تحلیل تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی بر ناهنجاری‌های شبکه زهکشی حوضه‌آبریز شهرچای ارومیه با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک

فریبا همتی*[۱]، صابر سیداحمدی[۲] و اکرم علیزاده[۳]

۱- گروه آموزشی جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران
۲- کارشناس ارشد آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، ماکو، ایران
۳- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

نویسنده مسئول: **F.Hemmati@cfu.ac.ir** *

دریافت: ۱۴۰۳/۹/۲۳ **پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸** **نوع مقاله: پژوهشی**

چکیده

این پژوهش به بررسی تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی بر ناهنجاری‌های شبکه‌زهکشی حوضه‌آبریز شهرچای در شمال‌غرب ایران (ارومیه) می‌پردازد. منطقه مورد مطالعه به دلیل فعالیت‌های تکتونیکی و تغییرات زمین‌شناسی، الگوهای زهکشی خاصی را نشان می‌دهد. هدف این مطالعه، شناسایی و تحلیل ارتباط بین فعالیت‌های تکتونیکی و تغییرات شبکه‌زهکشی با استفاده از ابزارهای تحلیل مورفومتری است. برای این منظور، از ابزارهایی مانند مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت ۱۰ متر، نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی و شاخص‌های ژئومورفیک مختلف استفاده شده است. روش تحلیلی شامل محاسبه شاخص‌هایی مانند ناهنجاری سلسله‌مراتبی (Δa) و تراکم ناهنجاری سلسله‌مراتبی (ga) است که به منظور ارزیابی فعالیت‌های تکتونیکی و بررسی ارتباط آن‌ها با تغییرات شبکه‌زهکشی محاسبه و تحلیل قرار گرفت. همچنین، شاخص‌های نسبت انشعابات (Rb)، نسبت انشعابات مستقیم (Rbd)، درصد عدم‌تقارن حوضه (PAF)، نسبت شکل حوضه (BS) و میانگین طول آبراهه درجه ۱ (LN1) برای شناسایی ویژگی‌های ساختاری و روندهای زمین‌ساختی به کار گرفته شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر شاخص‌های ناهنجاری سلسله‌مراتبی (۱/۳۴) و تراکم ناهنجاری سلسله‌مراتبی (۱/۳۳) حاکی از وجود ناهنجاری‌های ساختاری و فعالیت تکتونیکی چشمگیر در منطقه است. تحلیل شاخص نسبت انشعابات (R= ۱/۴۱) نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی بالا و عدم تکامل شبکه‌زهکشی در برخی نواحی است. همچنین، مقدار شاخص عدم‌تقارن حوضه (PAF = ۵۴/۳۹) تمایل آبراهه‌ها به سمت کناره چپ و احتمال فعالیت‌های تکتونیکی در این بخش را تأیید می‌کند. نسبت شکل حوضه (BS = ۵/۶۲) و میانگین طول آبراهه درجه ۱ (LN1 = ۰/۵۱۷ کیلومتر) نیز نشان‌دهند شبکه‌زهکشی تکامل‌نیافته و تحت تأثیر تکتونیک فعال است. نتیجه این پژوهش نشان می‌دهد که فعالیت‌های زمین‌ساختی تأثیر قابل‌توجهی بر الگوهای زهکشی منطقه دارند. این یافته‌ها می‌تواند در ارزیابی مخاطرات زمین‌شناسی نظیر فرآیندهای دامنه‌ای همچنین در برنامه‌ریزی‌های توسعه و مدیریت بحران در این حوضه مؤثر باشد.

واژه‌های کلیدی: تکتونیک، ناهنجاری شبکه‌زهکشی، حوضه‌آبریز شهرچای، تحلیل ژئومورفیک، تکامل زهکشی

۱- پیشگفتار

ارتباط بین تکتونیک و ناهنجاری‌های شبکه‌های زهکشی از موضوعات کلیدی در زمین‌شناسی است که بررسی آن اطلاعات مهمی درباره تاریخچه تکتونیکی مناطق فعال ارائه می‌دهد. شبکه‌های زهکشی به عنوان یکی از حساس‌ترین سیستم‌های ژئومورفولوژیکی، به تغییرات زمین‌ساختی واکنش نشان داده و می‌توانند نشانه‌هایی از فعالیت‌های تکتونیکی مانند تغییر مسیر جریان آب، انحراف رودخانه‌ها و ناهنجاری‌های کانالی را آشکار کنند. این ویژگی‌ها به‌ویژه در نزدیکی گسل‌های فعال بارزتر هستند، زیرا حرکات تکتونیکی باعث تغییرات در شیب زمین، الگوی جریان و توزیع دامنه‌ها می‌شوند (بوربانک و اندرسون، ۲۰۱۱). شکل‌گیری و تکامل شبکه‌های زهکشی تحت تأثیر دو فرآیند عمده، یعنی بالاآمدن سازندهای سنگی و فرسایش قرار دارد. این فرآیندها می‌توانند الگوهای زهکشی را تغییر داده و نشانه‌های قابل شناسایی از تاریخچه تکتونیکی منطقه ارائه دهند. به‌عنوان مثال، تغییرات در میزان و سرعت بالاآمدن باعث تغییر در الگوهای زهکشی می‌شود و می‌تواند به انحراف جریان‌های اصلی، تغییر زاویه رودخانه‌ها یا ظهور نقاط شکست در مسیر جریان منجر شود (حبوشا

و همکاران، ۲۰۲۳). تحقیقات اخیر در مناطقی از جمله شمال غربی ایتالیا، یونان مرکزی، رشته کوه‌های آپنینی در ایتالیا نشان داده‌اند که فعالیت‌های نئوتکتونیکی، تأثیرات عمده‌ای بر الگوهای زهکشی و شکل‌گیری ناهنجاری‌های آن داشته‌اند (یعقوب و همکاران، ۲۰۲۲؛ جیویا و همکاران، ۲۰۲۳؛ والکانو و همکاران، ۲۰۲۲؛ تبار و همکاران، ۲۰۲۳). این مطالعات تأکید دارند که تغییرات ناشی از تکتونیک فعال می‌تواند شامل انحراف جریان رودخانه‌ها، کاهش یا افزایش شدت فرسایش و ایجاد شیب‌های غیرطبیعی در مسیر رودخانه‌ها باشد.

شبکه‌های زهکشی یکی از مهم‌ترین سیستم‌های طبیعی در مدیریت منابع آبی و شکل‌گیری مناظر زمین‌شناسی به شمار می‌روند. این شبکه‌ها تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل از جمله فعالیت‌های تکتونیکی، فرآیندهای فرسایشی، و تغییرات اقلیمی قرار دارند. در مناطق با فعالیت تکتونیکی بالا، شبکه‌های زهکشی نه تنها شاخصی برای تغییرات زمین‌ساختی محسوب می‌شوند، بلکه بازتابی از فرآیندهای دینامیکی زمین نیز هستند. این بازتاب‌ها شامل پدیده‌هایی نظیر تغییر مسیر جریان آب، انحراف رودخانه‌ها، و ایجاد ناهنجاری‌های متنوع در ساختار شبکه‌های زهکشی است (بوربانک و اندرسون، ۲۰۱۱). علاوه بر این، تعامل بین نیروهای زمین‌ساختی، فرآیندهای سطحی و شرایط اقلیمی منجر به ظهور ویژگی‌های مورفوتکتونیک متمایزی در مناطق با فعالیت تکتونیکی می‌شود. این ویژگی‌ها شامل شاخص‌هایی مانند فاکتور عدم‌تقارن حوضه (که نشان‌دهنده توزیع نامتقارن جریان‌های زهکشی در اثر تغییرات شیب یا فرسایش است)، سینوزیته جبهه کوهستان (که میزان انحراف خط‌الرأس کوهستان از حالت مستقیم را نشان می‌دهد) و نسبت ارتفاع دره به عرض آن (که بیانگر شدت فرسایش عمودی در مقایسه با فرسایش جانبی است) می‌باشند. این شاخص‌ها به عنوان ابزارهایی کارآمد برای شناسایی و ارزیابی تأثیرات نئوتکتونیک بر شبکه‌های زهکشی به کار می‌روند (جیویا و همکاران، ۲۰۲۳؛ والکانو و همکاران، ۲۰۲۲). این تحقیق با هدف شناسایی و تحلیل ارتباط بین فعالیت‌های تکتونیکی و تغییرات شبکه‌زهکشی، با بهره‌گیری از ابزارهای تحلیل مورفومتری در حوضه‌آبریز شهرچای ارومیه انجام شده است. تحقیقات مختلفی در زمینه تأثیرات تکتونیکی بر ناهنجاری‌های شبکه‌های زهکشی در مناطق گوناگون انجام شده است. این پژوهش‌ها با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و پارامترهای سلسله‌مراتبی، به بررسی تغییرات ساختاری و مورفولوژیکی شبکه‌های زهکشی ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی پرداخته‌اند. نتایج این مطالعات اطلاعات ارزشمندی درباره رابطه بین دینامیک تکتونیک و توسعه شبکه‌های زهکشی ارائه می‌دهد. در زیر، به برخی از این پژوهش‌ها اشاره شده است:

اسماعیلی (۱۳۹۴) در پژوهشی به بررسی تأثیر تکتونیک جدید بر شبکه‌زهکشی حوضه‌های‌آبریز واز و لاویج در البرز شمالی پرداخته است. این مطالعه با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک نظیر شاخص تقارن توپوگرافی و نسبت طول آبراهه‌ها نشان می‌دهد که اگرچه تکتونیک فعال موجب ایجاد ناهنجاری‌هایی در این شبکه‌ها شده است، اما نقش آن در سازمان‌دهی شبکه‌زهکشی محدود بوده و عوامل فرسایشی و اقلیمی تأثیر بیشتری داشته‌اند. تقوی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۶) به ارزیابی تأثیرات تکتونیک فعال در چهار حوضه‌آبریز (باغرود، بوژان، زاوین و سررود) در استان خراسان رضوی پرداخته‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که حوضه‌های بوژان و سررود، به دلیل قرارگیری در مجاورت گسل‌های فعال، بالاترین مقادیر ناهنجاری سلسله‌مراتبی و شاخص‌های انشعاب را دارند. در مقابل، حوضه‌های باغرود و زاوین کمترین تأثیر تکتونیکی را تجربه کرده‌اند. این یافته‌ها بر اهمیت موقعیت گسل‌ها در تأثیرگذاری بر ساماندهی و تکامل شبکه‌زهکشی تأکید دارد. کرمی و همکاران (۱۳۹۷) تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی گسل تبریز بر حوضه‌های‌آبریز شمال تبریز را بررسی کرده‌اند. تحلیل شاخص‌هایی مانند شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی(Da) و شاخص تراکم گسل(ga) نشان می‌دهد که کشیدگی حوضه‌ها و تقعر نیمرخ طولی رودخانه‌ها به طور مستقیم تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی منطقه قرار دارند. این مطالعه همچنین نشان می‌دهد که افزایش فعالیت گسل‌ها منجر به تشدید ناهنجاری‌های شبکه‌زهکشی شده است. مالک و موهانتی (۲۰۰۷) در پژوهشی با عنوان "تأثیر تکتونیک فعال بر تکامل زهکشی و چشم‌انداز: شواهد ژئومورفولوژیکی از مناطق جلویی و پشتی در شمال‌غربی هیمالیا، هند"، به بررسی نقش تکتونیک فعال در تغییرات سیستم‌های زهکشی و تحولات چشم‌اندازهای منطقه پرداخته‌اند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که تغییرات در نیمرخ طولی رودخانه‌ها و توزیع نقاط شکست، ارتباط

مستقیمی با فعالیت‌های تکتونیکی دارد. همچنین، این فعالیت‌ها باعث تغییر مسیر رودخانه‌ها و افزایش نرخ بالاآمدگی زمین شده‌اند. شواهد ژئومورفولوژیکی، از جمله جبهه‌های کوهستانی تیز و دره‌های V شکل، بیانگر تداوم و شدت فعالیت‌های تکتونیکی در این منطقه هستند. شاهد و گلواگن (۲۰۱۰) در پژوهشی با عنوان "TecDEM: یک جعبه‌ابزار مبتنی بر MATLAB برای ژئومورفولوژی تکتونیکی"، به بررسی و معرفی نرم‌افزار TecDEM پرداخته‌اند. این نرم‌افزار که برای پردازش داده‌های ژئومورفولوژی تکتونیکی مبتنی بر مدل‌های رقومی ارتفاع (DEMs) طراحی شده است، قابلیت‌هایی همچون تعیین جهت جریان، بردارسازی مسیر رودخانه، شناسایی حوضه‌های آبریز و تولید پروفیل‌های طولی رودخانه را ارائه می‌دهد. TecDEM در دره کاغان (شمال پاکستان) مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج آن با مدل‌های تکاملی تکتونیکی پیشین مطابقت دارد. این ابزار، امکان انجام تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی پیشرفته را برای پژوهشگران علوم زمین فراهم می‌کند. کامافورت و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی با عنوان "تکتونیک فعال و تکامل زهکشی در اطلس تونس"، به بررسی تأثیر تکتونیک فعال بر شبکه‌زهکشی شمال تونس پرداخته‌اند. تحلیل‌های مورفومتری و داده‌های میدانی نشان می‌دهد که فعالیت رودخانه‌ای اخیر، عامل اصلی سازماندهی مجدد زهکشی این منطقه بوده است. رودخانه مدجره طی دوران کواترنری، با ادغام دره‌های محوری مجاور، مساحت حوضه‌زهکشی خود را گسترش داده است. این تغییرات تحت تأثیر بالاآمدگی ناشی از گسل‌های معکوس و چین‌خوردگی‌ها رخ داده‌اند و قطع رسوبات هولوسن شواهدی از فعالیت گسل‌ها ارائه می‌دهد. علاوه بر این،کاهش ضخامت پوسته و دینامیک گوشته نیز در تثبیت این رودخانه نقش داشته‌اند. وانی و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی با عنوان "تأثیر تکتونیک بر تکامل شبکه‌زهکشی حوضه سور، کارگیل، شمال‌غرب هیمالیا، جامو و کشمیر، هند"، به بررسی نقش تکتونیک در تغییرات شبکه‌زهکشی این حوضه پرداخته‌اند. این مطالعه با استفاده از تحلیل‌های مورفومتری و شاخص‌هایی مانند پیچ‌خوردگی جبهه کوهستان، عدم‌تقارن و هیپسومتری به ارزیابی ویژگی‌های تکتونیکی منطقه پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که فرآیندهای تکتونیکی نقش غالبی در تغییرات ژئومورفولوژیکی حوضه داشته‌اند و نرخ بالاآمدگی آن ۰/۹۹±۲/۱۸ میلی‌متر در سال برآورد شده است. همچنین، بررسی‌های میدانی و تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی تأیید کرده‌اند که حوضه سور به لحاظ تکتونیکی فعال و ناپایدار است. ساها و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیرات نئوتکتونیک بر تکامل شبکه‌زهکشی در حوضه پیشانی هیمالیا پرداختند. این تحقیق به تحلیل تغییرات سطحی و زیرسطحی در تکامل سیستم‌های آبی پرداخته و شواهد زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی از جمله شاخص‌های تکتونیکی، تغییرات مورفولوژی کانال و الگوهای جریان را بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهند که تکامل شبکه زهکشی تحت تأثیر شدید تکتونیک نئوترکیبی قرار دارد که باعث تغییرات شدید در شیب و انحنای کانال‌ها شده است.

حوضه‌آبریز شهرچای، واقع در شمال‌غرب ایران، به دلیل موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منحصر به فرد خود و نزدیکی به گسل‌های فعال نظیر گسل تبریز، محیطی ایده‌آل برای بررسی تأثیرات تکتونیکی بر شبکه‌های‌زهکشی محسوب می‌شود. این منطقه با سابقه طولانی از فعالیت‌های زمین‌ساختی، زمینه‌ساز بروز ناهنجاری‌هایی همچون تغییر شیب رودخانه‌ها، عدم‌تقارن حوضه‌ها، و انحراف شاخه‌های اصلی و فرعی رودخانه‌ها در واکنش به حرکات تکتونیکی بوده است. مطالعات محدودی به بررسی این پدیده در حوضه‌آبریز شهرچای پرداخته‌اند. تمایز این پژوهش از مطالعات پیشین در آن است که با ترکیب شاخص‌های ژئومورفیک و تحلیل‌های سلسله‌مراتبی، میزان تأثیرات تکتونیکی بر ناهنجاری‌های شبکه زهکشی را بررسی کرده و ارتباط میان فعالیت‌های زمین‌ساختی و تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌های منطقه را تبیین می‌کند. نوآوری این تحقیق در آن است که برای نخستین بار، اثرات تکتونیک فعال بر شبکه زهکشی حوضه شهرچای، که در مجاورت گسل‌های فعال مانند گسل تبریز قرار دارد، به‌طور جامع ارزیابی می‌شود. نتایج این پژوهش نه تنها موجب افزایش درک از فرآیندهای تکتونیکی در منطقه خواهد شد، بلکه می‌تواند برای مدیریت منابع آبی، طراحی زیرساخت‌های شهری و کاهش مخاطرات طبیعی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

پژوهش حاضر به دنبال پاسخ به پرسش‌های زیر است:

۱- چگونه فعالیت‌های تکتونیکی از طریق فرآیندهایی مانند بالاآمدگی زمین، جابجایی گسل‌ها و تغییرات شیب

زمین باعث ایجاد ناهنجاری در شبکه‌زهکشی حوضه‌آبریز شهرچای می‌شوند؟

۲- کدام شاخص‌های مورفومتری می‌توانند به عنوان اندیس‌های مناسب برای تعیین میزان فعالیت تکتونیکی در این منطقه به کار روند؟

ضرورت انجام این پژوهش از آنجا ناشی می‌شود که شناخت تأثیرات تکتونیک فعال بر شبکه‌های‌زهکشی می‌تواند نقش مهمی در مدیریت منابع آبی، برنامه‌ریزی شهری و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی ایفا کند. از آنجا که تغییرات در الگوهای زهکشی می‌تواند بر توزیع منابع آبی، فرسایش خاک، پایداری زیرساخت‌ها و وقوع مخاطرات طبیعی نظیر سیلاب و رانش زمین تأثیر بگذارد، بررسی دقیق این اثرات در مناطق تکتونیکی فعال ضروری محسوب می‌شود.

۲- معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه‌آبریز شهرچای ارومیه در شمال‌غرب ایران و در استان آذربایجان غربی واقع شده است. این حوضه در فاصله ۱۲ کیلومتری جنوب‌غربی شهر ارومیه قرار دارد و بین طول‌های جغرافیایی′ ۳۵ ° ۴۴ تا ′ ۱۷ ° ۴۵ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ′ ۱۹ ° ۳۷ تا ′ ۳۵ ° ۳۷ شمالی گسترده شده است (شکل ۱). این منطقه بخشی از حوضه آبریز دریاچه ارومیه بوده و نقش مهمی در تأمین منابع آبی این دریاچه ایفا می‌کند. رودخانه شهرچای که از کوه‌های مرزی ایران و ترکیه سرچشمه می‌گیرد، منبع اصلی تغذیه‌کننده حوضه است و تأمین‌کننده بخشی از آب مورد نیاز شهر ارومیه می‌باشد. این منطقه در مرزهای زون تکتونیکی زاگرس و ایران مرکزی قرار داشته و ویژگی‌های زمین‌ساختی آن تحت تأثیر فعالیت‌های گسل‌های اطراف است. از جمله گسل‌های مهم منطقه می‌توان به گسل دریاچه ارومیه، گسل شمال و جنوب سلماس، گسل اشنویه و خطواره ارومیه اشاره کرد. گسل کوه شهیدان نیز به‌عنوان یکی از ساختارهای زمین‌ساختی تأثیرگذار، نقش مهمی در شکل‌گیری ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه دارد. این گسل‌ها، همراه با فعالیت‌های لرزه‌ای مشاهده شده، نشان‌دهنده شبکه‌ای از گسل‌های فعال و لرزه‌زا در این منطقه هستند (ملک‌زاده و همکاران، ۱۳۸۴).

حوضه‌آبریز شهرچای در یکی از استان‌های زلزله‌خیز ایران واقع شده و تحت تأثیر فعالیت‌های زمین‌ساختی قرار دارد. بررسی‌های لرزه‌خیزی منطقه نشان می‌دهد که این ناحیه در طول سال‌های گذشته شاهد زلزله‌های متعددی بوده است. از جمله مهم‌ترین زلزله‌های رخ داده در ارومیه می‌توان به زلزله سال ۲۸۸۸ قمری، زلزله ۷ ریشتری فروردین ۱۳۹۴ در سیلوانه، زلزله مرداد ۱۳۶۲ که دنباله زلزله اهر و ورزقان بود، و زلزله ۷/۹ ریشتری مهرماه ۱۳۶۴ در سیلوانه اشاره کرد. علاوه بر فعالیت‌های لرزه‌ای، شرایط آب‌شناسی منطقه نیز متأثر از این پدیده‌ها بوده است. مقایسه میزان بارش سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۸ با سطح تراز آب زیرزمینی نشان می‌دهد که فعالیت گسل‌ها نقش مهمی در تغییرات سطح آب زیرزمینی دارد (کیانی و یوسفی، ۱۳۹۶). با توجه به موقعیت این منطقه در تقاطع گسل‌های فعال و تأثیرات زمین‌ساختی مرتبط، مطالعه دقیق آن فرصتی برای بررسی تغییرات ژئومورفولوژیکی شبکه‌زهکشی و تحلیل ارتباط بین فعالیت‌های تکتونیکی و ناهنجاری‌های‌زهکشی فراهم می‌کند.

۳- مواد و روش‌ها

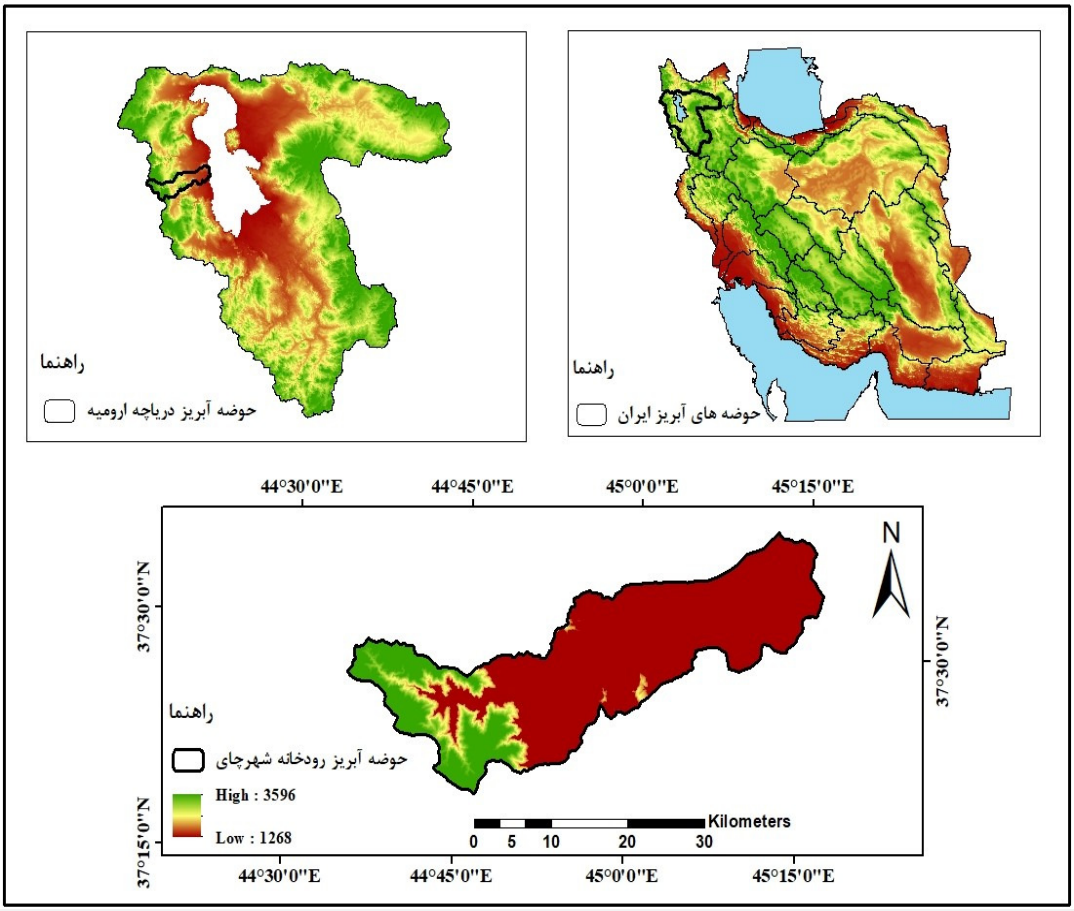
این تحقیق با هدف بررسی تأثیرات تکتونیکی بر شبکه‌های‌زهکشی حوضه‌آبریز شهرچای در چند مرحله سیستماتیک انجام شده است. در این بخش، مراحل جمع‌آوری داده‌ها، روش‌های تحلیل و مدل‌سازی، و چگونگی انتخاب شاخص‌های مورد بررسی به تفصیل ارائه شده است:

جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها: اطلاعات اولیه از منابع مختلف شامل کتب، رساله‌ها و مقالات علمی مرتبط با تکتونیک و ژئومورفولوژی منطقه جمع‌آوری شده است. همچنین، داده‌های نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی موجود برای منطقه از سازمان زمین‌شناسی و نقشه‌برداری تهیه شده است. مهم‌ترین داده‌های مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از:

نقشه‌های زمین‌شناسی: نقشه‌های زمین‌شناسی ارومیه، اشنویه، سیلوانا، و سرو (کنگجین) در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ جهت شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی منطقه.

نقشه‌های توپوگرافی: نقشه‌های ۱:۵۰۰۰۰ (۵۰۶۵، ۵۰۶۴، ۴۹۶۵، ۴۹۶۴) جهت تحلیل ویژگی‌های توپوگرافی منطقه.

مدل رقومی ارتفاعی: (DEM) داده‌های ارتفاعی با دقت ۱۰ متر از پایگاه USGS Earth Explorer استخراج و به‌عنوان داده پایه برای تحلیل‌های مکانی استفاده شده است.



شکل ۱. نقشه حوضه‌آبریز شهرچای ارومیه و موقعیت آن در حوضه‌های‌آبریز ایران

Fig. 1. The map of the Shahrchai River Basin in Urmia and its location within the river basins of Iran

روش تحلیل و پردازش داده‌ها: در این پژوهش، تحلیل داده‌ها با بهره‌گیری از ترکیبی از روش‌های تحلیل مکانی انجام شده است. مراحل پردازش شامل موارد زیر است:

تحلیل شبکه‌زهکشی: استخراج شبکه‌زهکشی از مدل رقومی ارتفاع (DEM) و بررسی الگوی جریان آبراهه‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS).

محاسبه شاخص‌های ژئومورفیک: ارزیابی شاخص‌های ژئومورفولوژیکی به‌منظور سنجش میزان تأثیرپذیری حوضه‌آبریز از فعالیت‌های تکتونیکی.

شاخص‌های ژئومورفیک و معیارهای انتخاب آن‌ها: شاخص‌های ژئومورفیک، به دلیل قابلیت استخراج سریع و دقیق داده‌های ضروری از نقشه‌های رقومی، به عنوان ابزارهای کلیدی در مطالعات تکتونیکی و تحلیل فرآیندهای مرتبط با فعالیت‌های زمین‌ساختی مطرح هستند (ادوارد و نیکلاس، ۲۰۲۲). این شاخص‌ها از آن جهت انتخاب شده‌اند که به‌طور مستقیم بر پویایی شبکه‌زهکشی و تغییرات ژئومورفولوژیکی منطقه تأثیرگذار هستند. در این تحقیق، به منظور بررسی ویژگی‌های هیدرومورفولوژیکی منطقه مورد مطالعه، از شاخص‌های ناهنجاری سلسله‌مراتبی (Δa)، تراکم ناهنجاری سلسله‌مراتبی (ga)، انشعابات (R)، نسبت انشعاب (Rb)، نسبت مستقیم انشعاب (Rbd)، درصد عدم‌تقارن حوضه (PAF)، نسبت شکل حوضه (BS) و میانگین طول آبراهه درجه ۱ (LN1) استفاده شده است (جدول ۱).

نحوه محاسبه شاخص‌های ژئومورفیک: در این پژوهش، تغییرات ژئومورفولوژیکی حوضه‌آبریز با استفاده از ترکیب داده‌های مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، نقشه‌های زمین‌شناسی و شاخص‌های ژئومورفیک مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. برای مدل‌سازی این تغییرات، ابتدا شاخص‌های مرتبط با ناهنجاری‌های شبکه‌زهکشی استخراج شدند. این فرآیند با بهره‌گیری از ابزارهای پیشرفته سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام گردید.

جدول ۱. خلاصه‌ای از شاخص‌های ژئومورفیک

Table 1. A summary of geomorphic indices.

شاخص	رابطه	توضیحات / رفرنس
شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی (Δa)[1]	$\Delta a = \frac{Ha_t}{N1}$ Δa= شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی، Ha_t= تعداد ناهنجاری‌های سلسله‌مراتبی، $N1$= تعداد واقعی آبراهه‌های رتبه ۱	این شاخص به‌منظور اندازه‌گیری ناهنجاری‌های شبکه‌زهکشی، زمانی که آبراهه‌ای از درجه پایین‌تر به درجه بالاتر وارد می‌شود (مانند ۳→۱، ۴→۱، ۵→۲) استفاده می‌شود. این اتصالات، ناهنجاری‌های سلسله‌مراتبی را نمایان می‌کند (گوارنیری و پیروتا، ۲۰۰۸؛ آونا و همکاران، ۱۹۶۷).
شاخص تراکم ناهنجاری سلسله‌مراتبی (ga)[2]	$ga = \frac{Ha_t}{A}$ ga = شاخص تراکم ناهنجاری سلسله‌مراتبی، Ha_t= تعدادناهنجاری سلسله‌مراتبی آبراهه برای کل حوضه، A= مساحت حوضه	شاخص تراکم ناهنجاری سلسله‌مراتبی برای ارزیابی ناهنجاری‌ها در شبکه‌زهکشی استفاده می‌شود و نسبت تعداد این ناهنجاری‌ها به مساحت کل حوضه را نشان می‌دهد. ناهنجاری‌ها زمانی رخ می‌دهند که آبراهه‌ها به جای پیوستن به آبراهه‌های بالاتر، به آبراهه‌های با درجه پایین‌تر متصل شوند (مانند اتصال آبراهه درجه ۳ به آبراهه درجه ۱) (چیکاچی و همکاران، ۱۹۸۶).
شاخص انشعابات (R)	$R = Rb - Rbd$ R= شاخص انشعابات، Rb= نسبت انشعابات حوضه، Rbd= نسبت مستقیم انشعابات	برای محاسبه این شاخص، تعداد آبراهه‌های درجه ۱ بر تعداد آبراهه‌های درجه بالاتر تقسیم می‌شود. این شاخص به تحلیل منظم یا غیرمنظم بودن ساختار شبکه‌زهکشی کمک می‌کند؛ حوضه‌های با نسبت انشعابات کمتر ساختار منظم‌تری دارند، در حالی که حوضه‌های با نسبت بالاتر نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی هستند (گوارنیری و پیروتا، ۲۰۰۸).
نسبت انشعاب (Rb)	$Rb(u-u+1) = \frac{Nu}{Nu+1}$ Rb= شاخص نسبت انشعاب، NU= تعداد آبراهه‌های رتبه ویژه، $Nu+1$= تعداد آبراهه‌های رتبه بالاتر	نسبت انشعابات برای هر درجه آبراهه با تقسیم تعداد آبراهه‌های آن درجه بر تعداد آبراهه‌های درجه بالاتر محاسبه می‌شود. سپس، نسبت انشعابات کل حوضه از میانگین این مقادیر به‌دست می‌آید. این شاخص نشان‌دهنده میزان آشفتگی ساختاری و الگوی‌زهکشی است. حوضه‌هایی با نسبت کمتر، ساختار منظم‌تری دارند، در حالی که نسبت‌های بالاتر نشان‌دهنده فعالیت‌های تکتونیکی و فرآیندهای تکاملی در شبکه‌زهکشی هستند (گوارنیری و پیروتا، ۲۰۰۸؛ آبدیده و همکاران، ۱۳۹۰؛ زرگرزاده و همکاران، ۱۳۸۶).
نسبت مستقیم انشعاب (Rbd)	$Rbd(u-u+1) = \frac{Ndu}{Nu+1}$ Rbd=شاخص نسبت مستقیم انشعاب، Ndu= تعداد آبراهه‌های رتبه ویژه که به رتبه بالاتر جریان می‌یابد، $Nu+1$= تعدادآبراهه‌های رتبه بالاتر	این شاخص نسبت تعداد آبراهه‌های هر درجه که به طور مستقیم وارد درجه بالاتر می‌شوند، به تعداد کل آبراهه‌های آن درجه بالاتر نشان می‌دهد. این ابزار مهم در ارزیابی ساختار شبکه‌زهکشی و تحلیل فعالیت‌های تکتونیکی، به‌ویژه برای بررسی ارتباط مستقیم آبراهه‌های درجه پایین با درجه‌های بالاتر، به‌کار می‌رود (بارونی و همکاران، ۲۰۰۵).
شاخص درصد عدم‌تقارن حوضه (AF)[3]	$AF = \frac{AR}{AT} * 100$ AF= شاخص درصد عدم‌تقارن حوضه، AR= مساحت سمت بزرگتر رودخانه اصلی، AT= مساحت کل حوضه به کیلومترمربع	آبراهه‌های حوضه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) استخراج و مسیر رودخانه اصلی تعیین می‌شود. سپس مساحت‌های مختلف حوضه محاسبه و شاخص درصد عدم‌تقارن حوضه محاسبه می‌شود. مقدار این شاخص بیش از ۵۰ نشان‌دهنده تمایل رودخانه به سمت چپ و کمتر از ۵۰ به سمت راست است (کلمنت و بروک، ۲۰۰۸).
شاخص نسبت شکل حوضه (BS)[4]	$BS = \frac{BL}{Bw}$ BS= شاخص کل حوضه، BL= اندازه طول حوضه از انتهایی‌ترین مقسم آب تا خروجی حوضه، Bw= پهنای حوضه در پهن‌ترین قسمت	این شاخص تغییرات شکل هندسی حوضه‌ها را در ارتباط با فعالیت‌های زمین‌ساختی و زمین‌شناسی بررسی می‌کند. مقادیر بالا نشان‌دهنده حوضه‌های کشیده در مناطق فعال زمین‌ساختی و مقادیر پایین‌تر نمایانگر حوضه‌های دایره‌ای در مناطق غیرفعال است (بوربانک و اندرسون، ۲۰۰۱؛ ده‌بزرگی و همکاران، ۲۰۱۰).
شاخص میانگین طول آبراهه درجه۱ (LN1)[5]	$LN1 = \frac{\sum L1}{N}$ LN1= شاخص میانگین طول آبراهه درجه ۱، ∑L1 = مجموع طول آبراهه درجه ۱ ، N = تعداد آبراهه درجه ۱	نشان‌دهنده طول و تعداد آبراهه‌های درجه ۱ است که به‌عنوان معیاری برای ارزیابی فعالیت تکتونیکی استفاده می‌شود (زوچیویچ، ۱۹۸۸).

[1] Hierarchical anomaly index.
[2] density of hierarchical anomaly.
[3] percent of basin asymmetry.
[4] Basin Shape Ratio.
[5] mean lenght of first order streams

۴- یافته‌ها و بحث

شاخص‌های کمی گسل‌های فعال بر اساس شواهد ژئومورفولوژی

این پژوهش به تحلیل تأثیرات تکتونیکی بر ناهنجاری‌های شبکه‌زهکشی در حوضه‌آبریز شهرچای می‌پردازد که یکی از جنبه‌های مهم در زمین‌شناسی و مطالعات زمین‌ساختی است. برای دستیابی به این هدف، ویژگی‌های طبیعی منطقه، از جمله توپوگرافی، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی، از طریق نقشه‌های رقومی شناسایی شده و اطلاعات مربوط به ویژگی‌های تکتونیکی جمع‌آوری گردید. در این مطالعه، ابتدا تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی بر دره‌ها و مسیرهای رودخانه‌ها با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک بررسی شد. این شاخص‌ها به‌عنوان ابزار اصلی برای ارزیابی اثرات تکتونیکی بر دره‌ها و مسیرهای جریان رودخانه‌ها به کار گرفته شدند. این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که فعالیت‌های تکتونیکی تأثیر قابل‌توجهی بر تغییرات هندسی دره‌ها و الگوی شبکه‌زهکشی در منطقه داشته است.

۱- شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی: در ابتدا، برای محاسبه ناهنجاری‌های سلسله‌مراتبی آبراهه‌ها (Ha_t)، تعداد آبراهه‌ها با استفاده از روش استرالر تعیین شد. سپس، شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی (Δa) محاسبه گردید. براساس مقادیر محاسبه شده، مقدار ۱/۳۴ برای تعداد آبراهه‌های درجه ۱ به‌دست آمد (جدول ۲). این نشان‌دهنده تعداد آبراهه‌هایی است که برای اصلاح ناهنجاری‌های سلسله‌مراتبی باید به شبکه‌زهکشی اضافه شوند. این شاخص به تحلیل ناهنجاری‌های شبکه‌زهکشی کمک کرده و امکان بررسی تأثیرات تکتونیکی را در منطقه فراهم می‌سازد. به‌طور کلی، افزایش مقدار شاخص Δa بیانگر افزایش ناهنجاری‌های سلسله‌مراتبی است که می‌تواند ناشی از جابجایی‌های زمینی و فعالیت‌های تکتونیکی در منطقه باشد. مقدار این شاخص معمولاً با افزایش فعالیت‌های تکتونیکی مرتبط است، زیرا ناهنجاری‌ها در شبکه‌زهکشی تحت تأثیر این فعالیت‌ها نمایان می‌شوند. با این حال، باید توجه داشت که مقادیر استاندارد دقیقی برای این شاخص وجود ندارد و مقادیر آن به ویژگی‌های خاص هر منطقه بستگی دارد.

۲- شاخص تراکم ناهنجاری سلسله‌مراتبی: مقدار شاخص تراکم ناهنجاری سلسله‌مراتبی برای حوضه مورد مطالعه برابر با ۱/۳۳ است (جدول ۲). این مقدار نشان‌دهنده تعداد ناهنجاری‌ها در هر واحد مساحت حوضه است و به‌عنوان شاخصی از فعالیت‌های تکتونیکی در منطقه تلقی می‌شود. افزایش فعالیت‌های تکتونیکی در یک منطقه می‌تواند منجر به افزایش تعداد ناهنجاری‌های سلسله‌مراتبی در شبکه‌زهکشی و در نتیجه افزایش مقدار شاخص تراکم ناهنجاری شود. مقدار دقیق این شاخص که نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی باشد، به ویژگی‌های خاص هر منطقه بستگی دارد. از آنجا که مقادیر استاندارد دقیقی برای این شاخص وجود ندارد، مقایسه مقادیر شاخص تراکم ناهنجاری سلسله‌مراتبی در مناطق مختلف و مطالعه ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدرولوژی مشابه می‌تواند به ارزیابی میزان فعالیت‌های تکتونیکی کمک کند. به‌طور کلی، با افزایش فعالیت‌های تکتونیکی و تغییرات ساختاری ناشی از آن، ناهنجاری‌های بیشتری در شبکه‌زهکشی مشاهده خواهد شد و شاخص تراکم ناهنجاری بالاتر خواهد بود.

۳- شاخص انشعابات

۳-۱- شاخص نسبت انشعابات: برای تعیین شاخص انشعابات (Rb)، ابتدا تعداد آبراهه‌های هر درجه محاسبه شد. این شاخص که توسط هورتون (۱۹۴۵) معرفی شده، از تقسیم تعداد آبراهه‌های یک درجه مشخص بر تعداد آبراهه‌های درجه بلافاصله بالاتر محاسبه می‌شود. سپس میانگین این نسبت‌ها برای تمام درجات آبراهه، شاخص کلی انشعابات حوضه را تعیین می‌کند. مقدار Rb نمایانگر ویژگی‌های هندسی و تکاملی شبکه‌زهکشی بوده و تحت تأثیر عواملی مانند لیتولوژی، اقلیم و فرآیندهای تکتونیکی قرار دارد. در حوضه‌هایی که مقدار Rb کمتر است، شبکه‌زهکشی معمولاً منظم‌تر و متعادل‌تر بوده و نشان‌دهنده پایداری ژئومورفولوژیکی و کاهش تأثیر فعالیت‌های زمین‌ساختی است. در مقابل، مقدار بالای Rb ممکن است نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی، عدم تعادل در شبکه‌زهکشی یا شرایط لیتولوژیکی خاص باشد. بر اساس داده‌های جدول ۳، مقدار شاخص انشعابات (Rb) برای منطقه مورد مطالعه ۱/۷۴۵ محاسبه شده است. این مقدار در مقایسه با مناطق پایدار زمین‌ساختی، نسبتاً بالاتر بوده و می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر فرآیندهای تکتونیکی بر توسعه شبکه‌زهکشی باشد. مقایسه این مقدار با مطالعات مشابه در مناطق فعال تکتونیکی نشان می‌دهد که احتمالاً

منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر نیروهای زمین‌ساختی قرار داشته و شبکه‌زهکشی آن در حال تکامل است.

۳-۲- شاخص نسبت انشعابات مستقیم و تحلیل تکتونیکی: برای بررسی دقیق‌تر پویایی شبکه‌زهکشی، شاخص نسبت انشعابات مستقیم (Rbd) نیز محاسبه شد. این شاخص از تقسیم تعداد آبراهه‌های هر درجه که مستقیماً به درجه بالاتر متصل می‌شوند، بر کل آبراهه‌های همان درجه به دست می‌آید. مقدار Rbd در منطقه مورد مطالعه برابر با ۰/۳۳۲۵ است که در جدول ۴ ارائه شده است. با استفاده از مقادیر Rb و Rbd، شاخص کلی انشعابات (R) محاسبه شد که مقدار آن ۱/۴۱ به‌دست آمد. این مقدار، در مقایسه با مناطق دارای فعالیت‌های زمین‌ساختی کمتر، نشان‌دهنده تأثیر احتمالی فرآیندهای تکتونیکی بر تحول شبکه‌زهکشی منطقه است. وجود تعداد بالای آبراهه‌های درجه پایین که مستقیماً به درجات بالاتر متصل شده‌اند، می‌تواند بیانگر تأثیر فعالیت‌های زمین‌ساختی بر تکامل شبکه‌زهکشی باشد.

جدول ۲. پارامترهای Ha ، Δa و ga در حوضه‌های مورد مطالعه

Table 2. Parameters Ha, aΔ and ga in the studied basins

مسیر	تعداد آبراهه‌ها ضرب در حداقل آبراهه درجه۱ لازم برای منظم کردن شبکه $(Ha_{i\to j} \times Ns_{i\to j})$
$\mathbf{1 \to 3}$	90
$\mathbf{1 \to 4}$	153
$\mathbf{1 \to 5}$	455
$\mathbf{2 \to 4}$	34
$\mathbf{2 \to 5}$	168
$\mathbf{3 \to 5}$	52
Ha	952
Δa	1.348441926
ga	1.332176541

جدول ۳. تعداد آبراهه‌ها و نسبت انشعابات در منطقه مورد مطالعه

Table 3. The number of streams and the bifurcation ratio in the study area.

درجه آبراهه	تعداد آبراهه
1	1103
2	730
3	266
4	128
5	197
Rb	1.74525

جدول ۴. تعداد آبراهه‌های هر درجه که مستقیماً به یک درجه بالاتر وارد می‌شوند، نسبت مستقیم انشعابات (Rbd) و شاخص انشعابات (R) در منطقه مورد مطالعه

Table 4. The number of streams of each order directly connecting to the next higher order, the Direct Bifurcation Ratio (Rbd), and the Bifurcation Index (R) in the study area

مسیر آبراهه	تعداد آبراهه
$\mathbf{1 \to 2}$	500
$\mathbf{2 \to 3}$	113
$\mathbf{3 \to 4}$	24
$\mathbf{4 \to 5}$	7
Rbd	0.3325
R=Rb-Rbd	1.41275

۴- شاخص عدم‌تقارن حوضه زهکشی (فاکتور عدم تقارن): از مدل رقومی ارتفاع (DEM) برای استخراج آبراهه‌ها و شناسایی مسیر اصلی رودخانه استفاده شد. سپس مساحت‌های مختلف حوضه، از جمله مساحت سمت راست و مساحت کل حوضه، محاسبه گردید (جدول ۵). شاخص عدم‌تقارن جهت حرکت رودخانه را نسبت به شکل کلی حوضه تعیین می‌کند. چنانچه مقدار این شاخص بیشتر از ۵۰ باشد، نشان‌دهنده تمایل رودخانه به جریان در سمت چپ حوضه است، در حالی که مقدار کمتر از ۵۰ بیانگر تمایل رودخانه به سمت راست حوضه می‌باشد. این شاخص قادر است تغییرات ژئومورفولوژیکی و اثرات احتمالی فعالیت‌های تکتونیکی در منطقه را آشکار سازد. طبق محاسبات به‌دست‌آمده، مقدار شاخص عدم‌تقارن (AF) برای حوضه مورد مطالعه برابر با ۵۴/۳۹ است. این مقدار نشان‌دهنده عدم‌تقارن قابل توجه در جهت جریان رودخانه اصلی است که تمایل بیشتری به سمت چپ حوضه دارد. که می‌تواند نشانه‌ای از تغییرات ساختاری ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی در منطقه باشد. در این راستا، وجود چنین ویژگی‌هایی در رودخانه‌ها می‌تواند به‌عنوان معیاری برای شناسایی نواحی فعال زمین‌شناسی، به‌ویژه در مناطقی که با خطرات مرتبط با زمین‌لرزه و گسل‌زدگی مواجه هستند، مورد استفاده قرار گیرد.

۵- نسبت شکل حوضه‌زهکشی: شاخص BS یک ابزار مفید برای ارزیابی ویژگی‌های هندسی حوضه‌های‌زهکشی است و می‌تواند به ما کمک کند تا تغییرات کشیدگی و فرم حوضه‌ها را شبیه‌سازی کنیم. به‌طور خاص، زمانی که مقدار شاخص BS بیشتر از یک حد مشخص باشد، نشان‌دهنده کشیدگی یا خمیدگی حوضه است. در این حالت، حوضه از شکلی نزدیک به دایره یا مستطیل به شکلی غیرمنظم و کشیده تبدیل می‌شود. این کشیدگی معمولاً ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی، فرسایش، رسوب‌گذاری یا دیگر تغییرات زمین‌شناسی است. بر اساس داده‌های ارائه شده در جدول ۶، مقدار شاخص BS در حوضه مورد مطالعه برابر با ۵/۶۲ کیلومتر محاسبه شده است. این مقدار نشان‌دهنده کشیدگی نسبتاً قابل توجه در شکل حوضه است. در حوضه‌هایی که چنین کشیدگی‌هایی مشاهده می‌شود، احتمالاً فعالیت‌های تکتونیکی مؤثر است و این ویژگی به عنوان نشانه‌ای از تغییرات ساختاری و ژئومورفولوژیکی در منطقه محسوب می‌شود. به‌ویژه در این حوضه، وجود کشیدگی می‌تواند ارتباط مستقیم با فعالیت‌های زمین‌شناسی و احتمال وقوع پدیده‌هایی مانند زمین‌لرزه و گسل‌زدگی در منطقه داشته باشد.

جدول ۵. محاسبه فاکتور عدم‌تقارن حوضه‌های‌زهکشی منطقه مورد مطالعه

Table 5. Calculation of the Asymmetry Factor for the Drainage Basins in the Study Area

مساحت سمت بزرگ‌تر رودخانه اصلی AR(KM)	مساحت کل حوضه AT(KM)	شاخص درصد عدم‌تقارن حوضه AF(KM)	کلاس فعالیت زمین‌ساختی
388.69	714.62	54.39	فعال

جدول ۶. مقدار شاخص BS و کلاس فعالیت تکتونیک در حوضه منطقه مورد مطالعه

Table 6. The value of the BS index and the tectonic activity class in the basin of the study area.

اندازه طول حوضه از انتهایی‌ترین مقسم آب تا خروجی حوضه BL(KM)	پهنای حوضه در پهن‌ترین قسمت BW(KM)	شاخص BS(KM) کل حوضه	کلاس فعالیت زمین‌ساختی
79.81	14.20	5.62	فعال

۶- شاخص میانگین طول آبراهه درجه ۱: بر اساس مطالعات انجام شده، طول کل آبراهه‌های درجه ۱ در منطقه ۵۲۹/۵۳۵ کیلومتر است و تعداد این آبراهه‌ها حدود ۱۰۱۳ عدد برآورد شده است. این نتایج نشان‌دهنده ویژگی‌های اصلی توزیع شبکه زهکشی در منطقه هستند که به‌ویژه در تحلیل ساختار هیدرولوژیکی منطقه می‌توانند مفید باشند. برای محاسبه میانگین طول آبراهه‌های درجه ۱، طول کل آبراهه‌ها بر تعداد کل آن‌ها تقسیم می‌شود. از این‌رو، میانگین طول آبراهه‌های درجه ۱ برابر با ۰/۵۱۷ کیلومتر به‌دست آمده است. این مقدار میانگین می‌تواند به‌عنوان یک شاخص مهم در تحلیل روند تکامل شبکه‌زهکشی و بررسی تغییرات ساختاری در منطقه استفاده شود. شاخص میانگین طول آبراهه‌های درجه ۱ نه تنها برای ارزیابی ساختار شبکه‌زهکشی مفید است، بلکه

می‌تواند ارتباطات مهمی با فرآیندهای تکتونیکی و ژئومورفولوژیکی منطقه برقرار کند. به‌ویژه، تغییرات در طول میانگین آبراهه‌ها ممکن است نشان‌دهنده تأثیرات فعالیت‌های تکتونیکی بر شبکه‌زهکشی باشد. در مناطقی که تحت تأثیر فرآیندهای تکتونیکی قرار دارند، ممکن است طول آبراهه‌ها به‌طور غیرطبیعی افزایش یابد، که این نشان‌دهنده تغییرات ساختاری مانند جابجایی‌های زمینی یا تغییرات در مسیر رودخانه‌ها باشد.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تحلیل شاخص‌های‌ژئومورفولوژیکی در این پژوهش، بیانگر فعالیت‌های تکتونیکی قابل توجه در منطقه مورد مطالعه است. شاخص‌های به کار رفته نشان‌دهنده ناهنجاری‌های ساختاری و شواهدی از تکتونیکی فعال در این منطقه هستند.

شاخص Δa با مقدار ۱/۳۴، ناهنجاری‌های ساختاری مرتبط با فعالیت‌های تکتونیکی را نشان می‌دهد. تحلیل تراکم ناهنجاری‌ها، با مقدار ۱/۳۳، به‌ویژه در نواحی فعال زمین‌ساختی، احتمال بروز خطرات زمین‌شناسی ناشی از این فعالیت‌ها را مورد تأکید قرار می‌دهد. شاخص‌های انشعاب (Rb و Rbd) به‌ترتیب با مقادیر ۱/۷۴ و ۰/۳۳، نشان‌دهنده نواحی با ساختارهای کمتر آشفته و فعالیت‌های تکتونیکی محدودتر در برخی مناطق هستند. در مقابل، شاخص کلی انشعاب (R) برابر با ۱/۴۱، نشانگر فعالیت‌های تکتونیکی برجسته در سطح منطقه است. علاوه بر این، شاخص عدم‌تقارن حوضه، تأثیرات فعالیت‌های تکتونیکی را بر مسیر آبراهه‌ها تأیید می‌کند. شاخص شکل حوضه، با مقدار ۵/۶۲، نشان‌دهنده تأثیرات قابل توجه تکتونیکی در نواحی فعال زمین‌ساختی است. در نهایت، میانگین طول آبراهه‌های درجه ۱ برابر با ۰/۵۱۷ کیلومتر است که نشان‌دهنده تکامل ناقص شبکه‌آبراهه‌ها و تأثیرات فعالیت‌های تکتونیکی در منطقه می‌باشد.

مقایسه نتایج این تحقیق با پژوهش‌های مشابه، مانند اسماعیلی (۱۳۹۴) و تقوی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۶)، نشان‌دهنده تأثیرات چشمگیر فعالیت‌های تکتونیکی بر تغییرات شبکه‌زهکشی و ساختار حوضه‌ها است. همچنین، مشابه پژوهش‌های کرمی و همکاران (۱۳۹۷) و مالک و موهانتی (۲۰۰۷)، تأثیرات فعالیت‌های تکتونیکی بر تغییر مسیر رودخانه‌ها و ساختار شبکه‌زهکشی به‌طور مشهود قابل مشاهده است. فعالیت‌های تکتونیکی از طریق فرآیندهایی چون بالاآمدگی زمین و جابجایی گسل‌ها نقش کلیدی در ایجاد ناهنجاری‌ها در شبکه‌زهکشی ایفا می‌کنند. این فرآیندها می‌توانند موجب تغییر مسیر جریان‌های سطحی، افزایش یا کاهش تعداد آبراهه‌ها و تغییرات در طول آن‌ها شوند. در مناطقی که فعالیت‌های تکتونیکی به‌طور قابل‌توجهی رخ می‌دهند، ویژگی‌های هیدرولوژیکی مانند تراکم آبراهه‌ها یا عدم‌تقارن در ساختار شبکه‌زهکشی ممکن است تحت تأثیر مستقیم یا غیرمستقیم این فعالیت‌ها قرار گیرند. این تغییرات می‌توانند در تحلیل حرکات زمین و دینامیک سطحی منطقه اهمیت ویژه‌ای داشته باشند.

شاخص‌های مورفومتری مانند طول متوسط آبراهه‌های درجه یک، تراکم آبراهه‌ها و شاخص‌های انشعاب، ابزارهای مؤثری در بررسی میزان فعالیت‌های تکتونیکی به شمار می‌آیند. این شاخص‌ها تغییرات ساختاری در شبکه‌زهکشی را بازتاب می‌دهند و ارتباط مستقیمی با تکامل مورفولوژی منطقه دارند. طول آبراهه‌های درجه یک می‌تواند تأثیرات فعالیت‌های تکتونیکی را بر تغییرات دینامیکی سطح زمین آشکار سازد. علاوه بر این، شاخص‌های دیگری همچون تراکم‌زهکشی و ناهنجاری‌های‌شبکه، اطلاعات دقیق و قابل‌توجهی درباره میزان تحرکات تکتونیکی منطقه ارائه می‌دهند. یافته‌های این پژوهش به‌طور جامع تأثیرات قابل‌توجه فعالیت‌های تکتونیکی بر ساختار و رفتار شبکه‌زهکشی منطقه را نمایان می‌سازد. این نتایج می‌توانند اطلاعات ارزشمندی برای ارزیابی خطرات زمین‌شناسی و بهبود برنامه‌ریزی‌های مربوط به مدیریت منابع طبیعی و بحران‌های طبیعی در آینده فراهم آورند. در نهایت، تحلیل‌ها نشان می‌دهند که این تحقیق به‌طور کلی به اهداف خود، که ارزیابی تأثیرات فعالیت‌های تکتونیکی بر شبکه‌زهکشی و ویژگی‌های زمین‌شناسی است، دست یافته است. هرچند در برخی نواحی تأثیرات فعالیت‌های تکتونیکی کمتر از سایر مناطق مشابه بوده است، این تفاوت‌ها احتمالاً به ویژگی‌های خاص منطقه، همچون توپوگرافی، موقعیت جغرافیایی گسل‌ها و شرایط اقلیمی و فرسایشی مربوط می‌شود. بنابراین، نتایج این تحقیق علاوه بر هم‌راستایی با یافته‌های پیشین، تفاوت‌ها و ویژگی‌های خاص منطقه مطالعه‌شده را نیز روشن کرده است.

References

Abdideh, M., Qorashi, M., Rangzan, K., Aryan, M (2001) Assessment of Relative Active Tectonics using Morphometric Analysis, Case Study of Dez River (Southwestern, Iran). Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 20 (80): 33-46. doi: 10.22071/gsj.2011.55134. (in persian).

Avena, G. C., Giuliano, G., Lupia Palmieri, E (1967) Sulla valutazione quantitativa della gerarchizzazione ed evoluzione dei reticoli fluviali. Boll. Soc. Geol. Ital, 86: 781–7965.

Baroni, C., Noti, V., Ciccacci, S., Righini, G., Salvatore, M. C (2005) Fluvial origin of the valley system in northern Victoria Land (Antarctica) from quantitative geomorphic analysis. GSA Bulletin, 117(1): 212–228. doi:10.1130/B25529.1.

Bayati Khatibi, M (2009) Identification of neotectonic activities in the Qaranqoochay watershed using geomorphic and morphotectonic indicators. Geographical Space Journal, 9(25): 15–32. (in persian).

Burbank, D. W., Anderson, R. S (2011) Tectonic geomorphology. Wiley-Blackwell. Edition: 2.

Burbank, D. W Anderson, R. S (2001) Tectonic Geomorphology. Blackwell Science Ltd., Australia, 160.

Camafort, M., Pérez-Peña, J. V., Booth-Rea, G., Melki, F., Gràcia, E., Azañón, J. M., ... & Ranero, C. R (2020) Active tectonics and drainage evolution in the Tunisian Atlas driven by interaction between crustal shortening and mantle dynamics. Geomorphology, 351: 106954.

Ciccacci, s., Fredi, P., Lupia Palmieri, E., Pugliese, F (1896) Indirect evaluation of erosion entity in dranage basins through geomorphic, climatic and hydrological parameters. Intenational Geomorphology, 233-219.

Clement, A. J. H and Brook, M. S (2008) Tilting of active folds and drainage asymmetry on the Manawatu Anticlines, New Zealand: a preliminary investigation. Earth Surface Processes and Landforms, 33(11): 1787–1795. doi:10.1002/esp.1632.

Dehbozorgi, M., Pourkermani, M., Arian, A. A., Matkan. H., Motamedi, A. Hosseiniasl (2010) Quantitative analysis of relative tectonic activity in the sarvestan area, central Zagros, Iran. Jornal Geomorphology, 121 (3): 329– 341. doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.05.002.

Edward, K. A., & Nicholas, P (2002) Active tectonics: earthquakes, uplift, and landscape.

Esmaili, R (2012) The role of morphotectonic on river drainage network anomaly, Northen Alborz. RESEARCHES IN EARTH SCIENCES, 3(9): 1-13. doi: 20.1001.1.20088299.1391.3.1.1.4. (in persian)/

Gioia, D., Corrado, G., Danese, M., Minervino Amodio, A., Schiattarella, M (2023) Post-lacustrine evolution of a tectonically-controlled intermontane basin: Drainage network analysis of the Mercure basin, southern Italy. Frontiers in Earth Science, 11: 1112067. doi:10.3389/feart.2023.1112067.

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(3): 260-273. doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.013.

Habousha, K., Goren, L., Nativ, R., Gruber, C (2023) Plan-form evolution of drainage basins in response to tectonic changes: Insights from experimental and numerical landscapes. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 128(3): 1-24. doi:10.1029/2022JF006876.

Haghipoor, A., Aghanabati, A (1976) Geological map of the Sarv area (1:250,000). Geological Survey and Mineral Explorations of Iran.

Haj Mollali, A., Tahuneh, M., Shokri, S (2006) Geological map of the Silvana quadrangle (1:100,000). Geological Survey and Mineral Explorations of Iran.

Horton, R. E (1945) Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological society of America bulletin, 56(3): 275-370.

karami, F., rajabi, M., abazari, K (201) Analyzing the Drainage Networks Anomalies and its relation with Active Tectonics in the Basin of Northern Tabriz. Quantitative Geomorphological Research, 7(1): 30-47. doi: 20.1001.1.22519424.1397.7.1.3.7. (in persian).

Kiani, T., & Yousefi, Z (2018) Effect of Active Faults on the Groundwater Level of Shaharchay Basin in Urmia. Journal of Geographical Sciences, 17 (47): 61-75.

Malekzadeh, T., Sharifi, J., & Elyasi, E (2005) Assessment of Earthquake Hazard in the Western Azerbaijan Region (Urmia County). Proceedings of the First Conference on Earthquake in Doroud - Past, Present, Future, Doroud, Iran.

Malik, J. N., & Mohanty, C (2007) Active tectonic influence on the evolution of drainage and landscape: geomorphic signatures from frontal and hinterland areas along the Northwestern Himalaya, India. Journal of Asian Earth Sciences, 29(5-6): 604-618.

Naqizadeh, R., Haqfarshi, A., Ghalamghash, J (2003) Geological map of Oshnavieh quadrangle (1:100,000). Geological Survey of Iran.

Saha, U. D., Bhattacharya, H. N., & Islam, A (2024) Neotectonic impact on drainage development in the Eastern Himalayan foreland basin. Geomorphology, 462: 109328.

Saha, U. D., Bhattacharya, H. N., Islam, A (2024) Neotectonic impact on drainage development in

the Eastern Himalayan foreland basin. Geomorphology, 462: 109328. doi:10.1016/j.geomorph.2024.109328.

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(2): 250-260.

Sultani-Sisi, G.-A., Amini-Azar, R., Yousefi-Rad, A., Jalalzadeh, M (2008) Geological map of the Urmia quadrangle (1:100,000). Geological Survey of Iran.

Taghavi-Moghaddam, E., Bahrami, S., Zangeneh-Asadi, M. A (2017) Efficiency of Indicators to Geomorphometry Drainage Basins for Evaluate the Tectonic Active Baghrod Basins, Bojan, Zavin and Sarrod of North East Ira. Geographical Planning of Space, 7(25): 103-120. (in persian).

Tebar, V. B., Bonasera, M., Racano, S., and Fubelli, G (2023) Assessment of Quaternary variations of the drainage pattern through morphotectonic investigations in Piedmont (North-western Italy) (No. EGU23-5412). Copernicus Meetings.

Valkanou, K., Karymbalis, E., Tsanakas, K., Soldati, M., Papanastassiou, D., Gaki-Papanastassiou, K (2022) Stream piracy and tectonic control on the evolution of drainage networks: A case study from the Island of Evia, Greece (No. ICG2022-366). Copernicus Meetings. doi:10.5194/icg2022-366.

Wani, A. A., Bali, B. S., Bhat, G. R., & Hussain, N (2020) Impact of tectonics on drainage network evolution of Suru basin, Kargil N/w Himalaya, Jammu and Kashmir, India. Environmental Earth Sciences, 79: 1-13.

Yaaqoub, A., Essaifi, A., Clementucci, R., Ballato, P., Faccenna, C (2022) Drainage network as an indicator of tectonic evolution of mountain belts: insight from the Middle Atlas (Morocco). In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU22-6048). doi: 10.5194/egusphere-egu22-6048.

Zargarzadeh, M., Rangzan, K., Cherchi, A., Ehsan, A (2007) Study of active tectonics in the Zagros region using geomorphic indices and morphometric parameters in GIS and remote sensing. 26th Earth Sciences Conference, Geological Survey of Iran. (in persian)

Zuchiewicz, w (1889) Quaternary tectonics of the Quter west Carpathians, Poland. Tectonophysics, 297 (1-4): 121-132.

Analysis of the Impact of Tectonic Activities on Drainage Network Anomalies in the Shaharchay Watershed, Urmia Using Geomorphic Indices

F. Hemmati *[1], S. Seyyedahmadie[2], and A. Alizadeh [3]

1- Dept., of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran
2- M. Sc., Technical and Soil Mechanics Laboratory, Maku, Iran
3- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

* **F.Hemmati@cfu.ac.ir**

Recieved: 2024.12.13 Accepted: 2025.3.8

Abstract

This research examines the impact of tectonic activities on the drainage network anomalies in the Shaharchay watershed in northwestern Iran (Urmia). The study area exhibits distinct drainage patterns due to tectonic activities and geological changes. The objective of this study is to identify and analyze the relationship between tectonic activities and drainage network changes using morphometric analysis tools. For this purpose, tools such as a 10-meter resolution Digital Elevation Model (DEM), geological and topographical maps, and various geomorphic indices were used. The analytical method includes calculating indices such as Hierarchical Anomaly (Δa) and Hierarchical Anomaly Density (ga) to assess tectonic activities and analyze their correlation with drainage network changes. Additionally, indices such as Bifurcation Ratio (Rb), Direct Bifurcation Ratio (Rbd), Basin Asymmetry Factor (PAF), Basin Shape Ratio (BS), and Mean Length of First-Order Streams (LN1) were used to identify structural features and tectonic trends. The results indicate that the values of Hierarchical Anomaly indices (1.34) and Hierarchical Anomaly Density (1.33) suggest the presence of structural anomalies and significant tectonic activities in the area. The analysis of the Bifurcation Ratio index (R = 1.41) indicates high tectonic activity and the lack of drainage network development in certain areas. Furthermore, the Basin Asymmetry Factor (PAF = 54.39) confirms the inclination of streams toward the left bank and the likelihood of tectonic activities in this part. The Basin Shape Ratio (BS = 5.62) and the Mean Length of First-Order Streams (LN1 = 0.517 km) also indicate an undeveloped drainage network affected by active tectonics. The findings of this research demonstrate that tectonic activities have a significant impact on the region's drainage patterns. These findings can be useful in assessing geological hazards such as slope processes and in development planning and crisis management in this watershed.

Keywords: Tectonics, Drainage Network Anomalies, Shahrchay Watershed, Geomorphic Analysis, Drainage Evolution

Introduction

The relationship between tectonics and drainage network anomalies is a key topic in geology, providing crucial information about the tectonic history of active areas. Drainage networks, as one of the most sensitive geomorphological systems, respond to tectonic changes and can reveal signs of tectonic activities such as changes in water flow direction, river deviation, and channel anomalies. These features are especially prominent near active faults, where tectonic movements cause changes in slope, flow patterns, and distribution of ranges.

The formation and evolution of drainage networks are influenced by two major processes: the uplift of rock formations and erosion. These processes can alter drainage patterns and provide identifiable signs of the region's tectonic history. For example, changes in the rate and speed of uplift lead to changes in drainage patterns, which can result in the diversion of main flows, changes in river angles, or the emergence of break points in the flow path. Such phenomena have been clearly observed in regions like the Middle Atlas, which have complex tectonic histories. Recent research in regions such as northwestern Italy, central Greece, southern Apennines, and the Middle Atlas has shown that neotectonic activities have had significant impacts on drainage patterns and the formation of their anomalies. These studies emphasize that changes due to active tectonics can include river flow diversion, increased or decreased

erosion intensity, and the creation of unnatural slopes in river paths. Drainage networks are among the most important natural systems for water resource management and the formation of geological landscapes. These networks are influenced by a set of factors, including tectonic activities, erosion processes, and climatic changes. In areas with high tectonic activity, drainage networks are not only indicators of tectonic changes but also reflect dynamic Earth processes. These reflections include phenomena such as changes in water flow paths, river deviation, and the creation of various anomalies in drainage network structures. The Shahrchay watershed, located in northwestern Iran, due to its unique geographical and geological position and proximity to active faults such as the Tabriz fault, is an ideal environment for studying tectonic impacts on drainage networks. This region, with a long history of tectonic activities, has caused anomalies such as changes in river slopes, basin asymmetry, and deviation of main and secondary river branches in response to tectonic movements.

This study aims to identify and analyze the relationship between tectonic activities and changes in the drainage network, utilizing morphometric analysis tools in the Urmia City Chahchai watershed. Given the importance of water resource management and the need for sustainable planning for regional development, understanding the precise impacts of tectonics on drainage networks is essential. These impacts can cause significant changes in river paths, water resource distribution, and the stability of local ecosystems.

Materials and Methods

Primary research data were collected from various sources, including books, theses, and scientific articles related to the region's tectonics and geomorphology. Geological maps of Urmia, Oshnaviyeh, Silvana, and Serow (Kangjin) at a scale of 1:100,000 and topographic maps at a scale of 1:50,000 were used for this purpose. Additionally, a Digital Elevation Model (DEM) with a 10-meter resolution was obtained from reliable sources and processed for subsequent analyses. Geomorphic indices such as the asymmetry factor, valley height-to-width ratio, river sinuosity, and drainage network slope were selected for analysis. Collected spatial data were analyzed using ArcGIS software. This analysis included preparing slope maps, river longitudinal profiles, and calculating morphometric indices. The GIS analysis results were compared and interpreted with the region's geological data to clarify the role of tectonics in creating drainage network anomalies.

Results and Discussion

This research examined the impact of tectonic activities on valleys and river paths using geomorphic indices. Indices Δa (1.34) and hierarchical anomaly density (1.33) indicate the presence of structural anomalies and significant tectonic activity in the region. The bifurcation ratio (Rb) and direct bifurcation ratio (Rbd) with values of 1.74 and 0.33, respectively, indicate a lack of structural disturbance in certain areas and less tectonic activity. However, the overall bifurcation index (R), equal to 1.41, suggests high tectonic activity at the regional scale. The basin asymmetry factor (PAF = 54.39) also confirms the tendency of waterways towards the left side and the likelihood of tectonic activities in this part. Basin shape ratio (BS = 5.62) and the average length of first-order streams (LN1 = 0.517 km) indicate an immature drainage network affected by active tectonics.

The findings of this research indicate that the values of geomorphic indices suggest significant tectonic activities in the Shahrchay watershed. These results demonstrate that tectonic activities not only cause changes in drainage patterns but can also lead to the creation of structural and dynamic anomalies. For example, the bifurcation index indicates significant changes in the structure of the drainage network and tectonic movements that increase the number and length of lower-order streams. The basin asymmetry index also shows the tendency of main flows towards the left side of the basin, which can result from tectonic activities.

Other indices were also used to evaluate tectonic activities. The drainage basin shape ratio index indicates the geometric shape of basins and their tectonic impacts. Large values of this index generally indicate elongated basins in tectonically active areas, while smaller values point to circular basins in inactive areas. Additionally, the average length of first-order streams indicates an immature drainage network affected by active tectonics. These indices were used as important tools in

identifying and evaluating tectonic activities and drainage network anomalies.

Conclusions

The analysis of geomorphic indices in the Shahrchay watershed indicates significant tectonic activities. The examined indices suggest the presence of structural anomalies and active tectonic activities in the region. These results can be effective in identifying and assessing geological hazards in the area, providing valuable information for crisis management and regional development planning. Indices Δa, hierarchical anomaly density, bifurcation ratio, and basin asymmetry all indicate tectonic impacts. Additionally, the average length of first-order streams indicates an immature drainage network affected by active tectonics. These findings can be effective in assessing geological hazards such as landslides and floods, as well as in planning for development and crisis management in this watershed. A more precise analysis of geomorphic indices, integrated with environmental variables such as climate and lithology, can provide a comprehensive understanding of tectonic processes and watershed evolution.