محمدحسین؛ ثروتی، محمدرضا؛ اصغری سراسکانرود، صیاد (۱۳۹۰)، بررسی تغییرات الگوی هندسی رودخانه قزل‌اوزن با استفاده از تحلیل هندسه فرکتال، جغرافیای و برنامه‌ریزی، سال ۱۶، شماره ۴۰، صص ۱۳۹-۱۱۹.
- عزتیان، ویکتوریا و دانش‌آموز، ذبیح اله (۱۳۹۱)، بررسی خصوصیات هیدروژئومورفولوژی حوضه آبخیز خیرآباد، مجله علمی-پژوهشی آمایش سرزمین، دوره ۴، ش ۲، صص ۴۰-۱.
- عزیزی، قاسم، اکبری، طیبه، هاشمی، حسین، یمانی، مجتبی، مقصودی، مهران، عباسی جغنا، علی (۱۳۹۲)، تحلیل پالینولوژیکی رسوبات دریاچه نئور به منظور بازسازی فازهای رطوبتی دیرینه دریاچه نئور در اواخر پلیستوسن و اوایل هولوسن، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۵، شماره ۱، صص ۲۰-۱.
- عشقی، ابوالفضل (۱۳۸۳)، تحلیل سیستمی به‌عنوان یک الگوی پایه در روش تحقیق ژئومورفولوژی، رشد آموزش جغرافیا، سال ۱۹، صص ۲۹-۲۲.
- عملی زاده، هیوا، شایان، سیاوش، نظریه آشوب در ژئومورفولوژی جریان‌ی (۱۳۹۳)، مطالعه موردی تغییرات بستر رود کل، هرمزگان، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۵، پیاپی ۵۵، شماره ۳، صص ۲۳۰-۲۱۷.
- فیروزی، بدیع الله (۱۳۵۲)، ژئومورفولوژی، مشعل اصفهان، ۱۶۲-۱۵۸.
- کرم، امیر (۱۳۸۹)، نظریه‌ی آشوب، فراکتال (برخال) و سیستم‌های غیرخطی در ژئومورفولوژی، فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال ۳، شماره ۸، صص ۸۲-۶۷.

- کلینسلی، دانیل، *کویرهای ایران و خصوصیات ژئومورفولوژیکی و پالئو کلیماتولوژی آن*، ترجمه پاشایی، عباس، انتشارات سازمان جغرافیایی، ۱۳۸۸، ص ۳۴۴.
- کمانه، سید عبدالعلی، نادری، صالح، طاهری، عبدالله و ساکت، مجید (۱۳۹۰)، تحلیل فضایی حوضه کر با تکیه بر استدلال‌های ژئومورفیک و هیدرولوژیک، *فصلنامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای*، سال اول، شماره ۱، صص ۸۴ - ۷۱.
- کیانی، طیبه؛ رامشت، محمدحسین؛ ملکی، امجد؛ صفا کیش، فریده (۱۳۹۵)، ارزیابی و بررسی مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از تغییرات اقلیمی در حوضه‌ی ابرکوه، *نشریه‌ی جغرافیا و توسعه*، شماره ۴۳، صص ۳۴-۱۹.
- معیری، مسعود، رامشت، محمدحسین، تقوایی، مسعود، تقی زاده، محمدمهدی، ۱۳۸۸، موارث یخچالی در حوضه صفاشهر استان فارس، *مجله پژوهشی دانشگاه اصفهان*، جلد ۳۲، شماره ۴، صص ۱۳۰-۱۰۹.
- ملک محمدی، بهرام؛ جهانی شکیب، فاطمه؛ یوری، احمدرضا (۱۳۹۵)، رده‌بندی هیدروژئومورفیک تالاب‌ها به‌منظور تعیین عملکردهای اکولوژیکی (مطالعه موردی: تالاب چغاخور)، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، سال ۲۰، شماره ۵۶، صص ۲۷۴-۲۵۷.
- مهرشاهی، داریوش (۱۳۸۱)، تشخیص تغییرات اقلیمی اواخر دوران چهارم در ایران از طریق اطلاعات حاصل از مطالعه دریاچه‌ها: یافته‌ها و نظریات جدید و پیچیدگی‌های تفسیر شواهد موجود، *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، شماره ۱-۴ (پیاپی ۶۴-۶۳)، صص ۱۴۸-۱۳۳.
- موسوی، سید حجت و تقی زاده، عبدالحکیم (۱۳۸۹)، فرم و فرایندهای رودخانه‌ای دشت خوزستان در کواترنر، *رشد آموزش جغرافیا*، دوره ۲۴، شماره ۳۵-۳۰.
- یمانی، مجتبی؛ علمی زاده، هیوا (۱۳۹۳)، تأثیر نوزمین ساخت در مورفولوژی شبکه زهکشی حوضه آبخیز نچی با استفاده از شاخصه‌ای ژئومورفیک و مورفومتریک، *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، سال ۲۹، شماره ۱۱۲، صص ۲۲-۹.
- Ariza. V. A, Jiménez-Hornero. F., Gutiérrez de Rave. E., 2013, Multi-fractal analysis applied to the study of the accuracy of DEM-based stream derivation, *Geomorphology*, Vol. 197, 85-95.

- Baas, A.C.W, 2002. Chaos, fractals and self-organization in coastal geomorphology: simulating dune landscapes in vegetated environments. *Geomorphology* 48, 309 – 328.
- Bi, L., He, H., Wei, Z., Shi, F., (2012), Fractal properties of landform in the Ordos Block and surrounding areas, China. *Geomorphology*, 175, 151–162.
- Turcotte, D. L., (2007), *Fractal and Chaos in Geology and Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, 398.

