

ارزیابی تکتونیک فعال مرتبط با تاقدیس قلاجه با استفاده از ناهنجاری سلسله مراتبی

شبکه آبراهه‌ها، غرب ایران

رضا علی پور*؛ استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
علی جهانگیری؛ دانشجوی کارشناسی ارشد تکتونیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی تأثیر تکتونیک فعال بر اشکال ژئومورفیک و ارتباط آن با ناهنجاری سلسله مراتبی سیستم‌های زهکشی در تاقدیس قلاجه بود. تاقدیس قلاجه با روند شمال غرب- جنوب شرق یکی از ساختارهای فعال تکتونیکی در کمربند چین خورده- رانده زاگرس است. در این مطالعه ابتدا منطقه مورد مطالعه به ۷ حوضه تقسیم و سپس شاخص‌های ژئومورفیک مرتبط با سیستم زهکشی برای حوضه‌ها محاسبه شد. پس از آن، ضریب همبستگی پیرسون (۴) در سطوح معنادار آماری (۰/۵ و ۰/۱) برای هر یک از اندیس‌های ژئومورفیک محاسبه شد. نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل کمی این شاخص‌ها همبستگی مثبت و قوی بین شاخص‌های BS-BI/Bmw را نشان داد. همچنین همبستگی مثبت و خوبی بین شاخص‌های R-Rb و همبستگی منفی قوی میان شاخص‌های R-Df و همبستگی منفی خوب میان شاخص‌های Δa -Hs دیده شد. حوضه‌های طویل به نسبت حوضه‌های تقریباً دایره‌ای و فرسایشی میزان Δa بالاتری داشتند. از طرفی این حوضه‌ها مقادیر عددی BI/Bmw بالاتری نسبت به حوضه‌های دایره‌ای و فرسایشی داشتند. این موضوع ارتباط مستقیم و همبستگی قوی میان شاخص‌های BS و BI/Bmw را نشان می‌دهد. گسترش سازندهای تبخیری و نامقاوم گچساران و نهشته‌های کواترنری سبب فرسایش و حفر عمیق و تغییر در تعداد آبراهه‌های مرتبه اول در قسمت شمالی یال جنوب باختری شده است که در نهایت همبستگی منفی میان شاخص‌های R-Df به وجود آورده است. نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل کمی شاخص‌های ژئومورفیک در تاقدیس قلاجه نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی بالاتر یال جنوب باختری این تاقدیس در مقایسه با یال شمال خاوری آن بود.

کلیدواژگان: زاگرس، شاخص‌های ژئومورفیک، شبکه زهکشی.

مقدمه

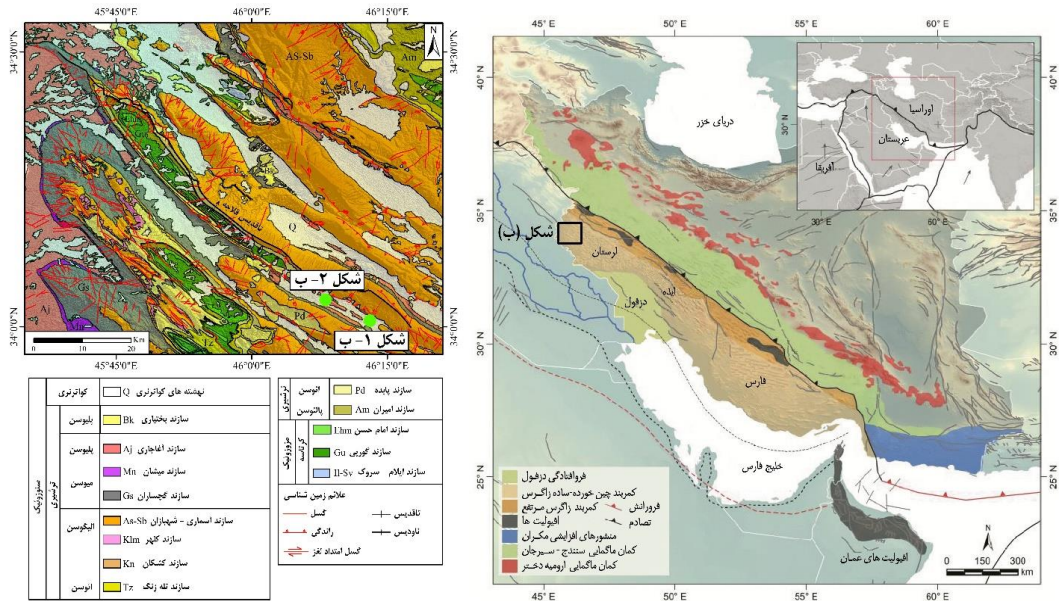
در مناطق فعال تکتونیکی حرکات عمودی و افقی بلوک‌های پوسته زمین سبب تغییرات گسترده در پدیده‌های سطحی می‌شوند (ایوانیس^۱ و همکاران ۲۰۰۶). برای اندازه‌گیری کمی این تغییرات از آنالیزهای ریخت‌سنجی استفاده می‌شود که به ارزیابی میزان فعالیت‌های نسبی تکتونیکی می‌انجامد (رامیرز^۲ و هیرا ۱۹۹۸). این آنالیزها ابزاری سودمند برای تجزیه و تحلیل پدیده‌ها و عارضه‌های موجود در سطح زمین هستند و استفاده هم‌زمان از این شاخص‌ها می‌تواند درک صحیحی از وضعیت شبکه زهکشی،

تعبیرات جبهه کوهستان، بالآمدگی تکتونیک، و ... فراهم سازد (گارنیری^۱ و پیروتا ۲۰۰۸). آنومالی شبکه زهکشی در حوضه آبریز و خصوصیات ریخت‌سنجی شبکه آبراهه‌ها، از جمله تراکم و فراوانی و نسبت انشعاب، در بسیاری از مطالعات برای بررسی تکتونیک فعال استفاده شده است (بهرامی ۲۰۱۳^۲). تجزیه و تحلیل آنومالی و الگوی آبراهه‌ها شواهدی از رشد ساختارهای چین‌خورده در مناطق فعال تکتونیک نشان می‌دهد (بهرامی و همکاران ۲۰۲۰). خصوصیات شبکه آبراهه‌ها در بخش‌هایی از کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس به دلیل فعالیت تکتونیک بالا، با استفاده از مشاهدات صحرایی و تصاویر ماهواره‌ای، مطالعه شده است (بهرامی ۲۰۱۲). این کمربند در نتیجه برخورد صفحه عربی با اوراسیا و بسته شدن اقیانوس نتوتیس و به صورت مجموعه‌ای از چین‌هایی ضخیم‌لایه از رسوبات پالئوزویک تا سنوزویک تشکیل شده است (کاسیلو^۳ و همکاران ۲۰۰۹). شواهدی مانند بالآمدگی تکتونیک، کوتاه‌شدگی تاقدیس‌ها، و وجود زلزله‌های متعدد نشان‌دهنده فعالیت بالای تکتونیک در این کمربند است (حسامی^۴ و همکاران ۲۰۰۶). تاقدیس‌های کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس عموماً به صورت نامتقارن با تمایل به سمت جنوب باختر و راستای شمال باختری-جنوب خاوری شواهدی از فعالیت‌های تکتونیک را نشان می‌دهند. تاقدیس قلاجیه با راستای شمال باختری-جنوب خاوری و با درازای ۸۰ کیلومتری یکی از ساختارهای چین‌خورده در کمربند زاگرس است و رخنمون سطحی این تاقدیس را سازندهای بختیاری، آغاچاری، گچساران، آسماری-شهبازان، پابده، کشکان، تله‌زنگ، امیران، گورپی، امام‌حسن، و ... تشکیل می‌دهند (شکل ۱). تشکیل سه سطح مخروط‌افکنه نشان‌دهنده فعالیت تکتونیک و سه فاز بالآمدگی در دوران کواترنری در راستای این تاقدیس است (مقصودی و همکاران ۱۳۸۸). از نظر اقلیمی، این منطقه در محدوده زاگرس مرطوب واقع شده و فعالیت‌های رودخانه‌ای فرایند غالب شکل‌زایی در منطقه است. همچنین، بر اساس آخرین مطالعات اقلیمی سی‌ساله، میانگین بارش سالیانه ۴۵۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالیانه ۱۸ درجه سانتی‌گراد برای این منطقه به ثبت رسیده است. از این رو این منطقه جزء اقلیم نیمه‌خشک محسوب می‌شود (نگهبان و همکاران ۱۳۹۴). بر اساس مطالعات، پلوویال^۵ (دریاچه بارانی) فرایند غالب مورفودینامیکی و مورفوکلیماتیکی در زمان آخرین دوره یخچالی در این منطقه است. این منطقه در عهد حاضر جزء قلمرو فرایندهای مورفودینامیکی و مورفوکلیماتیکی نیمه‌خشک محسوب می‌شود که بیانگر نقش آب‌های جاری به منزله عامل غالب شکل‌زایی در منطقه است (باقری ۱۳۸۷). در این پژوهش با توجه به اهمیت نقش آب‌های جاری در شکل‌گیری شبکه‌های زهکشی در راستای تاقدیس قلاجیه، با مطالعه کمی و تحلیل سلسله‌مراتبی شبکه آبراهه‌ها، ارزیابی و مقایسه دقیق از فعالیت تکتونیک در یال‌های شمال خاوری و جنوب باختری این ساختار صورت گرفت.

جایگاه ساختاری و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس حاصل برخورد صفحه عربی با اوراسیا و بسته شدن اقیانوس نتوتیس است که با طول تقریبی ۱۸۰۰ کیلومتر به صورت سلسله جبالی روی حاشیه سکوی آرام قاره‌ای عربی تشکیل شده است.

1. Guarnieri
2. Bahrami
3. Casciello
4. Hessami
5. pluvial

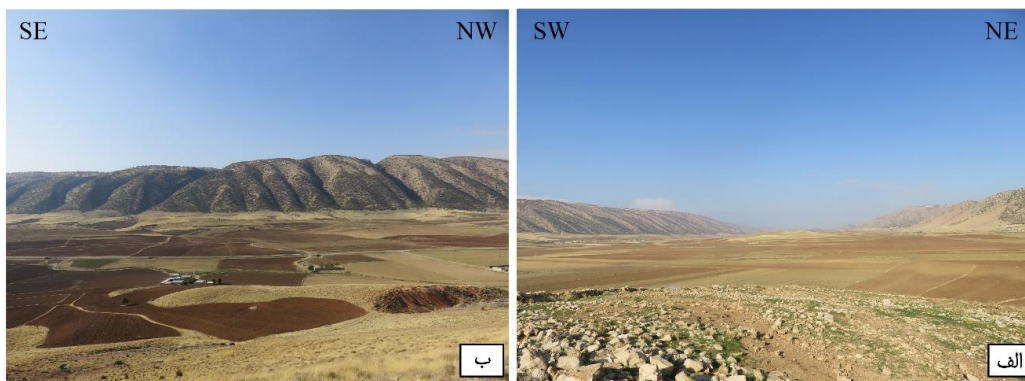


شکل ۱. الف) جایگاه ساختاری منطقه مورد مطالعه در کمربند چین خورده- رانده زاگرس (پیروز و همکاران ۲۰۱۷)؛
ب) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

این کمربند از نظر ساختاری شامل تاقدیس‌ها و ناودیس‌های کوچک و بزرگ است که اکثر این ساختارها روند شمال باختری- جنوب خاوری دارند و اغلب موازی با یک‌دیگرند. علاوه بر ساختارهای فوق راندگی‌هایی هم‌شیب و خلاف شیب فرورانش در این کمربند واقع شده‌اند (کاسیلو و همکاران ۲۰۰۹). در این کمربند، چین خوردگی‌ها و گسل‌هایی که از زمان میوسن شکل گرفته‌اند سبب جدایی و دگرشکلی توالی رسوبات حاشیه آرام ورقه عربی از پی‌سنگ شده‌اند (کالوت و همکاران ۲۰۰۷). دگرشکلی فعال این کمربند دارای ستون رسوبی به ضخامت حدود ۱۲ کیلومتر است که بدون ناپیوستگی خاصی از کامبرین زیرین تا پلیوسن ادامه دارد. در این توالی، قدیمی‌ترین واحد رسوبی، که مربوط به اواخر پروتروزوئیک تا اوایل کامبرین است، نمک هرمز است (کنت ۱۹۷۹). کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس به دلیل تغییرات ضخامت و رخساره پوشش رسوبی به سه زیرپهنه تکتونواستراتیگرافی لرستان و فروافتادگی دزفول و فارس تقسیم شده است. در زیرپهنه لرستان، به دلیل نزدیکی به راندگی زاگرس، شدت چین‌خوردگی در بخش‌های شمال خاوری بیشتر از سایر نواحی است و هندسه چین‌ها توسط راندگی‌ها و سطوح جدایشی کنترل می‌شود. بر اساس ویژگی‌های ساختاری و چینه‌شناسی، این زیرپهنه به سه بخش جنوب باختری و مرکزی و شمال خاوری تقسیم می‌شود. هر چه از سمت جنوب باختری به سمت شمال خاوری پیش می‌رویم رسوبات جوان‌تر می‌شوند (کاسیلو و همکاران ۲۰۰۹). در این زیرپهنه پوشش رسوبی مستقل از پی‌سنگ و روی یک پهنه جدایشی دگرشکل می‌شود و تقابل رئولوژیک قوی بین پی‌سنگ بلورین و پوشش رسوبی فوقانی سطح تماس پی‌سنگ- پوشش رسوبی را به یک سطح جدایش افقی اصلی در منطقه

1. Pirouz
2. Callot
3. Kent

پهنه لرستان تبدیل کرده است. تشکیل متعدد سطوح جدایش در توالی رسوبی باعث تغییر شکل جزئی شده و این سطوح جدایش این تغییر شکل‌ها را از یکدیگر تفکیک کرده و باعث محدود شدن طول بسیاری از گسل‌های منطقه شده است (تاوانی^۱ و همکاران ۲۰۱۸). تاقدیس قلاجه در زیرپهنه لرستان در کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس در محدوده استان‌های کرمانشاه و ایلام واقع شده است (شکل ۲).



شکل ۲. الف) نمای کلی تاقدیس قلاجه (دید به سمت NW)؛ ب) شبکه زهکشی و گسترش آبراه‌های موازی مرتبه اول در یال جنوب باختری تاقدیس قلاجه (دید به سمت SW)

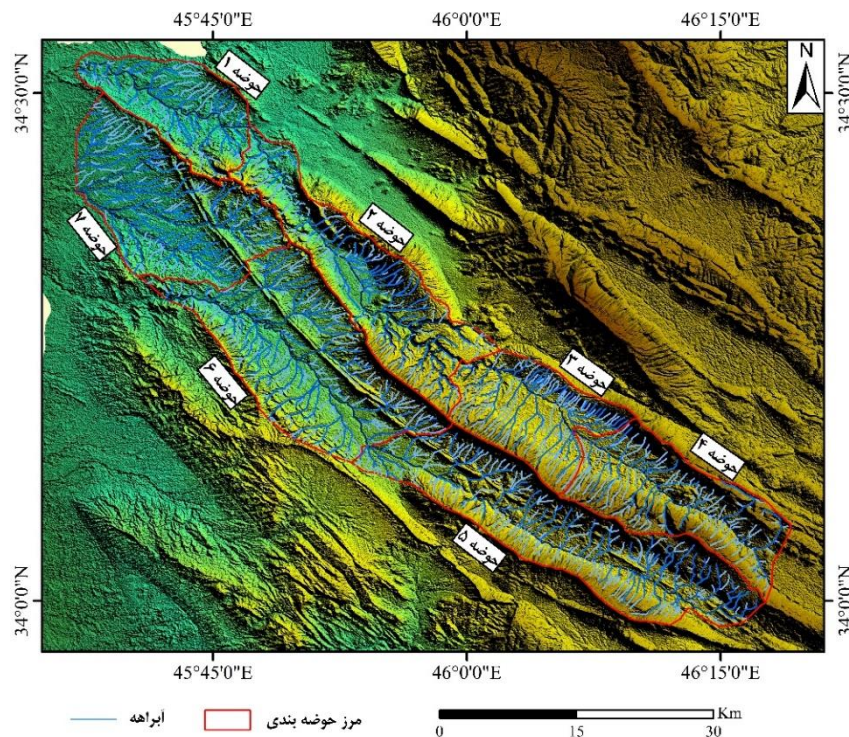
مواد و روش‌ها

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار گوگل ارث^۲ محدوده تاقدیس مورد نظر شناسایی و با استفاده از نقشه رقومی ارتفاعی منطقه^۳ (DEM) و نرم‌افزار GIS شبکه زهکشی منطقه مورد مطالعه استخراج شد. در مرحله بعد آبراه‌ها به روش استرالر رتبه‌بندی و مرتبه و طول هر یک از آبراه‌های منطقه مشخص شد. با استفاده از خصوصیات زمین‌شناسی منطقه، از جمله شیب توپوگرافی و شیب لایه‌بندی و ... تاقدیس مورد نظر به ۷ حوضه مجزا تقسیم شد. پس از مراحل فوق، شاخص‌های مرتبط با حوضه آبریز (شبکه زهکشی) (ناهنجاری سلسله‌مراتبی (Δa))، شاخص تراکم شبکه زهکشی (Dd)، شاخص فراوانی شبکه زهکشی (Df)، شاخص انشعابات (R)، شاخص نسبت کل انشعابات (Rb)، شاخص نسبت مستقیم انشعابات (Rbd)، میانگین طول آبراه‌های مرتبه اول (LNI) و شاخص‌های مرتبط با شکل حوضه (نسبت شکل حوضه (BS))، شاخص میانگین شکل حوضه (Bl/Bmw)، شاخص درصد عدم تقارن آبراه‌ها در حوضه آبریز (PAF)، شاخص انحنای شکل رود (CI)، شاخص فاصله مرکز حوضه تا محور تاقدیس (Hs)، شاخص منحنی هیپسومتریک (Hi) برای هر یک از حوضه‌ها به صورت مجزا محاسبه شد و نتایج در نرم‌افزار Spss مورد تجزیه و تحلیل کمی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل هر یک از شاخص‌های یادشده برای هر حوضه، به مثابه بیانگرهای اجزای سیستم‌های ژئومورفیک، می‌تواند ما را در شناخت رفتارهای زمین‌ساختی حوضه‌ها یاری کند.

1. Tavani
2. Google Earth
3. Digital Elevation Model

بحث

رودخانه‌های عمیقاً حفرشده، اشکال مثلث‌شکل با قاعدهٔ طویل، دره‌های ساغری‌شکل با دهانهٔ خروجی باریک، وجود هواچاک‌ها و آب‌چاک‌ها، و شبکه‌های زهکشی چندشاخهٔ نامتقارن از نشانه‌های زمین‌ریختی تکتونیک فعال در تاقدیس‌های زاگرس هستند (برتیس^۱ و همکاران ۲۰۱۲). کوه‌های زاگرس از نظر تکتونیک بسیار فعال‌اند. اما میزان این فعالیت در همهٔ قسمت‌های آن یکسان نیست و میزان کوتاه‌شدگی و بالآمدگی در قسمت‌های مختلف زاگرس متفاوت است (حسامی و همکاران ۲۰۰۶). میزان بالآمدگی و کوتاه‌شدگی داخل هر تاقدیس نیز متفاوت است (بهرامی ۲۰۱۳). همچنین چین‌های زاگرس در اندازه و هندسه با یک‌دیگر تفاوت‌هایی دارند (سپهرآ و همکاران ۲۰۰۶). این تغییرات سبب ایجاد تفاوت‌هایی در مقادیر شاخص‌های مورفومتریک در مناطق مختلف می‌شوند. تاقدیس قلاجه یکی از ساختارهای مهم کمربند چین‌خورده- راندهٔ زاگرس و نمونه‌ای از ساختارهای بالآمده و فعال تکتونیک در این کمربند است. به منظور بررسی تأثیر تکتونیک فعال بر اشکال ژئومورفیک و ارتباط آن با ناهنجاری سلسله‌مراتبی سیستم‌های زهکشی در تاقدیس قلاجه، این تاقدیس به ۷ حوضهٔ تکتونیک مجزا تقسیم شد. حوضه‌های ۱ تا ۴ در یال شمال خاوری و حوضه‌های ۵ تا ۷ در یال جنوب باختری واقع شده‌اند (شکل ۳).



شکل ۳. نقشهٔ شبکهٔ آبراهه‌ها و حوضه‌بندی تاقدیس قلاجه

1. Bretis
2. Sephr

شاخص‌های مرتبط با حوضه آبریز (شبکه زهکشی)

ناهنجاری سلسله‌مراتبی (Δa)

این شاخص در مقابل اثر فعالیت‌های تکتونیکی بسیار حساس است و عبارت است از تعداد ناهنجاری‌های سلسله‌مراتبی آبراهه‌های کل حوضه به تعداد آبراهه‌های واقعی مرتبه اول موجود در یک حوضه زهکشی ($\Delta a = \text{Hat}/N1$) (گارنیری و پیروتا ۲۰۰۸). در حالت کلی، هر چه مقدار شاخص فوق بیشتر باشد بیانگر فعالیت تکتونیکی بالاتر در آن حوضه است. مقادیر شاخص‌های Δa و Hat در جدول ۱ آمده است که طبق آن برای هر حوضه مقادیر متفاوت Hat به دست آمد. بر این اساس، کمترین مقدار آن ۱۹۱ در حوضه ۳ و ۷ و بیشترین مقدار آن ۵۲۷ در حوضه ۵ است. جدول ۱ نشان می‌دهد در حوضه‌هایی با مقادیر Hat بالاتر تعداد آبراهه‌هایی با مرتبه پایین (یعنی ۱) که به مرتبه بالاتر (یعنی ۴ یا ۵) متصل می‌شوند به طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر است. مثلاً در حوضه ۵ تعداد آبراهه‌های مرتبه اول، که به مرتبه پنجم متصل می‌شوند، ۴۳ عدد است؛ در حالی که در حوضه‌های ۶ و ۷ با مقدار Hat پایین‌تر این تعداد به ترتیب ۲۴ و ۸ است. جدول ۱ همچنین مقادیر شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی (Δa) را در حوضه‌های آبریز نشان می‌دهد که میزان این شاخص از مقدار ۲/۰۵۳ در حوضه ۷ تا ۴/۶۰ در حوضه ۲ متغیر است.

جدول ۱. مقادیر شاخص‌های Δa و Hat و اتصالات آبراهه‌های هر شبکه زهکشی در منطقه مورد مطالعه

i - j	A (H_{a-j})	Basin 1		Basin 2		Basin 3		Basin 4		Basin 5		Basin 6		Basin 7	
		B (N_{st-j})	A×B	B	A×B	B	A×B	B	A×B	B	A×B	B	A×B	B	A×B
1_2	0	35	0	49	0	51	0	41	0	83	0	88	0	40	0
1_3	1	9	9	13	13	13	13	12	12	27	27	30	30	38	38
1_4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	7	21	3	9	7	21
1_5	7	16	112	41	287	10	70	17	119	43	301	24	168	8	56
2_3	0	10	0	15	0	11	0	3	0	16	0	32	0	36	0
2_4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	6	9	18
2_5	6	18	108	23	138	14	84	18	108	26	156	10	60	7	42
3_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	9	0	14	0
3_5	4	6	24	9	36	6	24	3	12	5	20	9	36	4	16
4_5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	4	0	4	0	4	0
		Hat=253 $\Delta a=4.21$		Hat=474 $\Delta a=4.60$		Hat=191 $\Delta a=2.58$		Hat=251 $\Delta a=3.58$		Hat=527 $\Delta a=3.29$		Hat=309 $\Delta a=2.13$		Hat=191 $\Delta a=2.053$	

شاخص انشعابات (R)

این شاخص از اختلاف بین شاخص‌های نسبت انشعابات (Rb) و نسبت مستقیم انشعابات (Rbd) برای هر حوضه به دست می‌آید (استرالر ۱۹۵۲). شاخص R به وجود آنومالی سلسله‌مراتبی در سیستم شبکه زهکشی بستگی دارد و برای تعیین آنومالی سیستم زهکشی به کار می‌رود و می‌تواند اطلاعات مفیدی درباره نوع فرایندهای فرسایشی و تکتونیک فعال و درجه تکامل یک حوضه بدهد (گارنیری و پیروتا ۲۰۰۸). با افزایش فعالیت‌های تکتونیکی در یک منطقه، مقدار این شاخص نیز افزایش می‌یابد (بهرامی ۲۰۱۳). مقادیر عددی محاسبه‌شده این شاخص در جدول ۲ آمده است. طبق جدول ۲ بیشترین مقدار محاسبه‌شده برای این شاخص متعلق به حوضه ۴ در یال شمال خاوری و کمترین میزان آن مربوط به حوضه‌های ۶ و ۷ در یال جنوب باختری است.

شاخص نسبت انشعابات (Rb)

شاخص نسبت انشعابات یک شاخص تخریبی و کمی است که نتیجه تکامل شبکه آبراهه‌ها با درجات مختلف است. این شاخص، که با رابطه $(Rb=Nu/Nu+1)$ محاسبه می‌شود، به علت تغییرات هندسی هر حوضه آبریز از مرتبه‌ای به مرتبه‌ای دیگر یکسان نیست (آبدیده و همکاران ۱۳۹۰). مقادیر بالای این شاخص در هر حوضه بیانگر فعالیت تکتونیکی و آشفته‌گی ساختاری بالا در آن حوضه است (گارنیری و پیروتا ۲۰۰۸). مقادیر این شاخص به طور مستقیم مقادیر شاخص R را کنترل می‌کنند و با افزایش یا کاهش مقادیر این شاخص مقدار شاخص R نیز افزایش یا کاهش می‌یابد. مقادیر محاسبه‌شده این شاخص در جدول ۲ آمده است.

شاخص نسبت مستقیم انشعابات (Rbd)

این شاخص، که از شاخص‌های بیانگر فعالیت تکتونیکی است، از نسبت تعداد آبراهه‌های هر درجه، که به آبراهه‌ای با درجه بالاتر می‌ریزند، به تعداد کل آبراهه‌های درجه بالاتر محاسبه می‌شود $(Rbd=Ndu/Ndu+1)$. در حوضه‌های فعال تکتونیکی مقدار شاخص Rbd بیشتر از سایر مناطق است (بهرامی ۲۰۱۲).

جدول ۲. مقادیر شاخص‌های R, Rb, Rbd برای هر حوضه در منطقه مورد مطالعه

حوضه	R	Rb	Rbd
۱	۲.۶۱	۴.۴۵	۱.۸۳
۲	۱.۷	۳.۱۷	۱.۴۷
۳	۱.۸۴	۳.۷	۱.۸۶
۴	۳.۶۸	۵.۵۱	۱.۸۲
۵	۱.۹۳	۴.۳۶	۲.۴۳
۶	۱.۲۶	۳.۸۵	۲.۵۹
۷	۱.۴۶	۳.۵۲	۲.۰۳

شاخص تراکم شبکه زهکشی (Dd)

شاخص Dd از شاخص‌های مهم مورفومتریک برای بررسی شبکه‌های زهکشی و منعکس‌کننده فرایندهای سطحی، مانند فرسایش، است و با عوامل مختلف، مانند وضعیت آب‌وهوایی و لیتولوژی و پوشش گیاهی، ارتباط دارد. همچنین این شاخص از نشانه‌های بیانگر فعالیت تکتونیکی در منطقه است (دوی و همکاران ۲۰۱۱). مقادیر این شاخص می‌تواند برای بررسی میزان بالآمدگی سریع و رشد جانبی تاق‌دیس استفاده شود (کلر^۱ و پینتر ۲۰۰۲؛ ملوش^۳ و کلر ۲۰۱۳). این شاخص در واقع نسبت طول کل آبراهه‌های هر حوضه به مساحت همان حوضه زهکشی است که هر چه این مقدار بیشتر

1. Devi
2. Keller
3. Melosh

باشد فعالیت تکتونیکی در حوضه مورد نظر نیز بیشتر است (بهرامی ۲۰۱۳). مقادیر تراکم شبکه زهکشی (Dd) در حوضه‌های آبریز از ۱/۲۸ (در حوضه ۴) تا ۱/۴ (در حوضه ۶) متفاوت است (جدول ۳).

شاخص فراوانی شبکه زهکشی (Df)

شاخص فراوانی شبکه زهکشی نیز مانند شاخص تراکم شبکه زهکشی از شاخص‌های مهم مورفومتریکی شبکه‌های زهکشی است. این شاخص، علاوه بر فعالیت تکتونیکی منطقه، به نفوذپذیری سنگ‌ها و پوشش گیاهی منطقه وابسته است (اوزدمیر و برد ۲۰۰۹). مقدار این شاخص برابر است با تعداد کل آبراهه‌های هر حوضه به مساحت همان حوضه زهکشی (هورتون^۲ ۱۹۳۳). در حوضه‌هایی که فعالیت تکتونیکی در آن‌ها بالاتر است، مقادیر شاخص فراوانی شبکه زهکشی نیز افزایش می‌یابد (بهرامی ۲۰۱۳). مقادیر شاخص فراوانی شبکه زهکشی (Df) در جدول ۳ آمده است. جدول ۳ نشان می‌دهد که مقادیر شاخص تراکم شبکه زهکشی با مقادیر شاخص فراوانی شبکه زهکشی در حالت کلی یک رابطه مستقیم دارند؛ بدین معنا که در حوضه‌هایی که مقدار شاخص تراکم زهکشی بیشتر است مقادیر شاخص فراوانی شبکه زهکشی نیز بیشتر می‌شود.

شاخص میانگین طول آبراهه‌های مرتبه اول (LN1)

از شاخص‌هایی که می‌تواند بیانگر حرکات تکتونیکی در یک حوضه باشد شاخص میانگین طول آبراهه‌های مرتبه اول است که عبارت است از مجموع طول آبراهه‌های مرتبه اول ($\sum L1$) به تعداد آبراهه‌های درجه یک در هر حوضه (N1) که با رابطه $LN1 = \sum L1 / N1$ محاسبه می‌شود. هر چه مقدار این شاخص بزرگ‌تر باشد بیانگر تکتونیک فعال‌تر در آن منطقه است. همچنین در مناطقی با بالآمدگی سریع تعداد آبراهه‌های درجه یک بیشتر است (زویویچ^۳ ۱۹۸۸). مقادیر این شاخص در حوضه‌های مورد مطالعه بیانگر این موضوع است که بیشترین میزان این شاخص مربوط به حوضه ۳ و کمترین میزان آن متعلق به حوضه‌های ۶ و ۷ است (جدول ۳).

جدول ۳. مقادیر شاخص‌های Dd, Df, LN1 برای هر حوضه در منطقه مورد مطالعه

حوضه	Dd	Df	LN1
۱	۱.۲۹	.۸۲	۱
۲	۱.۲۸	.۷۷	.۹۴
۳	۱.۴۰	.۸	۱.۴۹
۴	۱.۳۰	.۷۴	۱.۳۵
۵	۱.۳۵	.۷۹	۱.۱۵
۶	۱.۳۵	.۸۲	۱.۰۲
۷	۱.۲۹	.۷۹	۱.۰۲

1. Ozdemir
2. Horton
3. Zuchiewicz

شاخص‌های مرتبط با شکل حوضه

شاخص درصد عدم تقارن حوضه (PAF)

این شاخص یکی از روش‌های تشخیص کج‌شدگی ناشی از فعالیت تکتونیکی در منطقه است. این شاخص به میزان فعالیت‌های تکتونیکی و فرسایشی یک منطقه وابسته است (همدونی^۱ و همکاران ۲۰۰۸). شاخص درصد عدم تقارن حوضه مقدار کج‌شدگی حوضه‌ها را به سمت چپ یا راست نمایش نمی‌دهد؛ بلکه فقط درصد کج‌شدگی حوضه‌ها را نشان می‌دهد و با رابطه $PAF = (Ar/At)100$ به دست می‌آید (بهرامی ۲۰۱۳). در این رابطه Ar مساحت قسمت بزرگ‌تر حوضه آبریز و At مساحت کل حوضه آبریز است. مقادیر این شاخص از ۵۰ تا ۱۰۰ درصد متغیر است. مقادیر PAF نزدیک به ۵۰ درصد بیانگر آن است که هیچ کج‌شدگی در حوضه‌ها مشاهده نمی‌شود و رودخانه در حالت تعادل و پایدار قرار دارد. هر چه این مقدار عددی بزرگ‌تر باشد و به عدد ۱۰۰ نزدیک‌تر شود بیانگر فعالیت تکتونیکی بالاتر در منطقه است (بهرامی ۲۰۱۳). نتایج نشان داد مقادیر شاخص PAF از بازه ۵۰/۷۱ تا ۶۵/۶۰ درصد متغیر است (جدول ۴) که کمترین مقدار این شاخص مربوط به حوضه ۴ با مقدار ۵۰/۷۱ درصد و بیشترین مقدار این شاخص مربوط به حوضه ۳ با مقدار ۶۵/۶۰ درصد است. با توجه به میزان محاسبه‌شده شاخص PAF در حوضه ۴، این حوضه کمترین میزان کج‌شدگی و عدم تقارن را دارد و تقریباً در حالت تعادل و پایدار است. اما حوضه‌های ۵ و ۶ و ۷ در یال جنوب باختری و حوضه ۳ در یال شمال خاوری بیشترین کج‌شدگی و عدم تقارن را دارند که بیانگر فعالیت تکتونیکی بالا در این حوضه‌هاست.

جدول ۴. مقادیر شاخص درصد عدم تقارن (PAF) در منطقه مورد مطالعه

حوضه	Ar (Km ²)	At (Km ²)	PAF (%)
۱	۷۲.۷۷	۱۲۰.۲۴	۶۰.۵۲
۲	۱۱۳.۳۹	۲۰۷.۰۶	۵۴.۷۴
۳	۸۸.۷۲	۱۳۵.۲۴	۶۵.۶۰
۴	۸۹.۱۱	۱۷۵.۷۵	۵۰.۷۱
۵	۱۸۰.۰۲	۲۸۱.۴۲	۶۳.۹۷
۶	۱۷۴.۰۹	۲۸۹.۰۸	۶۰.۲۲
۷	۱۴۲.۲	۲۲۳.۵۷	۶۳.۶۰

شاخص نسبت شکل حوضه (BS)

این شاخص بیانگر نسبت کشیدگی و توصیف‌کننده شکل هندسی حوضه است و می‌تواند اطلاعاتی درباره سطح و نوع فعالیت تکتونیکی بدهد و با رابطه $BS = BL/BW$ محاسبه می‌شود. حوضه‌هایی که از نظر تکتونیکی فعالیت بالاتری دارند شکل کشیده‌تری نسبت به سایر حوضه‌ها دارند. حوضه در طول زمان با توقف میزان بالآمدگی و بالا رفتن میزان فرسایش و عدم فعالیت تکتونیکی به تدریج شکل مدور و دایره‌ای به خود می‌گیرد و مقدار این شاخص به عدد ۱ نزدیک می‌شود (رامیرز و هیرا

۱۹۹۸؛ فقیه^۱ و همکاران (۲۰۱۲). میزان شاخص شکل حوضه (BS) در میان حوضه‌های زهکشی بسیار متغیر است. بالاترین مقدار شاخص BS مربوط به حوضه آبریز ۵ است که طول آن ۳/۲۹ برابر بیش از حداکثر عرض آن است و پایین‌ترین مقدار شاخص BS مربوط به حوضه زهکشی ۳ است که طول آن ۱/۲۸ برابر حداکثر عرض آن است (جدول ۵). حوضه‌های ۴ و ۲ نیز دارای مقادیر بالای BS هستند که نشان‌دهنده حوضه‌های کشیده است. حوضه ۷ به علت اینکه تحت تأثیر نیروی فرسایشی شدید قرار گرفته است شکل هندسی دایره‌ای و پهن را نمایش می‌دهد که بیانگر میزان فعالیت تکتونیکی پایین در این حوضه است. اما میزان فعالیت تکتونیکی در حوضه ۵ بیش از سایر حوضه‌هاست. به همین دلیل شکلی کشیده و طویل دارد. مقادیر پایین شاخص BS در حوضه‌های زهکشی شماره ۱ و ۳ و ۷ نشان‌دهنده شکل نسبتاً دایره‌ای این حوضه‌هاست.

شاخص نسبت طول حوضه زهکشی به میانگین عرض آن (Bl/Bmw)

با توجه به طول موج و طول چین‌های زاگرس، پهنای حوضه‌ها تا حد زیادی متغیر است و به نظر می‌رسد BW نمی‌تواند پارامتر مناسبی برای پهنای حوضه‌ها در منطقه زاگرس باشد. بنابراین از شاخص نسبت طول حوضه به میانگین پهنای حوضه BL/BMW استفاده شد؛ که BL بیشترین طول حوضه آبریز و BMW میانگین پهنای حوضه است (بهرامی ۲۰۲۰). بررسی شاخص نسبت طول حوضه زهکشی به میانگین عرض آن (Bl/Bmw) نیز نشان می‌دهد حوضه ۵ بیشترین مقدار این شاخص (۴/۳۹) و حوضه ۳ کمترین مقدار این شاخص (۱/۳۲) را دارد (جدول ۵). مقادیر پایین شاخص Bl/Bmw بیانگر شکل تقریباً دایره‌ای حوضه‌ها و مقادیر بالاتر این شاخص بیانگر کشیدگی و طویل بودن حوضه‌هاست که این موضوع ارتباط مستقیم و مثبت بین شاخص‌های Bs و Bmw را نمایش می‌دهد.

جدول ۵. مقادیر شاخص شکل حوضه و شاخص نسبت طول حوضه زهکشی به میانگین عرض آن در منطقه مورد مطالعه

حوضه	BS	Bl/Bmw
۱	۲.۲۱	۲.۵۵
۲	۳.۳۰	۴.۱۷
۳	۱.۲۸	۱.۳۲
۴	۲.۵۲	۲.۵۲
۵	۳.۲۹	۴.۳۹
۶	۱.۷۸	۱.۸۶
۷	۱.۵۹	۲.۱۱

شاخص فاصله مرکز حوضه تا محور تاقدیس (Hs)

این شاخص یکی دیگر از شاخص‌هایی است که برای بررسی فعالیت تکتونیکی در حوضه‌های سیستم زهکشی به کار

می‌رود. این شاخص، که با چند خط عمود بر محور تاقدیس از مرکز حوضه زهکشی مشخص می‌شود، بیانگر تکتونیک فعال و رشد جانبی تاقدیس‌هاست که به طور مستقیم با روند و محور تاقدیس‌ها مرتبط است. شاخص H_s با میزان فعالیت تکتونیک در منطقه نسبت عکس دارد؛ به عبارت دیگر هر چه میزان این شاخص در اثر کج‌شدگی و رشد جانبی تاقدیس بیشتر باشد مقدار ناهنجاری شبکه زهکشی کمتر می‌شود و در نتیجه فعالیت تکتونیک نیز کاهش می‌یابد (بهرامی ۲۰۱۲). مقادیر شاخص فاصله مرکز حوضه تا محور تاقدیس (H_s) از $3/70$ کیلومتر در حوضه ۲ تا $5/71$ کیلومتر در حوضه ۷ متغیر است. در این پژوهش میزان میانگین این شاخص در یال جنوب باختری بیشتر از یال شمال خاوری است که علت آن وجود حوضه‌های به‌شدت فرسایش‌یافته ۶ و ۷ است که مقادیر بسیار بالایی را نشان می‌دهند. این مقادیر بالا بیانگر فعالیت تکتونیک پایین در این دو حوضه است (جدول ۶).

شاخص انتگرال هیپسومتری (H_i)

این شاخص در مطالعات فرایندهای فرسایشی و ناپایداری دامنه‌ها و مطالعات تکتونیک فعال کاربرد گسترده‌ای دارد. این شاخص، که با رابطه $H_i = (H_{mean} - H_{min}) / (H_{max} - H_{min})$ محاسبه می‌شود، یکی از شاخص‌های مهم برای شناسایی مناطق فعال و غیرفعال تکتونیک است (کلر و پینتر ۱۹۹۶). مقادیر بالای این شاخص بیانگر توپوگرافی بالا و جوان و مقادیر پایین بیانگر حوضه‌های بالغ و پیر است که فرسایش بر آن‌ها تأثیر فراوان گذاشته است. بر این اساس مقادیر این شاخص در سه رده طبقه‌بندی می‌شود (همدون و همکاران ۲۰۰۸)؛ رده ۱ ($H_i > 0.5$) فعالیت بالا، رده ۲ ($0.4 < H_i < 0.5$) فعالیت متوسط، رده ۳ ($H_i < 0.4$) فعالیت کم. مقادیر محاسبه‌شده این شاخص برای حوضه‌های زهکشی منطقه مورد مطالعه در جدول ۶ آمده است. جدول ۶ نشان می‌دهد که همه حوضه‌ها در دو رده فعالیت زمین‌ساختی متوسط و فعالیت زمین‌ساختی پایین قرار می‌گیرند. بر این اساس تنها حوضه ۴ با میزان $0/42$ در رده فعالیت زمین‌ساختی متوسط قرار دارد و سایر حوضه‌ها در رده فعالیت کم زمین‌ساختی طبقه‌بندی می‌شوند.

شاخص انحنا شکل رود (CI)

شاخص انحنا شکل رود بیانگر تطابق شکل حوضه‌ها با رشد قائم و جانبی (طولی) تاقدیس‌هاست و با رابطه $CI = LBM/SL$ قابل محاسبه است. مقادیر بالای شاخص CI (نزدیک $1/5$) بیانگر حوضه‌هایی است که به صورت منحنی و دارای بیشترین انحنا هستند و مقادیر کمتر این شاخص (نزدیک به ۱) بیانگر حوضه‌های کشیده و صاف با حداقل انحناست. بنابراین مقادیر بالای این شاخص مقدار بالای رشد جانبی چین را نمایش می‌دهد (بهرامی ۲۰۲۰). مقادیر این شاخص در جدول ۶ آمده است. بیشترین مقدار این شاخص مربوط به حوضه ۷ است که میزان انحنا بیشتر این حوضه را نشان می‌دهد و حوضه‌های ۲ و ۳ و ۶ دارای کمترین میزان انحنا حوضه‌اند و در نتیجه مقادیر عددی این شاخص برای حوضه‌های یادشده پایین است.

جدول ۶. مقادیر شاخص های HS, Hi, CI در منطقه مورد مطالعه

حوضه	HS (Km)	Hi	CI
۱	۴.۲۷	./۲۵	۱.۰۵
۲	۳.۷	./۳۵	۱.۰۱
۳	۵.۱۴	./۴	۱.۰۱
۴	۵.۲۸	./۴۲	۱.۰۲
۵	۴.۲۸	./۳۹	۱.۰۴
۶	۵.۵۳	./۲۸	۱.۰۱
۷	۵.۷۱	./۲۶	۱.۰۶

ضریب همبستگی پیرسون (r) در سطوح معنادار آماری (0.05 و 0.01) برای پارامترهای مورفومتریک در جدول ۷ آمده است. همبستگی مثبت و قوی بین شاخص های BS-BI/Bmw ($r=0.968, p<0.01$) و یک همبستگی مثبت خوب بین جفت شاخص های R-Rb ($r=0.887, p<0.01$) وجود دارد. اما در جدول ۷ همبستگی منفی قوی بین زوج شاخص های R-Df ($r=-0.867, p<0.05$) و در نهایت یک همبستگی منفی خوب بین شاخص های Δa - Hs ($r=-0.874, p<0.05$) دیده می شود. با توجه به نتایج جدول ۷ تطابق معناداری در سطح آماری بین سایر شاخص های فوق دیده نمی شود. گفتنی است تطابق آماری نشان می دهد که با افزایش یا کاهش میزان یک متغیر (شاخص) چه تأثیری روی متغیر دیگر پدید می آید و به معنی ارتباط مستقیم این دو متغیر با یکدیگر نیست. چون عوامل متعددی روی این متغیرها تأثیر گذارند.

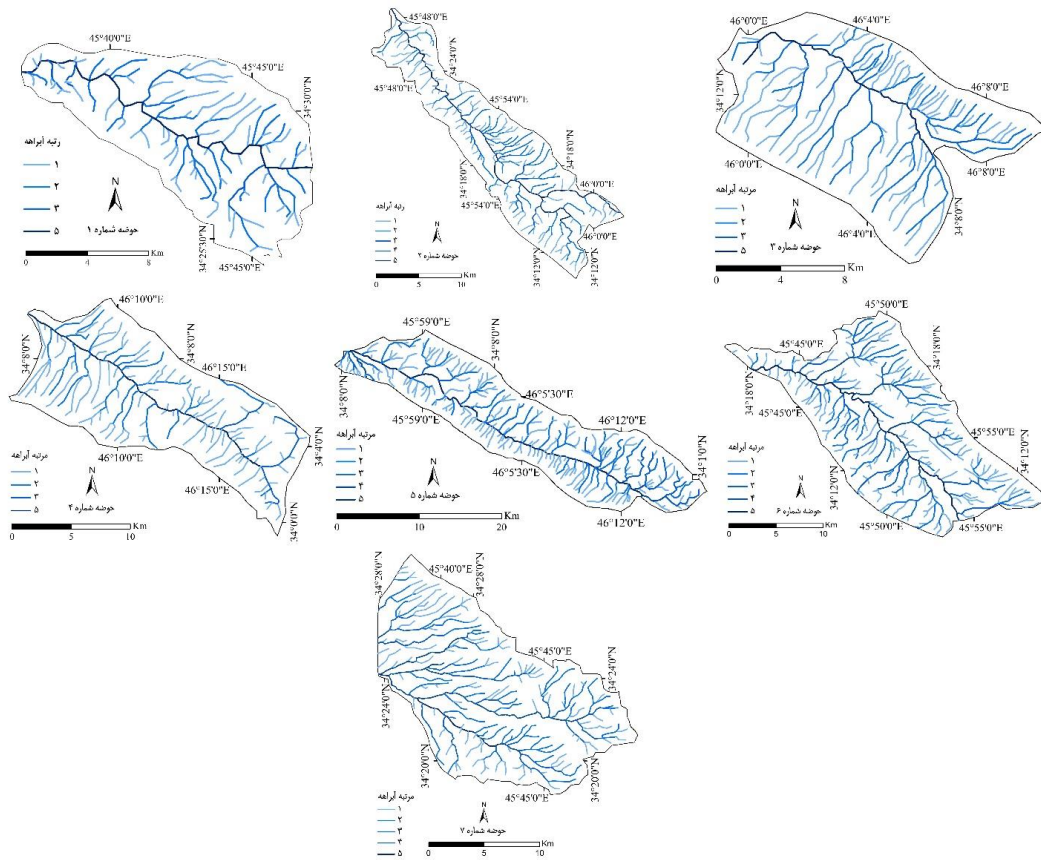
جدول ۷. مقادیر ضریب همبستگی پارامترهای مورفومتریک

	Δa	Dd	Df	Rb	R	PAF	BS	BI/Bmw	HS	CI	HI	LN1
Δa	1											
Dd	-0.518	1										
Df	-0.685	0.618	1									
Rb	0.171	-0.074	-0.599	1								
R	0.471	-0.280	-.867*	.887**	1							
PAF	-0.552	0.588	0.745	-0.456	-0.633	1						
BS	0.727	-0.408	-0.454	0.149	0.222	-0.456	1					
BI/Bmw	0.638	-0.381	-0.316	-0.024	0.036	-0.252	.968**	1				
HS	-.874*	0.271	0.308	0.155	-0.066	0.178	-.979	-.986	1			
CI	0.057	-0.445	-0.161	0.143	0.111	0.305	-0.051	0.056	-0.026	1		
HI	0.180	0.402	-0.347	0.367	0.431	-0.265	0.325	0.228	-0.147	-0.592	1	
LN1	-0.236	0.658	-0.122	0.412	0.414	0.085	-0.344	-0.423	0.331	-0.374	0.744	1

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

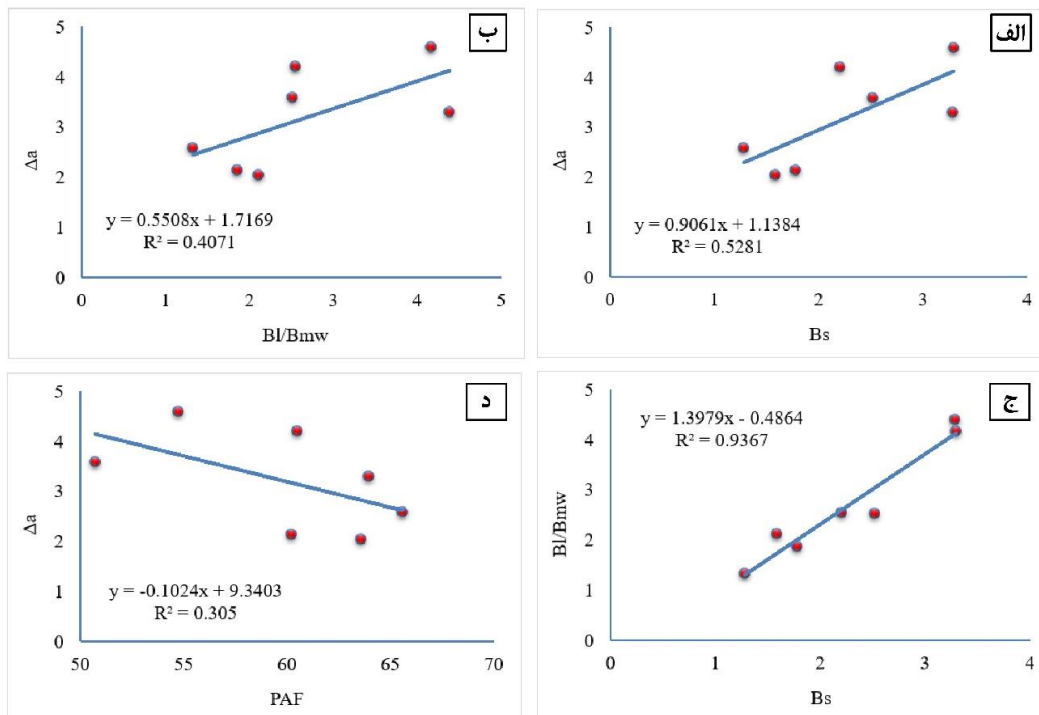
نقشه زهکشی حوضه های منطقه مورد مطالعه این موضوع را بیان می دارد که اختلاف بسیاری در الگوی زهکشی حوضه های آبریز مشاهده می شود (شکل ۴). در بیشتر حوضه ها، به خصوص حوضه های کشیده و طولیل، آبراهه های اصلی و عمیق در امتداد محور تاقدیس جریان می یابند؛ در حالی که سایر آبراهه ها به صورت عمود بر محور چین جریان می یابند.



شکل ۴. نقشه شبکه زهکشی و الگوی آبراهه در حوضه‌های منطقه مورد مطالعه

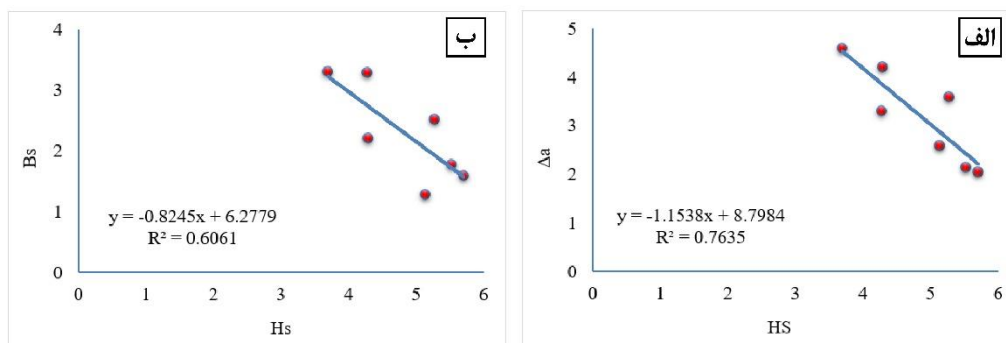
بررسی الگوی شبکه زهکشی تأقدیس مورد مطالعه سه دسته الگوی زهکشی را در حوضه‌های این تأقدیس مشخص می‌کند. دسته اول الگوی زهکشی شاخه‌ای (درختی) است که معمولاً در حوضه‌های عریض یا دایره‌شکل مشاهده می‌شوند (حوضه‌های ۱، ۴، ۶، ۷). دسته دوم الگوی زهکشی موازی است که معمولاً در حوضه‌های طولی و باریک، مانند حوضه‌های ۵ و ۲، دیده می‌شوند. دسته سوم الگوی زهکشی موازی-داربستی است که تلفیقی از الگوی زهکشی موازی و داربستی است؛ به عبارت دیگر در قسمتی از حوضه شبکه زهکشی از الگوی موازی پیروی می‌کند و در قسمتی از الگوی داربستی (حوضه ۴). تغییرات در هندسه چین‌ها و بالآمدگی منطقه مورد مطالعه باعث بروز تفاوت‌های قابل توجه در الگوی شبکه زهکشی و ناهنجاری آبراهه‌ها می‌شود. مثلاً در حوضه‌های باریک و کشیده، که در دامنه‌های پرشیب تأقدیس‌ها قرار دارند (حوضه‌های ۴ و ۵)، الگوهای زهکشی موازی و داربستی گسترش یافته‌اند و از این رو تعداد ناهنجاری سلسله‌مراتبی افزایش یافته و در نتیجه آن مقدار Δa نیز بالا رفته است. از سوی دیگر الگوهای شاخه‌ای (درختی) در حوضه‌های نسبتاً دایره‌شکل (حوضه‌های ۴ و ۶ و ۷) ایجاد می‌شوند که باعث کاهش ناهنجاری سلسله‌مراتبی سیستم زهکشی می‌شوند. در حوضه‌های طولی ناهنجاری زهکشی حوضه‌ها با افزایش طول حوضه افزایش می‌یابد که این موضوع کنترل شکل هندسی حوضه روی ناهنجاری زهکشی را می‌رساند و به وسیله یک نمودار مستقیم و رابطه خطی بین Δa -Bs و Δa -Bl/Bmw نمایش داده می‌شود (شکل ۵ الف و ۵ ب). همچنین با توجه به نمودار Bl/Bmw-

BS می‌توان به این نتیجه رسید که میزان این دو شاخص، که به شکل ظاهری حوضه زهکشی مربوط است، به شدت با یکدیگر ارتباط مستقیم دارند (شکل ۵ ج). تفاوت میزان برخاستگی چین‌ها باعث کج‌شدگی حوضه‌های تاقدیس‌ها می‌شود. بررسی ارتفاع تاقدیس منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد در بیشتر موارد قسمت‌های شمال خاوری برخاستگی بیشتری نسبت به سایر مناطق دارد که دلیل آن قدیمی‌تر بودن این مناطق است. حوضه‌های قدیمی‌تر و با برخاستگی بیشتر در قسمت شمال خاوری باعث شده‌اند رودخانه اصلی تاقدیس به سمت جنوب باختر (مناطق جوان‌تر) حرکت کند. این جابه‌جایی مسیر اصلی رودخانه سبب می‌شود آبراهه‌های مرتبه پایین‌تر (۱) حوضه‌های مناطق جوان‌تر به رودخانه اصلی جاری شوند و در نتیجه باعث افزایش مقدار شاخص Δa در مناطق جوان‌تر می‌شود. مقادیر متفاوت برخاستگی در قسمت‌های مختلف تاقدیس باعث عدم تقارن حوضه‌های زهکشی می‌شود و در نتیجه آن آبراهه‌های با مرتبه پایین‌تر به آبراهه‌های با مراتب بالاتر جاری می‌شوند و در نهایت میزان شاخص Δa افزایش می‌یابد. همچنین ناهنجاری زهکشی حوضه‌ها تحت تأثیر کج‌شدگی حوضه‌هاست؛ طوری که Δa با افزایش عدم تقارن حوضه‌ها (PAF) افزایش می‌یابد. اما در این تاقدیس، به دلیل اثر فعالیت‌های فرسایشی شدید در حوضه‌های ۶ و ۷، این رابطه معکوس است (شکل ۵ د). تفاوت در روند و محور تاقدیس‌ها به شدت شکل حوضه‌ها و ناهنجاری سلسله‌مراتبی آن‌ها را کنترل می‌کند (بهرامی ۲۰۱۲). در برخی حوضه‌ها قسمت بالادست یا پایین‌دست حوضه‌ها، که در مسیر رودخانه اصلی قرار دارند، باریک یا پهن می‌شوند. این تغییرات وابسته به تغییر روند محور تاقدیس است. در حوضه‌هایی که در قسمت پایین‌دست مسیر رودخانه اصلی پهن‌تر می‌شود اتصال آبراهه‌های مرتبه پایین‌تر به آبراهه‌های مرتبه بالاتر (مثلاً ۵ - ۱ یا ۴ - ۱) کمتر رخ می‌دهد. در نتیجه مقدار عددی ناهنجاری سلسله‌مراتبی حوضه زهکشی (Δa) پایین است. اما در حوضه‌هایی که در قسمت پایین‌دست مسیر رودخانه باریک‌تر می‌شود اتصال آبراهه‌های مرتبه پایین‌تر به آبراهه‌های مراتب بالاتر (مثلاً ۵ - ۱ یا ۴ - ۱) بیشتر دیده می‌شود که در نتیجه آن مقدار عددی ناهنجاری سلسله‌مراتبی حوضه زهکشی (Δa) بالا می‌رود. در منطقه مورد مطالعه حوضه‌ها به دو صورت طویل (کشیده) و تقریباً دایره‌شکل دیده می‌شوند. در مناطق فرسایش یافته حوضه‌های دایره‌شکل دیده می‌شوند (حوضه‌های ۶ و ۷). در این حوضه‌ها به دلیل الگوی زهکشی شاخه‌ای (درختی) میزان ناهنجاری شبکه زهکشی پایین است. اما در مناطقی که از لحاظ تکتونیکی فعال‌ترند حوضه‌ها بیشتر به صورت طویل و کشیده دیده می‌شوند و به دلیل الگوی زهکشی موازی و داریستی در این حوضه‌ها (حوضه‌های ۴ و ۲ و ۵) میزان ناهنجاری شبکه زهکشی بالاتر است. میزان فعالیت تکتونیکی با فاصله محور تاقدیس‌ها در ارتباط است. در مناطق فعال تکتونیکی این ارتباط به وسیله چین‌هایی با طول موج‌های کوتاه‌تر و بسته‌تر مشخص می‌شوند. فاصله محور تاقدیس از سمت شمال خاوری به سمت جنوب باختری افزایش می‌یابد. این موضوع بدین معناست که ساختارهای بخش شمال خاوری قدیمی‌ترند و ساختارهایی که در بخش جنوب باختری قرار دارند جوان‌ترند و پهنای بیشتری دارند.



شکل ۵. الف) نمودار شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی در مقابل شاخص شکل حوضه؛ ب) نمودار شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی در مقابل شاخص نسبت طول حوضه زهکشی به میانگین عرض آن؛ ج) نمودار شاخص نسبت طول حوضه زهکشی به میانگین عرض آن در مقابل شاخص شکل حوضه؛ د) نمودار شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی در مقابل شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی

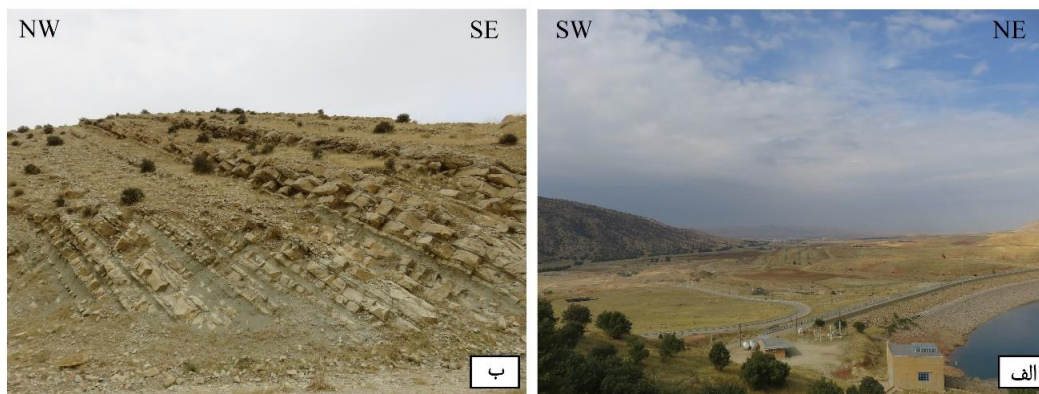
همچنین میزان کوتاه‌شدگی چین‌های زاگرس از سمت شمال خاوری به سمت جنوب باختری (فروافتادگی دزفول) کاهش می‌یابد (ورگس^۱ و همکاران ۲۰۱۱). فاصله محور تاقدیس مقادیر شاخص‌های ناهنجاری سلسله‌مراتبی حوضه زهکشی، کج‌شدگی حوضه، شکل حوضه و در نتیجه آن شاخص نسبت طول حوضه به میانگین عرض آن را به شدت کنترل می‌کند. این پارامترها (ناهنجاری سلسله‌مراتبی زهکشی و شکل حوضه) با کاهش فاصله از محور تاقدیس افزایش می‌یابند. این موضوع نشان می‌دهد در مناطقی که مقادیر فاصله محور تاقدیس پایین‌تر است عدم تقارن و برخاستگی در حوضه‌ها دیده می‌شود و ساختارها بیشتر تحت تأثیر محور قرار می‌گیرند. در نتیجه، شکل حوضه تحت تأثیر قرار می‌گیرد و رابطه‌ای معکوس با شاخص‌های یادشده را نمایش می‌دهد (شکل ۶ الف و ۶ ب). همچنین، در حوضه‌های فعال تکنونیک، که دارای برخاستگی بالاترند، تعداد آبراهه‌های مرتبه اول بیشتر می‌شود. در نتیجه میزان شاخص LN1 نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی (Δa) به طور مستقیم به تعداد آبراهه‌ها و اتصال منظم این آبراهه‌ها به مرتبه بعدی وابسته است، میزان ناهنجاری سلسله‌مراتبی در صورت افزایش مقادیر LN1 کاهش می‌یابد.



شکل ۶. الف) نمودار شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی در مقابل شاخص مرکز حوضه تا محور تاقدیس؛ ب) نمودار شاخص شکل حوضه در مقابل شاخص مرکز حوضه تا محور تاقدیس در منطقه مورد مطالعه

به علت وجود مناطق فرسایشی و سازندهایی با جنس متفاوت (آهکی، مارنی، شیلی، کنگلومرای مقاوم) و همچنین پوشش گیاهی ناهمگن در منطقه مورد مطالعه، گنجایش نفوذپذیری هر یک از حوضه‌های تاقدیس به صورت مستقل و متفاوت از حوضه‌های دیگر است (شکل ۷ الف و ب).

شکل ۷. الف) نمایی از منطقه فرسایش یافته یال جنوب باختری (حوضه‌های ۶ و ۷) (دید به سمت NW)؛ ب) تناوب لایه‌های آهکی و مارنی سازندهای گورپی و پابده در یال شمال خاوری منطقه مورد مطالعه (دید به سمت NE)

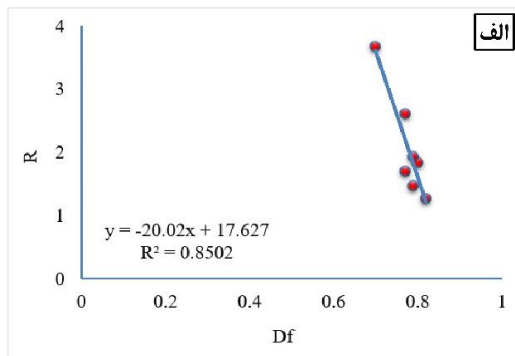
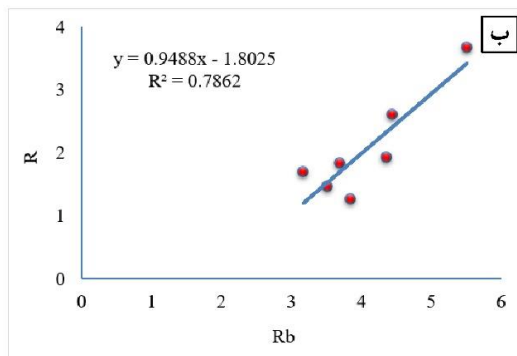


درصد مقادیر سازندهای هر حوضه به صورت تفکیک شده در جدول ۸ آمده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، اغلب سازندهای موجود در یال جنوب باختری (حوضه‌های ۵ و ۶ و ۷) از سازندهای گچساران و کواترنری و اغلب سازندهای موجود در یال شمال خاوری (حوضه‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۴) از سازندهای آسماری-شهبازان و آغاچاری و کواترنری تشکیل شده‌اند. به علت اینکه جنس سازندهای یال جنوب باختری از سنگ‌های تبخیری (ژیپس و نمک) است در مقابل فرسایش و هوازگی بسیار ضعیف است که باعث ایجاد حوضه‌های فرسایشی (۶ و ۷) در یال جنوب باختری شده است. در نتیجه شرایط برای حفر زمین توسط آبراهه‌ها و نفوذپذیری فراهم است. اما در یال شمال خاوری اغلب

سازندها از جنس سنگ آهک‌های ضخیم‌لایه هستند و در مقابل فرسایش بسیار مقاوم‌اند. در اثر فرسایش و حفر عمیق زمین در یال جنوب باختری، تعداد آبراهه‌های مرتبه یک کاهش یافته و به دنبال آن مقادیر شاخص LN1 پایین آمده است. در نتیجه میزان شاخص Df کاهش و شاخص انشعابات R افزایش یافته است. از طرفی با توجه به رابطه $R=Rb-$ (Rbd) شاخص انشعابات به طور مستقیم با شاخص نسبت کل انشعابات (Rb) در ارتباط است و با افزایش یا کاهش آن شاخص R نیز افزایش یا کاهش می‌یابد (شکل ۸).

جدول ۸. درصد مساحت سازندهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

درصد نهایی	تله زنگ	کوانترنری	پایده	میشان	کلهر	گوری	گچساران	امام حسن	بختیاری	اسماری-شهبازان	امیران	آغاچاری	حوضه
۱۰۰	۰	۲۸.۳	۲.۳	۱.۸۱	۰	۰	۱۹.۶۳	۰	۱.۴۷	۸.۲۶	۰	۳۸.۲۳	۱
۱۰۰	۰.۰۰۰۳	۲۲.۵۸	۳.۵۸	۰.۳۵	۰	۰	۵.۹۲	۰	۰.۴۲	۶۳.۶۸	۰	۳.۴۳	۲
۱۰۰	۰	۳۴.۳۳	۰.۱	۰	۰	۰	۰.۱۸	۰	۰	۶۳.۵۹	۰	۱.۷۶	۳
۱۰۰	۰.۰۶	۳۰.۲۴	۰	۰	۰	۰	۵.۱۵	۰	۰.۵۵	۵۵.۹۴	۰.۰۱	۸.۰۱	۴
۱۰۰	۰.۲۴	۲۴.۹۷	۱۰.۱۶	۰	۰	۳.۰۷	۱۱.۱۸	۰.۱۵	۱.۸	۴۳.۷۷	۰.۳۹	۴.۲۲	۵
۱۰۰	۱.۹۷	۲۷.۴	۱۵.۵۷	۰.۴۷	۲.۷۱	۸.۰۲	۲۳.۱۸	۳.۳۳	۰	۹.۵۸	۵.۹۸	۱.۷۴	۶
۱۰۰	۱.۲۴	۲۵.۴۶	۶.۵۴	۱.۷۸	۰	۷.۴	۲۶.۸۸	۲.۷۱	۰	۲.۵۱	۶.۵۶	۱۸.۸۷	۷



شکل ۸. الف) نمودار شاخص انشعابات در مقابل شاخص فراوانی شبکه زهکشی؛ ب) نمودار شاخص انشعابات در مقابل شاخص نسبت انشعابات

نتیجه

روابط آماری بین شاخص‌های سیستم زهکشی و شاخص‌های مورفومتریک حوضه‌ها مطالعه و بررسی شد. نتایج نشان داد بین شاخص‌های $Bs - B1/Bmw$ همبستگی مثبت قوی و در نتیجه آن یک رابطه خطی مستقیم با ضریب ۰/۹۶ برقرار است. همبستگی مثبت دیگری میان زوج شاخص‌های $R-Rb$ برقرار است که نتیجه آن یک رابطه خطی مستقیم با ضریب ۰/۸۸ است. اما بین زوج شاخص‌های $R-Df$ همبستگی منفی قوی و میان زوج شاخص $\Delta a-Hs$ همبستگی منفی برقرار است.

در مناطقی که مقادیر شاخص H_s پایین تر باشد، عدم تقارن و برخاستگی در حوضه‌ها مشاهده می‌شود و ساختارها به علت نزدیکی به محور تاقدیس تحت تأثیر نیروها و تنش‌های حاصل از محور قرار می‌گیرند. در نتیجه در حوضه‌هایی که میزان مقادیر H_s در آن‌ها پایین تر است فعالیت تکتونیکی بیشتر مشاهده می‌شود و از این رو مقادیر شاخص Δa افزایش می‌یابد. به طور کلی نتایج حاصل از این پژوهش رابطه معکوس میان شاخص H_s و Δa را نشان داد.

نتایج نشان داد حوضه‌هایی که طولیل و کشیده‌اند به نسبت حوضه‌های تقریباً دایره‌ای و فرسایشی میزان Δa بالاتری دارند. از طرف دیگر حوضه‌های کشیده و طولیل مقادیر عددی Bl/Bmw بالاتری نسبت به حوضه‌های دایره‌ای و فرسایشی دارند. از این رو میزان شاخص Δa نیز در این حوضه‌ها بالاتر است. این نتایج ارتباط مستقیم و همبستگی قوی میان شاخص‌های Bs و Bl/Bmw را بیان می‌دارد.

طبق نتایج به دست آمده شاخص Df به شدت به لیتولوژی، مقاومت، نفوذپذیری، و پوشش گیاهی منطقه وابسته است. به دلیل فرسایش و حفر عمیق زمین به علت وجود سازندهای تبخیری و نامقاوم گچساران و نهشته‌های کواترنری در قسمت شمالی یال جنوب باختری (حوضه‌های ۶ و ۷) و تغییر در تعداد آبراهه‌های مرتبه یک مقادیر شاخص LNI کاهش و در نتیجه میزان شاخص Df کاهش می‌یابد و با شاخص انشعابات (R) یک رابطه معکوس را نمایش می‌دهد.

با توجه به مقادیر شاخص به دست آمده برای هر حوضه و محاسبه میزان شاخص‌های ژئومورفیک در هر یال، می‌توان نتیجه گرفت که یال جنوب باختری تاقدیس قلاجه به دلیل میزان بالای مقادیر یادشده در این پژوهش از نظر زمین‌ساختی نسبت به یال شمال خاوری فعال تر است. همچنین حوضه‌های ۶ و ۷ در یال جنوب باختری و حوضه ۱ در یال شمال خاوری تحت تأثیر فرایندهای شدید فرسایشی قرار دارند که این موضوع با بررسی میزان شاخص‌های یادشده به خوبی قابل مشاهده است. فعال‌ترین حوضه‌های زمین‌ساختی این تاقدیس به ترتیب حوضه ۵ در یال جنوب باختری و حوضه ۳ و ۴ در یال شمال خاوری این تاقدیس است.

نتایج نشان می‌دهد میان شاخص‌های مرتبط با حوضه آبریز (شبکه زهکشی) و شاخص‌های مرتبط با شکل حوضه روابط معناداری وجود دارد. از این رو در این پژوهش به طور هم‌زمان از شاخص‌های مرتبط با شبکه زهکشی و شاخص‌های مرتبط با شکل حوضه استفاده شد. با توجه به نقش آب‌های جاری به عنوان عامل اصلی ایجاد شکل‌زایی در منطقه مورد مطالعه، آبراهه‌های مرتبه مختلف در راستای تاقدیس قلاجه ایجاد شده‌اند که به مرور زمان به دلیل نیروهای فرسایشی و برخاستگی تکتونیکی به شکل امروزی مشاهده می‌شوند. بنابراین میان عوامل اقلیمی (آب‌های جاری) و تشکیل آبراهه‌های مرتبه مختلف و در نتیجه فعالیت تکتونیکی ارتباط برقرار است.

منابع

- آبدیده، م.، قرشی، م.، رنگزن، ک.، آرین، م. (۱۳۹۰). «ارزیابی نسبی زمین‌ساخت فعال با استفاده از تحلیل ریخت‌سنجی، بررسی موردی: حوضه آبریز رودخانه دز، جنوب باختری ایران»، علوم زمین، د ۲۰، ش ۸۰، صص ۳۳ - ۴۶.
- باقری، س. (۱۳۸۷). «بررسی نقش تکتونیک در شکل‌گیری و تحول لندفرم‌های تاقدیس قلاجه استان کرمانشاه»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: دکتر مهران مقصودی، دانشگاه تهران، دانشکده جغرافیا.

مقصودی، م.، باقری، س.، مینائی، م. (۱۳۸۸). «بررسی نقش تکتونیک در شکل‌گیری و تحول مخروط‌افکنه‌ها، مطالعه

موردی: مخروط‌افکنه‌های دامنهٔ تاقدیس قلاجه»، *جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای*، د ۱۱، ش ۱۲، صص ۱۵۹ - ۱۷۲.

نگهبان، س.، جعفریگلو، م.، ویسی، ع.، ولی‌پور، ط. (۱۳۹۴). «بررسی نقش نوزمین‌ساختدر شکل‌گیری پادگانه‌های

رودخانه‌ای، مطالعهٔ موردی: رودخانهٔ گیلان غرب - محدودهٔ شمالی شهر گیلان غرب»، *آمایش جغرافیایی فضا*، د ۵،

ش ۱۶، صص ۲۰۰ - ۲۰۹.

Abdideh, M., Ghoreshi, M., Rangzan, M., & Arian, M. (2011). "Assessment of relative active tectonics using morphometric analysis, a case study: Dez River catchment, southwestern Iran", *Geosciences*, 80, pp. 33-46.

Bagheri, S., (2008). "Investigation of Tectonic Role in Generate and Evolution of Ghalaje Landforms at the Kermanshah Province", Master of Science Thesis, under supervision of: Dr.Mehran Maghsudi, Tehran University, Faculty of Geography.

Bahrami, S., Capolongo, D., & Rahdan, M. M. (2020). "Morphometry of drainage basins and stream networks as an indicator of active fold growth (Gorm anticline, Fars Province, Iran)", *Geomorphology*, 355, pp. 68-86.

Bahrami, S., (2012). "Morphotectonic evolution of triangular facets and wine-glass valleys in the Noakoh anticline, Zagros, Iran: implications for active tectonics", *Geomorphology*, 159, pp. 37-49.

Bahrami, S. (2013). "Tectonic controls on the morphometry of alluvial fans around Danekhosk anticline, Zagros, Iran", *Geomorphology*, 160, 180-181, pp. 217-230.

Bretis, B., Bartl, N., & Grasemann, B. (2011). "Lateral fold growth and linkage in the Zagros fold and thrust belt (Kurdistan, NE Iraq)", *Basin Research*, 23, pp. 615-630.

Callot, J. P., Jahani, S., & Letouzey, J. (2007). "The role of pre-existing diapirs in fold and thrust belt development", In: Lacombe, O., Lavé, J. F., Roure, M., & Verges, J., Thrust Belt and Foreland Basin: From Fold Kinematics to Hydrocarbon Systems, pp. 307-323, (Springer, Berlin).

Casciello, E., Vergés, J., Saura, E., Casini, G., Fernández, N., Blanc, E., Homke, S., & Hunt, D.W., (2009). "Fold patterns and multilayer rheology of the Lurestan Province, Zagros simply folded belt (Iran)", *J Geolog Soc*, 166, pp. 947-959.

Devi, R.K.M., Bhakuni, S.S., & Bora, P.K. (2011). "Tectonic implication of drainage set-up in the Sub-Himalaya: a case study of Papumpare district, Arunachal Himalaya, India", *Geomorphology*, 127, pp. 14-31.

El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacn, J., & Keller, E.A. (2008). "Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (Southern Spain)", *Geomorphology*, 96, pp. 150-173.

Faghih, A., Samani, B., Kusky, T., Khabazi, S., & Roshanak, R. (2012). "Geomorphologic assessment of relative tectonic activity in the Maharlou Lake Basin, Zagros Mountains of Iran", *Geological Journal*, 47, pp. 30-40.

Guarnieri, P. & Pirrotta, C. (2008). "The response of drainage basins to the late Quaternary tectonics in the Sicilian side of the Messina Strait (NE Sicily)", *Geomorphology*, 95, pp. 260-273.

Hessami, K., Nilforoushan, F., & Talbot, C.J. (2006). "Active deformation within the Zagros

- Mountains deduced from GPS measurements”, *J Geol Soc London*, 163, pp. 143-148.
- Horton, R.E. (1932). “Drainage basin characteristics. Trans. Am”, *Geophys Union*, 13, pp. 350–361.
- Ioannis, M.T., Ioannis, K.K., & Pavlides, S. (2006). “Tectonic geomorphology of the easternmost extension of the Gulf Corinth (Beotia, central Greece)”, *Tectonophysics*, 453, pp. 211-232.
- Keller, E.A. & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics – Earthquakes, Uplift, and Landscape*, (2nd edition), Prentice Hall, London.
- Keller, E.A. & Pinter, N. (1996). “Active tectonics: earthquakes, uplift, and landscape by Prentice-Hall, Inc”, *Simon and Schuster/A Viacom Company Upper Saddle River*, New Jersey, 7458, pp. 121-145.
- Kent, P.E. (1979). “The emergent Hormuz salt plugs of southern Iran”, *J Pet Geol*, 2, pp. 117–144.
- Maghsoudi, M., Bagheri, S., & Minaei, M. (2009). “The study of role of the tectonics in the formation and evolution of alluvial fans, Case study: Alluvial fans of the Qalajeh anticline”, *Geography and regional development*, 12, pp. 100–124.
- Melosh, B.L. & Keller, E.A. (2013). “Effects of active folding and reverse faulting on stream channel evolution, Santa Barbara Fold Belt, California”, *Geomorphology*, 186, pp. 119–135.
- Negahban, S., Jafarbeyglo, M., Veisi, A., Valipoor, T., (2006). “Investigating the role of neotectonics in formation of river garrisons, a case study: Gilanegharb River - North of the Gilanegharb”, *Geographical Planning of Space Quarterly*, 12, pp. 51-70.
- Ozdemir, H. & Bird, D. (2009). “Evaluation of morphometric parameters of drainage networks derived from topographic maps and DEM in point of floods”, *Environmental Geology*, 56, pp. 1405–1415.
- Pirouz, M., Avouac, J. P., Hassanzadeh, J., Kirschvink, J. L., & Bahroudi, A. (2017). “Early Neogene foreland of the Zagros, implications for the initial closure of the Neo-Tethys and kinematics of crustal shortening”, *Earth and Planetary Science Letters*, 477, pp. 168-182.
- Ramírez, M. & Herrera, T. (1998). “Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt”, *Earth Surf Process Landf*, 23, pp. 317–332.
- Sepehr, M., Cosgrove, J.W., & Moieni, M. (2006). “The impact of cover rock rheology on the style of folding in the Zagros Fold–thrust Belt”, *Tectonophysics*, 427, pp. 265–281.
- Strahler, A.N. (1952). “Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography”, *Geol Soc Am Bull*, 63, pp. 1117–1142.
- Tavani, S., Parente, M., Puzone, F., Corradetti, A., Gharabeigli, G., Valinejad, M., Morsalnejad, D., & Mazzoli, S. (2018). “The seismogenic fault system of the 2017 M w 7.3 Iran–Iraq earthquake: constraints from surface and subsurface data, cross-section balancing, and restoration”, *Solid Earth*, 9(3), pp. 821-831.
- Verges, J., Goodarzi, M.G.H., Emami, H., Karpuz, R., Efstathiou, J., & Gillespie, P. (2011). “Multiple detachment folding in Pusht-e Kuh arc, Zagros: role of mechanical stratigraphy”, In: McClay, K., Shaw, J.H., & Suppe, J. (Eds.), *Thrust Fault-Related Folding: AAPG*, 94, pp. 69–94.
- Zuchiewicz, W. (1998). “Quaternary tectonics of the Outer West Carpathians, Poland”, *Tectonophysics*, 297, pp. 121–132.