

تفکیک حساسیت سازندهای زمین‌شناسی دامنه‌های شمالی الوند همدان با استفاده از رابطه بعد فراکتال شبکه زهکشی

علیرضا ایلدرمی* - استاد گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۲۸ تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

چکیده

ابعاد فراکتالی شبکه زهکشی، معرف میزان تشابه ژئومورفولوژیکی در بین آن‌ها و تابعی از عوامل ساختمانی، لیتولوژی و توپوگرافی می‌باشد. لذا هدف از این پژوهش تعیین بعد فراکتال شبکه زهکشی و بررسی ارتباط آن با میزان حساسیت سازندهای زمین‌شناسی به فرسایش در دامنه‌های شمالی الوند همدان است. ابتدا چهار سازند شامل، گرانیته، هورنفلس کلریت‌دار، سنگ آهک مارنی و شیست، از طریق تصاویر گوگل ارث و نقشه زمین‌شناسی منطقه انتخاب شد. سپس در هر واحد زمین‌شناسی تعداد ۲ پلات ۲*۲ کیلومتر تعیین و با استفاده از نرم‌افزار Fractalyse ابعاد فراکتال آن‌ها محاسبه شد. پس از تعیین میزان حساسیت هر سازند ارتباط بعد فراکتال با سازندها بررسی گردید. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار بعد فراکتال به ترتیب مربوط به سازند هورنفلس کلریت‌دار با مقدار ۱/۳۳، سنگ آهک مارنی ۱/۳۱، شیست استروولیت‌دار ۱/۲۷ و گرانیته الوند ۱/۲۲ است. نتایج تحلیل آماری مقادیر RMSE و R2 نشان می‌دهد که در پلات‌های ۱ و ۳ با کمترین خطا و در پلات‌های ۴ و ۶ و ۷ دارای تطابق نسبتاً خوب و در پلات‌های ۲ و ۵ و ۸ با بیشترین خطا کمترین تطابق وجود دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در سازندهایی با حساسیت بیشتر نسبت به سازندهای مقاوم، تغییرات بیشتری در تراکم زهکشی رخ داده و بعد فراکتال آن‌ها نیز بیشتر می‌باشد. نتایج بررسی آزمون پیرسون و مقدار همبستگی نشان می‌دهد که بین مقاومت سازندها و بعد فراکتال آن‌ها ارتباط معنی‌دار و معکوس وجود دارد و با افزایش مقاومت سازندها به فرسایش بعد فراکتال آن‌ها کاهش می‌یابد و تراکم زهکشی هم پایین است. با توجه به نتایج حاصله و قابل قبول می‌توان با استفاده از تکنیک بعد فراکتال شبکه زهکشی، نوع سازندها و حساسیت آن‌ها به فرسایش را با صرف هزینه کم و سریع تر تفکیک و بررسی نمود.

واژگان کلیدی: بعد فراکتال، سازند زمین‌شناسی، تراکم زهکشی، فرسایش، الوند همدان.

مقدمه

شبکه هیدروگرافی مسیرهای شاخه‌ای هستند که انتقال جریان آب را بر روی سطوح شیب‌دار و ناهموار زمین برعهده دارند. با مطرح شدن مفهوم هندسه فراکتال توسط مندل بورت در سال ۱۹۸۲ بسیاری از محققان تحلیل فراکتال را در مدل سازی شبکه رودخانه‌ای به کار بردند و نشان دادند که الگوها و سایر شاخص‌های حوزه آبخیز و رودخانه‌ها از هندسه فراکتالی تبعیت می‌کنند. هندسه فراکتالی از جمله روش‌هایی است که به توصیف اشیایی می‌پردازد که خود متشابه یا متقارن هستند، این بدان معنا است که وقتی این اشیاء بزرگنمایی شوند به نظر می‌رسد که بین اجزای آن‌ها تشابه دقیقی برقرار است و این شباهت جزء به جزء تا بی نهایت ادامه می‌یابد (بأس^۱، ۲۰۰۲). یکی از ویژگی‌های اساسی فراکتال که پایه و اساس تجزیه و تحلیل‌های فراکتالی است خود تشابهی آماری است که بیان کننده تشابه ظاهری در یک جهت یا همه جهات و مقیاس‌هاست (مندل بورت^۲، ۱۹۸۳). به عبارت دیگر خود تشابهی آماری بیان کننده حالتی است که الگوی مورد نظر در یک مقیاس معین در دیگر مقیاس‌ها نیز تکرار می‌شود و این خود تشابهی ممکن است به صورت تقریبی یا تصادفی وجود داشته باشد (پریگارین و همکاران^۳، ۲۰۱۳).

در سال‌های اخیر کاربرد تحلیل فراکتالی برخی عوارض و ساختارهای زمین‌شناسی از جمله شناخت تکتونیک فعال و گسل‌های منطقه، دقیق‌سازی نقشه‌های زمین‌شناسی کوچک مقیاس به ویژه در اکتشاف معادن، راه‌سازی و تونل‌سازی، تفکیک واحدهای لیتولوژی و فرسایش‌پذیری سازندها بسیار مورد توجه محققین علوم زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی کمی قرار گرفته است. الگوی شبکه زهکشی تحت تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی، توپوگرافی و شیب، تکتونیک و اقلیم می‌باشد که ارزیابی هر یک از این عوامل باعث شناخت نحوه شکل‌گیری الگوی زهکشی در هر منطقه می‌شود. در این رابطه کمی‌سازی متغیرهای زمین‌شناسی به آسانی امکان‌پذیر نبوده، در حالی که بیشترین تأثیر را بر روی شکل‌گیری، ماهیت و فعالیت شبکه زهکشی دارند (محمدی خشویی و همکاران، ۱۳۹۸). روندهای خطی در علوم زمین به عنوان یک عنصر ژئومورفولوژیکی به خطواره‌ها معروفند و یک خطواره یک خط قابل ترسیم و ردیابی با سیمای مستقیم یا خمیده، نشان‌دهنده ساختارهای زمین‌شناسی خطی، مانند مرزهای سنگ‌شناسی و گسل می‌باشد (وانیکی و همکاران^۴، ۲۰۱۵). تحلیل آبراهه‌ها و وضعیت تراکم آن‌ها به عنوان یک خطواره مهم در صورتی که شواهد مناسبی از تکتونیک ناحیه در دسترس نباشد می‌تواند کلیدی برای شناسایی و ارزیابی فعالیت‌های تکتونیک، یک منطقه باشد (چرچی و همکاران، ۱۳۹۰). در یک بررسی با انطباق ابعاد فراکتالی تراکم شکستگی و مرکز سطحی زمین‌لرزه‌ها مشخص شده که تراکم شکستگی و زلزله‌های منطقه، چگونه و در چه جهتی افزایش و تراکم آبراهه‌های منطقه در کدام جهات کاهش می‌یابند (چرچی و همکاران، ۱۳۹۰). همچنین تحلیل فضایی لندفرم‌های بادی با استفاده از نظریه فراکتالی بیانگر این است که ارزیابی فراکتالی به طور نسبی واقعیت‌های مورفولوژیکی لندفرم‌های بادی را بیشتر مشخص می‌کند (شایان و همکاران، ۱۳۹۴). در محاسبه بعد فراکتال حوضه‌های زهکشی و رابطه آن با برخی خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوضه نیز نشان داده شده که روابط معنی‌داری بین متغیرهای مورفولوژیکی و بعد فراکتال شبکه زهکشی در زیرحوضه‌ها وجود دارد (کرم و صابری، ۱۳۹۴).

در دهه اخیر استفاده از تجزیه و تحلیل فراکتال برای توصیف کمی ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز افزایش یافته و هدف اصلی اکثر این بررسی‌ها یافتن رابطه‌ای ریاضی بین خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوضه و مسائلی چون هیدروگراف واحد مصنوعی فراکتال، فرسایش‌پذیری سازندها، تکتونیک، شکستگی‌ها، لرزه‌ها، جداسازی لندفرم‌ها و تفکیک واحدهای زمین‌شناسی است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات زیر در رابطه با موضوع فراکتال و زمین‌شناسی

1. Bass

2. Mandelbrot

3. Prigarin et al

4. waniki et al

اشاره نمود: خلیفه سلطانی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی نقش ساختارهای زمین‌شناسی در ابعاد فراکتالی شکستگی‌ها و آبراهه‌ها در جنوب باختری لنجان اصفهان پرداختند. نتایج تحلیل فراکتالی شکستگی‌ها، بخش B را به عنوان پویاترین بخش گستره معرفی می‌کند، در حالی که نتایج تحلیل فراکتالی آبراهه‌ها، فعالیت زمین‌ساختی را در بخش A بیشتر تأیید می‌نماید. علیمردادی و همکاران (۱۳۹۷)، در محاسبه بعد فراکتال سازندهای زمین‌شناسی و بررسی ارتباط آن با حساسیت سازندها، نشان دادند که بین عدد فراکتال و حساسیت سازندهای حوضه به فرسایش ارتباط معناداری وجود دارد، به نحوی که با افزایش حساسیت سنگ‌شناسی به تبع آن، تراکم زهکشی و عدد فراکتال نیز افزایش می‌یابد. کامیاب و همکاران (۱۳۹۷) در انطباق سنجی خواص ژئومورفولوژیک حوضه آبریز و ویژگی‌های چند فراکتالی شکل آبراهه نشان دادند که روابط معنی‌داری بین شاخص‌های ژئومورفولوژیک و تحلیل‌های چند فراکتالی وجود دارد و می‌توان جهت سایر حوضه‌های آبریز این نتیجه را به خوبی بسط و تعمیم داد. برزگری دهج و همکاران (۱۳۹۸) در مقایسه شاخص بدون بعد تراکم شبکه زهکش و بعد فراکتال شبکه زهکشی در جداسازی واحدهای سنگ‌شناسی حوضه آبخیز نفت، یزد، به این نتیجه رسیدند که تکنیک تراکم شبکه زهکش نسبت به تکنیک بعد فراکتال شبکه زهکش در شناسایی و تفکیک واحدهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، نتایج بسیار خوبی ارائه داده است. محمدی خشویی و همکاران (۱۳۹۸) در مقایسه بعد فراکتال و ویژگی‌های ژئومورفولوژیک در مدیریت حوضه آبخیز عقدا نشان دادند که روابط معنی‌داری بین ابعاد فراکتال شکل حوضه و شبکه زهکشی با ویژگی‌های ژئومورفولوژیک وجود دارد و بالاترین ضریب همبستگی متعلق به روابط رگرسیونی بین مجموع طول آبراهه، مساحت و مساحت فرسایش‌پذیر حوضه با بعد فراکتال شبکه زهکشی دیده می‌شود. نظری صارم و همکاران (۱۳۹۹) در برآورد بعد فراکتالی ژئومورفولوژی کرانه‌های شمال خلیج فارس با استفاده از روش شمارش جعبه‌ای نشان دادند که از دیدگاه ژئومورفولوژی فراکتال، خورهای شمال خلیج فارس وارد مرحله لبه آشوبناکی شدند. جوکار سرهنگی و همکاران (۱۳۹۹) در بررسی ارتباط بین سازندهای زمین‌شناسی و فرم منحنی میزان نقشه‌های توپوگرافی در بخشی از البرز شمالی و جنوبی به این نتیجه رسیدند که فرم‌های منحنی میزان و سازندهای زمین‌شناسی منطقه در سطح ۰/۰۱ تفاوت معنی‌داری با یکدیگر دارند، به طوری که فرم‌های منحنی میزان صاف و ساده در سنگ‌های سخت و مقاوم و فرم‌های سینوسی متراکم در سازندهای سست تطابق داشته و از مقدار مورد انتظار بیشتر هستند. حسینی و فتاحی (۱۴۰۰) در بررسی مقایسه ای شاخص مورفولوژی زاویه مرکزی (A) با پارامترهای چند فراکتالی، الگوی تکامل پیچان رودها را با استفاده از روابط رگرسیونی در رودخانه قره آغاچ در استان فارس بررسی کردند و نشان دادند که همواره زاوایای مرکزی قوس‌ها در رودخانه از اهمیت بسزایی برخوردار هستند و در چگونگی و نحوه شکل‌گیری آن‌ها بسیار موثرند.

دونادیو و همکاران^۱ (۲۰۱۴) سه رودخانه را از دید فراکتالی الگوی هیدروگرافی مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که رابطه زمین ساخت و فرسایش با عدد بعد فراکتال بسیار زیاد است. کاساک^۲ (۲۰۱۴) با مطالعه الگوی آبراهه‌ها نتیجه گرفت که با افزایش بعد فراکتالی یک الگوی آبراهه‌ای از مرتبه $X+1$ ، تعداد و یا طول آبراهه‌ها از مرتبه $X+1$ افزایش می‌یابد. دوتا و همکاران^۳ (۲۰۱۴) در بررسی لند فرم‌های یخچالی در هیمالیا با استفاده از تحلیل چند فراکتالی نشان دادند که این لند فرم‌ها نسبت به لند فرم‌های رودخانه‌ای ساختار پیچیده‌ای دارند و با تحلیل فراکتالی می‌توان لند فرم‌های به وجود آمده توسط فرآیندهای مختلف را تفکیک نمود. هوی و همکاران^۴ (۲۰۱۷) در بررسی ارتباط بین بعد فراکتال شبکه زهکشی و مراحل تکاملی فرسایش حوضه زرد چین نشان دادند که مقادیر فراکتالی شبکه زهکشی با مقادیر تحویل رسوب و رواناب حوضه رابطه‌ای مثبت و خطی دارد. تنگ^۵ و همکاران (۲۰۱۸) با اندازه‌گیری تغییرات در اندازه و مقیاس داده‌ها، شاخص

1. Donadio et al

2. Kusak

3. Dutta et al

4. Hui et al

5. Teng et al

های فراکتالی سری زمانی را مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. وارگاس^۱ و همکاران (۲۰۱۹) با تحلیل‌های فراکتالی و بررسی طرح شبکه انتقال آب بیان نمودند که با انتخاب شبکه‌های مختلف، محدوده بعد فراکتال آن‌ها بین ۰/۸ تا ۱/۱ تغییر یافته و با بررسی سری زمانی رودخانه و با گذشت زمان، نمودار طیف تکنیکی دارای عدم تقارن به سمت راست می‌باشد و نشان می‌دهد که دامنه a افزایش و نمودار ضریب مقیاسی شیب تندتری به خود می‌گیرد، که نسبت به شرایط اولیه ورودی حساس می‌باشد (ژانگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۹، مارین^۳ و همکاران، ۲۰۲۰، کامپوز^۴ و همکاران، ۲۰۲۰).

لی^۵ و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از تحلیل و ارزیابی فراکتالی، الگوی امواج رسوبات ته‌نشین شده بستر رودخانه را بررسی کردند. حسینی^۶ و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی رفتارهای جریان چگال را با آنالیز فراکتال و چند فراکتال مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که پارامترهای ورودی مانند دبی ماهیت کلی فراکتالی جریان چگال یا ویسکوز را تحت تاثیر قرار می‌دهند. بعلاوه تاکنون تحقیقات زیادی در رابطه با بعد فراکتال ژئومورفولوژی صورت گرفته که می‌توان به (فتاحی و همکاران، ۱۳۹۶؛ سلطانی و همکاران، ۱۳۹۸؛ فتاحی و همکاران، ۱۳۹۷؛ محمدی خشویی و همکاران، ۱۳۹۸؛ بی و همکاران^۷، ۲۰۱۲؛ آریزا^۸ و همکاران^۹، ۲۰۱۳؛ فاسیندا^{۱۰}، ۲۰۱۳؛ کومار^{۱۰}، ۲۰۱۴) اشاره نمود.

با توجه به مرور منابع، هدف از این پژوهش تعیین بعد فراکتال شبکه زهکشی و بررسی ارتباط آن با الگوهای ژئومورفولوژی سازندهای زمین‌شناسی و میزان حساسیت آن‌ها در دامنه‌های شمالی الوند همدان است. تا بتوان با استفاده از این تکنیک چهار واحد زمین‌شناسی گرانیته الوند، هورنفلس کلریت‌دار، سنگ آهک مارنی و شیست استرولیت‌دار در دامنه‌های شمالی توده الوند همدان را شناسایی و حساسیت آن‌ها را تفکیک و با صرف هزینه کمتر در مدت زمان کوتاه، به نتایج دقیق‌تری دست یافت.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

توده کوهستانی الوند همدان در تقسیم‌بندی واحدهای زمین‌ساختی ایران در زون ساختاری سندج - سیرجان جای دارد که به موازات روراندگی زاگرس گسترش دارد و جزء پر تکاپوترین پهنه ساختاری ایران است که فازهای دگرگونی و ماگماتیسم مهمی را پشت سر گذاشته است. وجود سنگ‌های گوناگون دگرگونی، آذرین و رسوبی که اکثراً فاقد فسیل و به شکل بلوره و دگرگونه هستند موجب پیچیدگی زمین‌شناسی این منطقه شده است. از نظر لیتولوژی سنگ‌های محدوده همدان شامل انواع دگرگونی (ناحیه‌ای - مجاورتی)، آذرین و رسوبی است (ایلدرمی، ۲۰۱۱)، (شکل ۱).

1. Vargas et al

2. Zhang et al

3. Marin et al

4. Campos et al

5. Lee et al

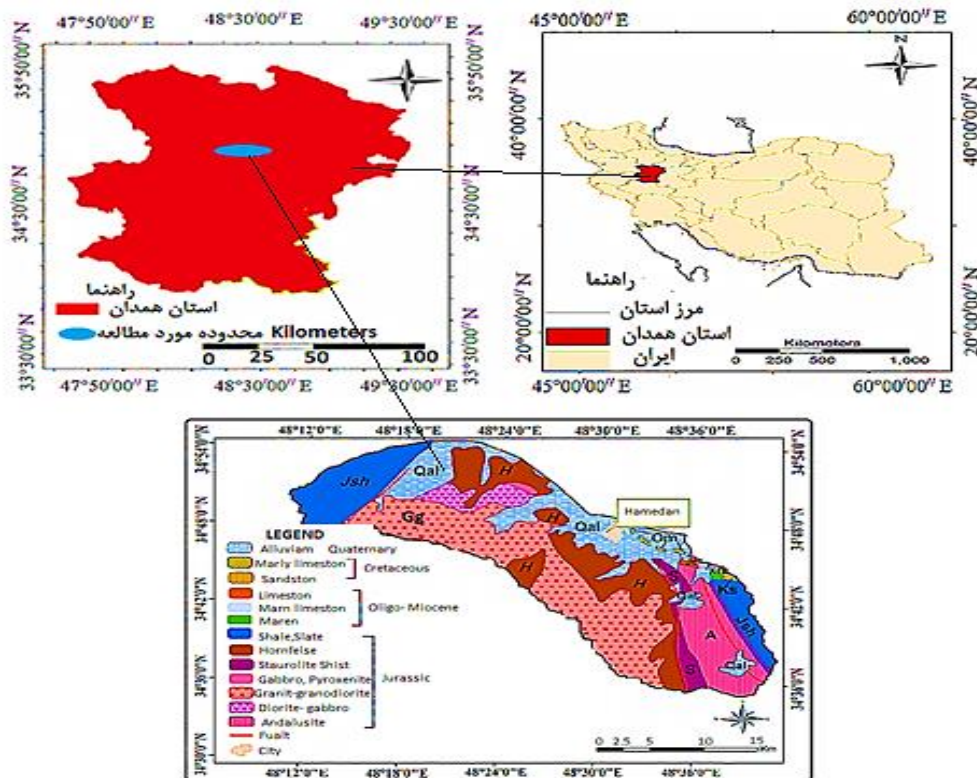
6. Hosseini et al

7. Bi et al

8. Ariza et al

9. Facbenda

10. Kumar



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه ایران، استان همدان و نقشه زمین‌شناسی دامنه‌های شمالی الوند همدان، اقتباس از: Ildoromi, (2011)

واحدهای زمین‌شناسی مورد بررسی

گرانیت الوند

گرانیت‌ها بخش عمده مجموعه پلوتونیک الوند را تشکیل می‌دهند و در داخل آن‌ها آنکلاوهای دانه‌ریز فراوانی وجود دارند، که دارای اندازه‌های بسیار متغیری می‌باشند (شکیبا و همکاران، ۱۳۹۹). در این توده سه دسته از سنگ‌های اصلی شامل گابروها، گرانیت‌ها و گرانوتوئیدها به خوبی قابل تفکیک است (شهبازی، ۱۳۸۹).

هورنفلس‌های کردیریت‌دار

سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای منطقه در بردارنده اسلیت، فیلیت، آندالوزیت شیبست و میگماتیت‌ها و سنگ‌های دگرگونی همبری در برگیرنده گارنت هورنفلس و کردیریت هورنفلس هستند (سپاهی گرو و همکاران، ۱۳۹۷). اسلیت، فیلیت، شیبست و میگماتیت حجم اصلی مجموعه دگرگونی ناحیه‌ای را شکل داده‌اند. به طور کلی سنگ‌های دگرگونی مجاورتی اغلب کردیریت - آندالوزیت هورنفلس هستند (شکیبا و همکاران، ۱۳۹۹)، (شکل ۲-ب).

سنگ آهک مارنی

این واحد از تناوب آهک‌های مارنی ورقه‌ای حاوی کانی‌های میکائی به رنگ کرم نازک لایه، دگرگونه و سنگ آهک ماسه‌ای سیاه رنگ است، که با ماسه سنگ‌های قاعده کرتاسه گذر تدریجی دارد. که سن آن‌ها را به الیگومیوسن نسبت داده‌اند (امیری و همکاران، ۱۳۹۴). (شکل ۳-الف).

واحد شیست‌های استرولیت‌دار

شیست‌ها در اثر دگرگونی مجاورتی اسلیت و فیلیت‌های منطقه بوجود آمده‌اند (احمدی خلجی و همکاران، ۱۳۹۴). این واحد گسترده‌ترین شیست‌های منطقه را شامل می‌شود (شکل ۳-ب). شیست‌ها با داشتن پرفیروبلاست‌های استرولیت اثر شیستوزیته پیشین را در خود حفظ کرده‌اند و چنین به نظر می‌رسد که شیستوزیته بعداً در آن‌ها پدیدار شده است. به طور کلی توزیع واحدهای زمین‌شناسی جبهه شمالی توده کوهستانی الوند همدان در شکل (۴) نشان داده شده است.

روش تحقیق

هدف از این بررسی تفکیک حساسیت سازندهای زمین‌شناسی دامنه‌های شمالی الوند همدان با استفاده از رابطه بعد فراکتال شبکه زهکشی است. لذا در این بررسی برای مطالعه سازندها و شبکه هیدروگرافی آن‌ها از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث با دقت پنج متر و از روش تفسیر و ترسیم مستقیم شبکه‌های هیدروگرافی استفاده شد.

تهیه شبکه زهکشی و شاخص بعد تراکم شبکه زهکشی

در این تحقیق ابتدا چهار واحد زمین‌شناسی شامل، گرانیت، هورنفلس کلریت‌دار، سنگ آهک مارنی و شیست استرولیت‌دار با استفاده از نرم‌افزار گوگل ارث با هم‌پوشانی نقشه زمین‌شناسی منطقه و تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی انتخاب شد. سپس بر اساس مشاهدات میدانی در هر واحد زمین‌شناسی تعداد ۲ پلات ۲*۲ کیلومتر (نمونه‌ها) تفکیک و با استفاده از نرم‌افزار Arc Hydro شبکه‌های هیدروگرافی در هر یک از پلات‌ها با دقت ۱ متر ترسیم و بررسی شد. تا محاسبات مربوط به بعد فراکتال با مساحت یکسان انجام و با توجه به مساحت‌های یکسان بعد فراکتال شبکه زهکشی در هر چهار سازند از دقت ترسیمی یکسان برخوردار شوند. در ادامه با بررسی شبکه زهکشی پلات‌ها به صورت جداگانه، با استفاده از نرم‌افزار Fractalyse ابعاد فراکتال آن‌ها به روش جعبه شمارش هندسی محاسبه و استخراج شد. با برآورد میانگین ابعاد فراکتال و مساحت پلات‌ها، مقدار میانگین به دست آمده بعد فراکتال هر سازند زمین‌شناسی ارزیابی شد. بنابراین ابتدا در چهار واحد زمین‌شناسی و از هر واحد دو پلات ۲*۲ کیلومتری به صورت تصادفی _ سیستماتیک (آزمون - نمونه) انتخاب و بعد فراکتال هر یک از پلات‌ها که در واقع بیانگر شبکه زهکشی واحد مربوطه می‌باشد، محاسبه شد. در کنار بعد فراکتال هر واحد، مجموعه طول شبکه زهکشی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استخراج و میانگین و تراکم شبکه زهکشی هر یک از پلات‌ها محاسبه گردید. در این بررسی جهت مقایسه بهتر بعد فراکتال شبکه زهکشی با تراکم شبکه زهکشی از روش استرالر نیز استفاده شده است. در نهایت به منظور بررسی و تعیین ارتباط بعد فراکتال با سازندهای زمین‌شناسی از شاخص حساسیت‌پذیری سازندها استفاده و برای هر سازند درجات حساسیتی بر اساس منابع مورد مطالعه تعریف و رابطه عدد فراکتال سازندها با شاخص مقاومت به فرسایش آن‌ها بررسی گردید (فیض نیا و همکاران، ۱۳۷۴).

جدول ۲: مشخصات و حساسیت سازندهای منطقه مورد مطالعه

لیتولوژی	درجه حساسیت به فرسایش از ۱۰
نهشته آبرفتی	۱
مخروط افکنه	۵
ماسه سنگ، مارن	۶
آهک، مارن	۵
مارن	۴
شیل، اسلیت	۶
هورنفلس کلریت دار	۸

شیست استرولیت دار	۶
گابرو پیروکسین	۷
گرانیت	۹
گرانیت ، گرانودیوریت	۸
دیوریت، گابرو	۷
آندالوزیت	۸

در جدول (۱) با افزایش مقدار عددی درجه مقاومت، حساسیت سازندها به فرسایش کاهش می‌یابد و اعداد کوچکتر نشان دهنده مقاومت کمتر به فرسایش است. این طبقه‌بندی بر اساس سختی آن‌ها انجام شده است (رزوسکی و نوویک، ۱۳۷۱). در این طبقه‌بندی سنگ‌هایی با مقاومت کمتر از امتیاز پایین‌تر (حداقل ۱) برخوردارند، بر این اساس دامنه مقاومت سنگ‌ها به فرسایش و سازندهای مورد بررسی از ۹ تا ۱ در نظر گرفته و امتیازبندی شده است.

ارزیابی تکنیک بعد فراکتال شبکه زهکشی

به منظور ارزیابی کارایی تکنیک بعد فراکتال در تفکیک حساسیت سازندهای زمین‌شناسی دامنه‌های شمالی الوند همدان از روش تحلیل آماری و نرم‌افزار SPSS مقادیر RMSE و R^2 تراکم زهکشی و بعد فراکتال شبکه زهکشی مربوط به پلات‌ها، معادله ضریب همبستگی، ضریب تعیین و زاویه انحراف استفاده شد. در ادامه پس از بررسی نرمالیتیه بودن داده‌ها با آزمون کلموگراف - اسمیرنوف، در نهایت با توجه به نرمال بودن توزیع داده‌ها از آزمون پیرسون برای همبستگی داده‌ها استفاده و ارتباط معنی‌دار بعد فراکتال با شاخص عددی مقاومت به فرسایش ارزیابی شد.

فراکتال و تعیین بعد آن

واژه فراکتال اولین بار توسط مندلبروت ریاضیدان فرانسوی لهستانی الاصل در سال ۱۹۷۵ در مورد شکل سواحل انگلستان به زبان ریاضی ابداع شده است. از لحاظ واژه، مندلبروت اصطلاح فراکتال را از واژه لاتین Fractus (به معنی شکسته) برگرفت تا بر ماهیت قطعه قطعه شدن پدیده‌ها که یکی از مشخصه‌های اصلی این فرم است، تاکید داشته باشد (مندلبروت، ۱۹۸۳). براساس این نظریه پدیده‌های فراکتال خود همانند هستند، یعنی در مقیاس‌های متفاوت، جزئیات مشابهی از خود نشان می‌دهند. در بسیاری از پدیده‌های ژئومورفولوژیکی همچون شبکه رودخانه‌ای و خطوط ساحلی این خود همانندی فراکتال قابل مشاهده است. به این معنی که هر چه با دقت بیشتری به تصویر فراکتال نگاه شود، شکل‌ها در یک مقیاس مشخص در جزئیات، شبیه شکل‌های دیگر در یک مقیاس دیگر است. شاخص و اندازه کمی‌سازی مقیاس فراکتال، بعد فراکتال (d) می‌باشد که از طریق رابطه (۱) تحت عنوان فراکتال محاسباتی، قابل محاسبه است. بعد فراکتال بزرگ‌تر یعنی پدیده خیلی بی‌نظم است (کرم و همکاران، ۱۳۹۴).

$$N = \varepsilon^d + C$$

رابطه (۱)

در این رابطه N برابر با تعداد پیکسل‌هایی که در آن عارضه مورد نظر دیده می‌شود، ε^d ، اندازه هر پیکسل، و C، ضریب ثابت است.

روش شمارش جعبه‌ای هندسه فراکتال

در بسیاری از پدیده‌های ژئومورفولوژیکی هم‌چون شبکه‌های رودخانه‌ای خود همانندی فراکتال قابل مشاهده است. به این معنی که هرچه با دقت بیشتری به تصویر فراکتال شبکه رودخانه‌ای نگاه شود، مورفولوژی آن در یک مقیاس مشخص در جزییات شبیه شکل‌های دیگر در یک مقیاس دیگر است (فتاحی و همکاران، ۱۳۹۷). یکی از رایج‌ترین روش‌هایی که برای محاسبه تعداد پیکسل‌هایی که در آن عارضه مورد نظر دیده می‌شود، استفاده از روش شمارش پیکسلی (جعبه‌ای) می‌باشد. در این روش محدوده عارضه مورد نظر را بر روی یک شبکه پیکسلی قرار می‌دهند و با تغییر اندازه پیکسل‌ها (ϵ)، تعداد پیکسل‌هایی که در آن عارضه مورد نظر دیده می‌شود (N)، شمارش می‌گردد و در نهایت با محاسبه شیب تغییرات دو پارامتر (N) و (ϵ)، عدد مربوط به بعد فراکتال محاسبه می‌گردد. در این روش، مجموعه از نقاط روی یک منحنی یا یک سطح با مربعاتی (همان جعبه‌ها) به طول و ضلع (ϵ)، پوشانده می‌شود. در واقع، کل فضای مورد نظر با استفاده از این روش شبکه بندی می‌شود. تعداد مربعاتی که هر قسمت از منحنی مورد نظر را می‌پوشاند محاسبه می‌گردد. این کار برای مربعات با طول اضلاع مختلف تکرار می‌شود. حد نهایی این قسمت زمانی است که (ϵ)، به صفر میل نماید. که در این صورت با استفاده از رابطه $L = N \cdot \epsilon$ طول محاسبه شده به طول واقعی بسیار نزدیک می‌گردد. اگر اندازه خطی یک پدیده را در نظر بگیرید و آن را در هر جهت فضایی به مقدار (ϵ)، کاهش دهید، می‌توان $N(\epsilon)$ جسم خود همانند را دید که تمام جسم اولیه را می‌پوشاند. یعنی $N(\epsilon)$ تعداد ساختارهای خود همانند با اندازه خطی (ϵ)، است که تمام ساختار را می‌پوشاند که از رابطه (۲) به دست می‌آید (هوی و همکاران^۱، ۲۰۱۷).

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \log N(\epsilon) / \log 1/\epsilon \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در این رابطه D ، بعد فراکتالی N ، تعداد مربعات که شامل قسمتی از جسم فراکتالی مورد نظر می‌باشد. با توجه به اعداد به دست آمده، نموداری به صورت لگاریتمی حاصل می‌شود، که محورهای افقی و عمودی آن به ترتیب معرف: $\log 1/\epsilon$ و $\log N(\epsilon)$ می‌باشد. شیب خط عبوری حاصله در منحنی لگاریتمی، بعد فراکتالی شی مورد نظر را بیان می‌کند (مولتنو^۲، ۱۹۹۳). شاخص و اندازه کمی‌سازی مقیاس فراکتال، بعد فراکتال (d) می‌باشد که از رابطه (۳) تحت عنوان فراکتال محاسباتی، قابل محاسبه است. در این رابطه بعد فراکتال بزرگ‌تر بیانگر این است که پدیده خیلی بی نظم است (کرم و همکاران، ۱۳۹۴).

$$N = \epsilon^{-d} + c \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه N برابر با تعداد پیکسل‌هایی که در آن عارضه مورد نظر دیده می‌شود، ϵ ، اندازه هر پیکسل، و C ، ضریب ثابت است.

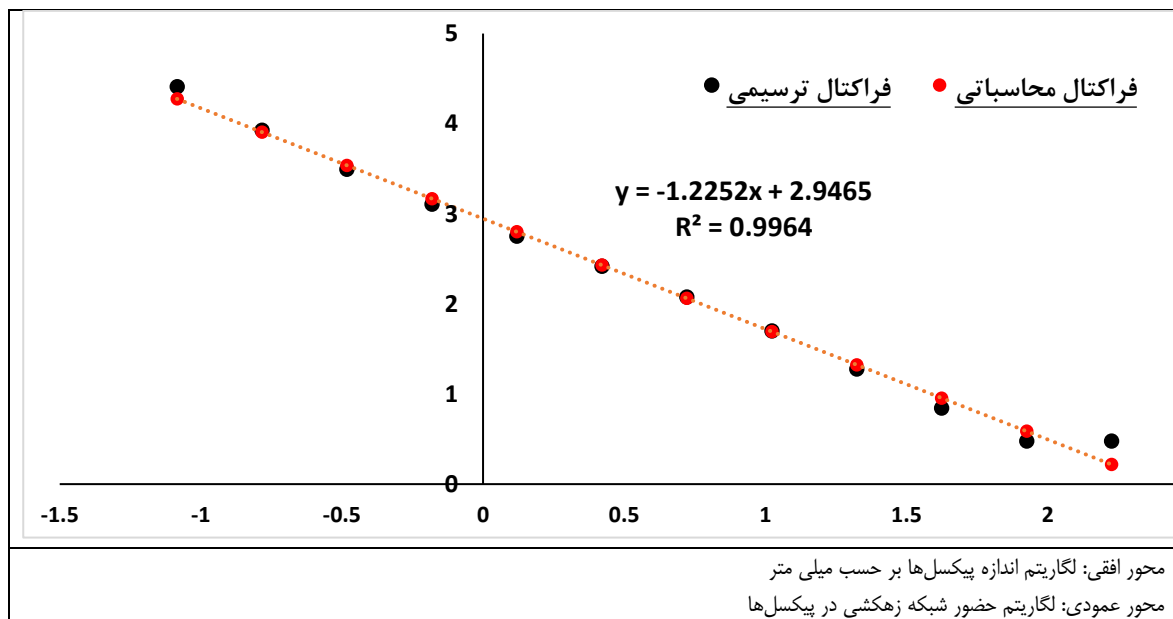
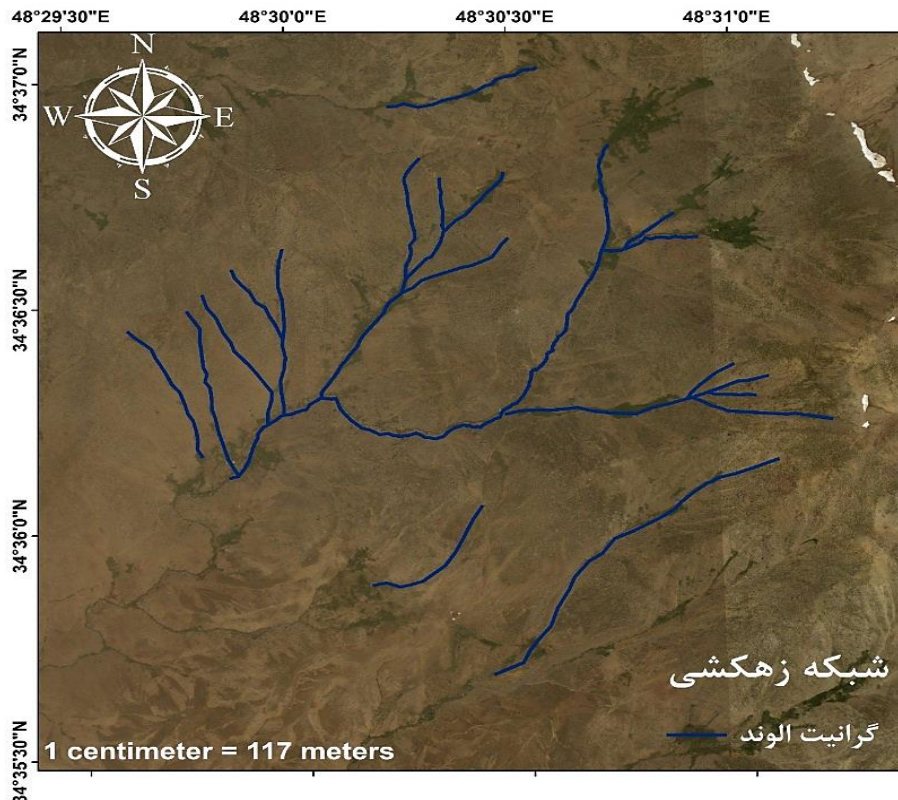
بحث و یافته‌ها

در اشکال ۲ تا ۵ تصاویر گوگل ارث مربوط به تعدادی از نمونه‌های شبکه هیدروگرافی که تراکم خطوط شبکه زهکشی با رنگ آبی در آن مشخص شده، به همراه نمودارهای مربوط به فراکتال محاسباتی و ترسیمی در سازندهای چهارگانه منطقه مورد مطالعه ارائه شده است. بررسی اشکال مربوط به شبکه زهکشی منطقه نشان می‌دهد که هر شبکه زهکشی با توجه به واحدهای زمین‌شناسی و حساسیت آن‌ها به فرسایش دارای الگوی خاصی می‌باشد. به طوری که الگوی شبکه زهکشی در گرانیتهای عموماً به شکل شاخه درختی، در هورنفلس‌های کلریت‌دار، شیب‌های استروپیت‌دار به شکل تقریباً راست گوشه و در آهک‌ها به شکل موازی و پراکنده است. ارزیابی تراکم زهکشی در چهار واحد زمین‌شناسی نشان می‌دهد که

¹. Hui et al

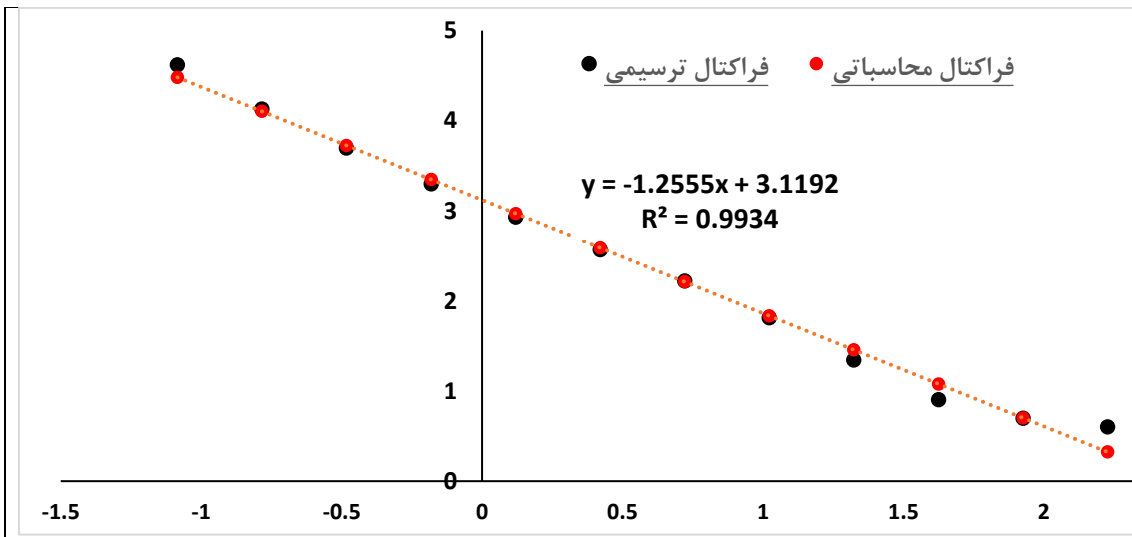
². Molteno

بیشترین تراکم زهکشی در دو واحد زمین‌شناسی هورنفلس کلریت‌دار و سنگ آهک مارنی نسبت به دو واحد دیگر مشاهده می‌شود و بیانگر تراکم آبراهه‌ها و انشعاب آبراهه‌های بیشتر در این دو واحد زمین‌شناسی است. بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که با توجه به تغییرات تراکم شبکه زهکشی در سازندها، تغییر بعد فراکتال آن‌ها نیز بیشتر می‌شود.



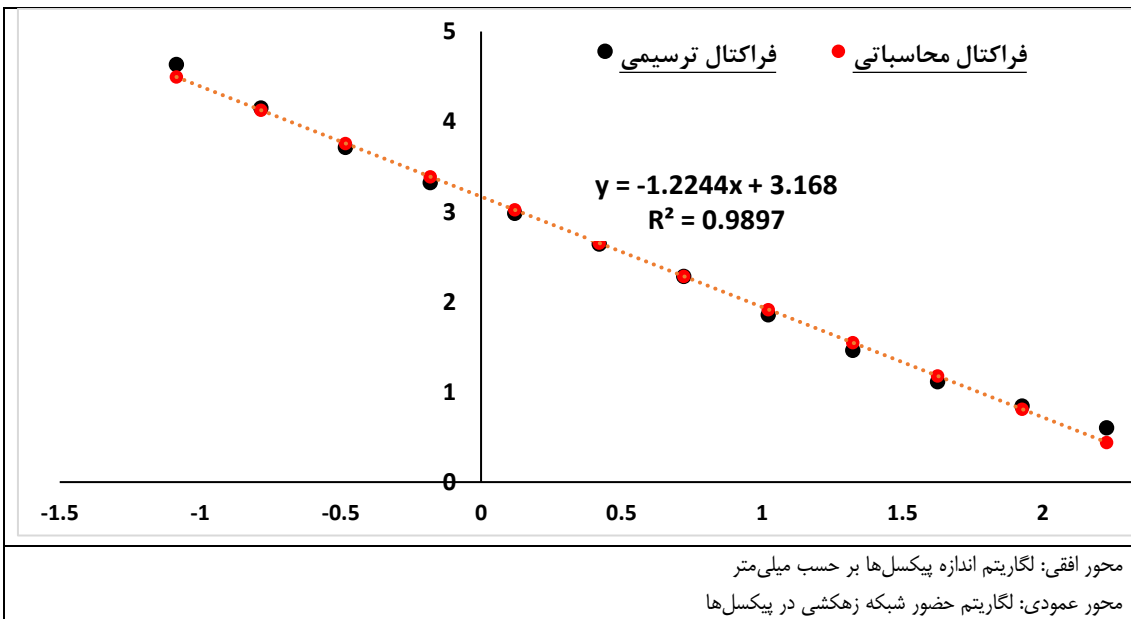
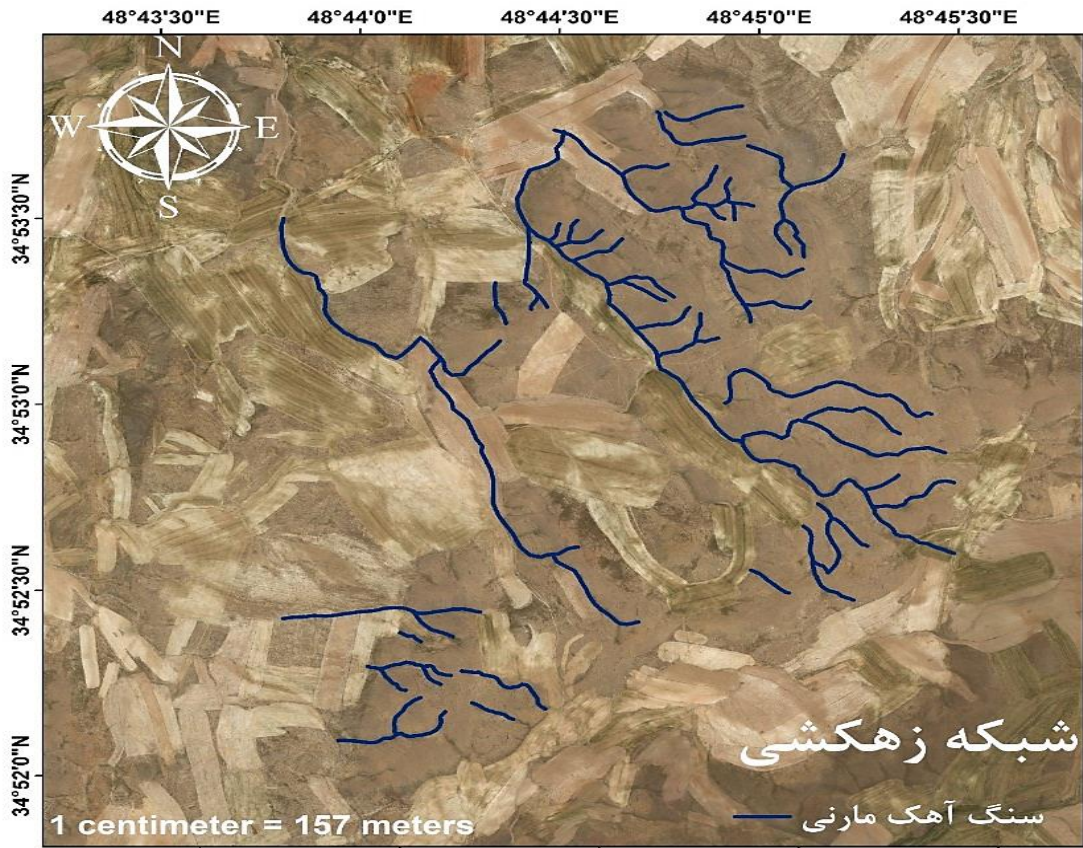
محور افقی: لگاریتم اندازه پیکسل‌ها بر حسب میلی متر
محور عمودی: لگاریتم حضور شبکه زهکشی در پیکسل‌ها

شکل ۲: تصویر شبکه زهکشی با استفاده از تصاویر گوگل ارث و شکل پلات آبراهه‌ها با دقت ۱ متر و نمودار بعد فراکتال شبکه زهکشی مربوط به واحد گرانیت الوند و محاسبه بعد فراکتال آن

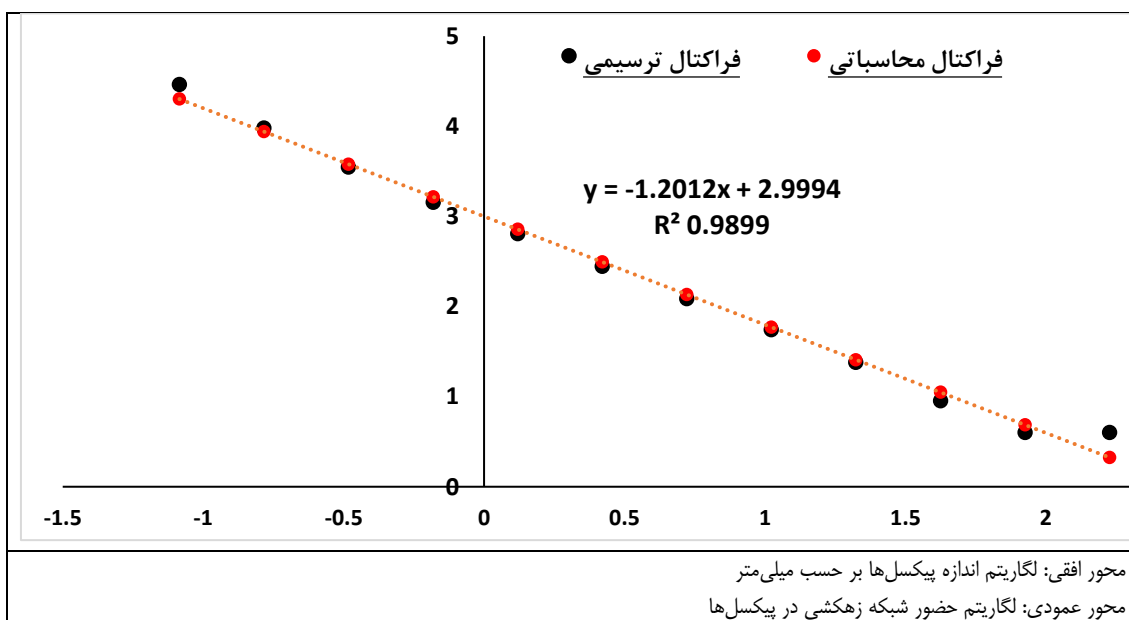
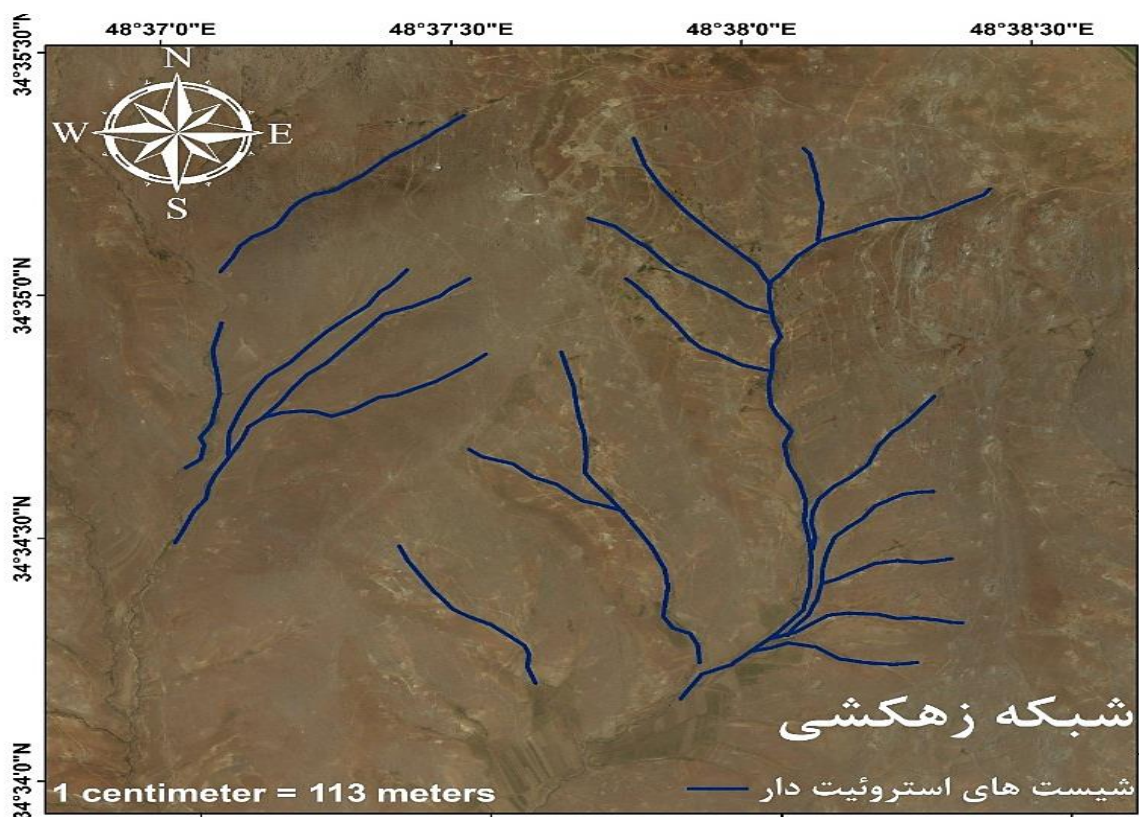


محور افقی: لگاریتم اندازه پیکسل‌ها بر حسب میلی متر
محور عمودی: لگاریتم حضور شبکه زهكشی در پیکسل‌ها

شکل ۳: تصویر شبکه زهكشی با استفاده از تصاویر گوگل ارث و شکل پلات آبراهه‌ها با دقت ۱ متر و نمودار بعد فراکتال شبکه زهكشی مربوط به واحد هورنفلس‌های کلریت‌دار و محاسبه بعد فراکتال آن



شکل ۴. تصویر شبکه زهکشی با استفاده از تصاویر گوگل ارث و شکل پلات آبراهه‌ها با دقت ۱ متر و نمودار بعد فراکتال شبکه زهکشی مربوط به واحد سنگ آهک مارنی و محاسبه بعد فراکتال آن



شکل ۵: تصویر شبکه زهکشی با استفاده از تصاویر گوگل ارث و شکل پلات آبراهه‌ها با دقت ۱ متر و نمودار بعد فراکتال شبکه زهکشی مربوط به واحد شیست‌های استروئیت دار و محاسبه بعد فراکتال آن

بررسی اشکال آبراهه‌های چهار سازند در دامنه‌های شمالی الوند نشان می‌دهد که شبکه آبره‌های با دقت DEM ۳۰ متر در پلات‌های ۲*۲ کیلومتر (۴ کیلومتر مربع) متناظر از دقت بسیار کمتر، نسبت به شبکه زهکشی ترسیم شده از

روی تصاویر گوگل ارث با دقت نزدیک به ۱ متر برخوردار است. بنابراین، طبق رابطه (۲) بعد فراکتالی شبکه هیدروگرافی سازندها محاسبه و بررسی شده است. همچنان که ملاحظه می‌شود (ε) اندازه واحد شبکه می‌باشد و $N(\varepsilon)$ حداقل تعداد خانه‌هایی از شبکه است که کاملاً شبکه هیدروگرافی سازندها را پوشش داده است. نتایج بررسی اشکال و نمودارهای بعد فراکتال نشان می‌دهد که خطوط شبکه آبراهه در صفحه مربوط به تصاویر در واحدهای ۴ کیلومتر مربعی افزایش یافته و $N(\varepsilon)$ حداقل تعداد خانه‌هایی از شبکه، که به طور کامل شبکه هیدروگرافی سازندها را پوشش می‌دهند، افزایش یافته است، بنابراین طبق رابطه (۲) بعد فراکتال نیز افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش بعد فراکتال، همراه با پارامتر شبکه زهکشی، دقت تفکیک واحدهای زمین‌شناسی نیز افزایش می‌یابد. این وضعیت بیانگر این است که در سازندهایی با حساسیت بیشتر مانند شیست نسبت به سازندهای مقاوم مانند گرانیت تغییرات بیشتری در تراکم شبکه هیدروگرافی رخ داده است، در نتیجه تغییر بعد فراکتال آن‌ها نیز بیشتر مشاهده می‌شود.

بعد فراکتال شبکه زهکشی

مقادیر بعد فراکتال و طول شبکه زهکشی سازندهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در جدول (۲) ارائه شده است. بررسی ضریب همبستگی بین بعد فراکتال و میانگین طول شبکه زهکشی در پلات‌ها بیانگر ارتباط خوب بین آن‌هاست. بررسی میانگین طول شبکه زهکشی بعد فراکتال نشان می‌دهد که به ترتیب واحد هورنفلس کلریت‌دار، سنگ آهک مارنی، شیست استروولیت‌دار و گرانیت الوند دارای بیشترین ضریب همبستگی هستند و بیانگر این است که هرچه طول و تراکم شبکه زهکشی افزایش می‌یابد بعد فراکتال آن‌ها هم افزایش می‌یابد که از مهمترین دلایل آن می‌توان به عواملی چون شیب، مورفولوژی باتولیت الوند، وجود درزه‌ها و شکاف‌های فراوان در واحد زمین‌شناسی گرانیت و افزایش نفوذ پذیری اشاره کرد، که موجب کاهش تراکم زهکشی و بعد فراکتال در گرانیت‌ها شده است. بعلاوه در آهک‌ها نیز وجود مارن (ترکیب آهک و رس) و در هورنفلس‌ها کاهش درزه‌ها و شکاف‌ها و در شیست‌ها، شیستوزیته بودن که موجب کاهش نفوذپذیری می‌شود، از دلایل مهم افزایش تراکم زهکشی و بعد فراکتال است.

جدول ۲: مقادیر بعد فراکتال و طول شبکه زهکشی سازندهای زمین‌شناسی مورد مطالعه

واحد زمین‌شناسی	بعد فراکتال	میانگین طول شبکه زهکشی (کیلومتر)	ضریب همبستگی
گرانیت الوند	۱/۲۲	۱۰/۷۷	۰/۹۹۴۹
هورنفلس کلریت‌دار	۱/۳۳	۱۵/۹۱	۰/۹۹۷۵
سنگ آهک مارنی	۱/۳۱	۱۵/۵۳	۰/۹۹۶۹
شیست استروولیت‌دار	۱/۲۷	۱۲/۰۳	۰/۹۹۶۲

شاخص تراکم شبکه زهکشی و بعد فراکتال شبکه زهکشی

نتایج تحلیل آماری مقادیر $RMSE$ و R^2 محاسبه تراکم زهکشی در پلات‌های ۸ گانه از طریق تصاویر گوگل ارث و روش محاسباتی با استفاده از رابطه تراکم زهکشی نشان می‌دهد که در پلات‌های ۱ و ۳ با کمترین خطا و در پلات‌های ۴ و ۶ و ۷ دارای تطابق نسبتاً خوب و در پلات‌های ۲ و ۵ و ۸ با بیشترین خطا کمترین تطابق را ارائه داده‌اند (جدول ۳).

جدول ۳: نتایج برآورد خطای آماری در محاسبه تراکم زهکشی تصاویر گوگل ارث (مشاهداتی) و معده تراکم زهکشی (محاسباتی).

شماره پلات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
RMSE	۰/۸۵	۰/۹۸	۰/۷۸	۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۹۳	۰/۹۲	۰/۹۶
R ²	۱/۱	۱/۴۱	۰/۹۶	۱/۲۵	۱/۳۷	۱/۲۹	۱/۲۱	۱/۴۸

بررسی مقادیر محاسباتی بعد فراکتال شبکه زهکشی، تعداد و انشعاب آبراهه‌ها بیانگر این است که در ترکیب هورنفلس‌ها و سنگ‌های آهکی مارنی بیشتر است و نشان می‌دهد که همبستگی مستقیم بین تعداد و انشعاب آبره‌ها و بعد فراکتال آن‌ها وجود دارد. در گرانیته‌ها بعد فراکتال شبکه زهکشی از ۱/۲۳۳ تا ۱/۲۱۴ و در هورنفلس کلریت‌دار ۱/۳۴۵ تا ۱/۳۱۹، در سنگ آهک مارنی ۱/۳۱۹ تا ۱/۳۰۷ و در شیست استرولیت‌دار ۱/۲۷۵ تا ۱/۲۵۸ متغیر است (جدول ۴).

جدول ۴: بعد فراکتال شبکه زهکشی در واحدهای زمین‌شناسی

واحد زمین‌شناسی	شماره پلات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	میانگین بعد فراکتال
گرانیت الوند	نمونه	۱/۲۲۷	۱/۲۲۲	۱/۲۲۴	۱/۲۱۸	۱/۲۲۱	۱/۲۲۲	۱/۲۲۵	۱/۲۱۹	۱/۲۲۲
هورنفلس کلریت‌دار	نمونه	۱/۳۲۵	۱/۳۴۱	۱/۳۲۴	۱/۳۲۷	۱/۳۲۴	۱/۳۴۲	۱/۳۳۱	۱/۳۳۹	۱/۳۳۱
سنگ آهک مارنی	نمونه	۱/۳۱۵	۱/۳۱۴	۱/۳۱۳	۱/۳۱۲	۱/۳۱۳	۱/۳۱۷	۱/۳۱۱	۱/۳۱۸	۱/۳۱۴
شیست استرولیت‌دار	نمونه	۱/۲۷۶	۱/۲۶۳	۱/۲۷۸	۱/۲۶۹	۱/۲۷۴	۱/۲۸۵	۱/۲۶۹	۱/۲۷۹	۱/۲۷۴

بررسی مقادیر محاسباتی تراکم زهکشی در چهار واحد زمین‌شناسی نشان می‌دهد که بیشترین تراکم زهکشی در دو واحد زمین‌شناسی هورنفلس کلریت‌دار و سنگ آهک مارنی نسبت به دو واحد دیگر مشاهده می‌شود و بیانگر تراکم آبراهه‌ها و انشعاب آبراهه‌های بیشتر در این دو واحد زمین‌شناسی است. در حالی که در گرانیته‌ها و شیست استرولیت‌دار این مقادیر کمتر است. به طور کلی مقادیر تراکم زهکشی در گرانیته‌ها بین ۱۰/۹۸ تا ۱۱/۲۵، در هورنفلس کلریت‌دار ۱۵/۹۵ تا ۱۵/۴۵ و در سنگ آهک مارنی از ۱۵/۴۶ تا ۱۵/۶۲ و در شیست استرولیت‌دار بین ۱۲/۰۱ تا ۱۲/۰۳ متغیر است (جدول ۵).

جدول ۵: تراکم شبکه زهکشی (1/ KM) در واحدهای زمین‌شناسی

واحد زمین‌شناسی	شماره پلات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	میانگین تراکم زهکشی
گرانیت الوند	نمونه	۱۰/۷۴	۱۰/۳۷	۱۰/۷۴	۱۱/۱۲	۱۰/۷۲	۱۱/۰۸	۱۰/۸	۱۰/۶۲	۱۰/۷۷۳
هورنفلس کلریت‌دار	نمونه	۱۵/۹۳	۱۵/۸۹	۱۵/۹۲	۱۵/۹	۱۵/۸۹	۱۵/۹۳	۱۵/۹۱	۱۵/۹۲	۱۵/۹۱۱
	نمونه	۱۵/۶۳	۱۵/۶۳	۱۵/۴۶	۱۵/۴۷	۱۵/۴۵	۱۵/۴۸	۱۵/۵۸	۱۵/۵۵	۱۵/۵۳۱

										سنگ آهک مارنی
										شیست استرولیت دار
۱۲/۰۳۱	۱۲/۰۴	۱۲/۰۵	۱۲/۰۳	۱۲/۰۲	۱۲/۰۵	۱۲/۰۱	۱۲/۰۲	۱۲/۰۳	نمونه	

ارزیابی تکنیک‌های پارامترهای ژئومورفولوژی کمی

جهت ارزیابی تکنیک‌های پارامترهای ژئومورفولوژی کمی ابتدا تحلیل آماری داده‌های تراکم شبکه زهکشی مربوط به هر واحد زمین‌شناسی انجام و سپس معادله ضریب همبستگی، ضریب تعیین و زاویه انحراف ارزیابی شد. نتایج ارزیابی بعد فراکتال شبکه زهکشی در واحدهای زمین‌شناسی چهارگانه مورد مطالعه نشان دهنده بالا بودن مقادیر صحت سنجی مقادیر بعد فراکتال آن‌ها می‌باشد (جدول ۶). به طوری که مقادیر نسبت صحت سنجی ۰/۹۷ در شیست استرولیت‌دار و ۰/۹۹ در گرانیته‌ها و سنگ آهک مارنی و ۰/۹۸ در هورنفلس‌های کلریت‌دار بیانگر صحت داده‌های مورد استفاده است. نتایج نشان می‌دهد که نسبت صحت سنجی در تکنیک بعد فراکتال شبکه زهکشی در چهار واحد زمین‌شناسی بسیار خوب ۰/۹۹ می‌باشد که بیانگر کارایی خوب تکنیک بعد فراکتال جهت شناسایی و تفکیک واحدهای زمین‌شناسی است که با نتایج برزگری دهج و همکاران (۱۳۹۸)، علیمردادی (۱۳۹۵)، همایون نژاد و همکاران (۱۳۹۵) و دونادیو و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد.

جدول ۶: نسبت صحت سنجی تکنیک بعد فراکتال در چهار واحد زمین‌شناسی منطقه

واحد زمین‌شناسی / نوع روش	گرانیت الوند	هورنفلس کلریت دار	سنگ آهک مارنی	شیست استرولیت‌دار
بعد فراکتال شبکه زهکشی	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۷

تحلیل آماری بعد فراکتال شبکه زهکشی

بررسی داده‌های ضریب تعیین و زاویه انحراف در هریک از واحدهای زمین‌شناسی نشان می‌دهد که این مقادیر در تکنیک بعد فراکتال شبکه زهکشی تا حدودی بالا است. به طوری که زاویه انحراف در شیست استرولیت‌دار با مقدار ۱/۹۰۹، در گرانیته ۱/۵۷۵، در هورنفلس ۱/۵۲۸ و در سنگ آهک مارنی ۱/۱۷۱ می‌باشد (جدول ۷). بررسی‌ها نشان می‌دهد که ضریب تعیین و همچنین زاویه انحراف در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی قابل قبول و بسیار مناسب می‌باشد. همچنین مقادیر ضریب تعیین (R^2) بعد فراکتال شبکه زهکشی در هر چهار واحد زمین‌شناسی و مقادیر محاسباتی بعد فراکتال شبکه زهکشی، بسیار خوب و به مقدار ۰/۹۹ می‌باشد و بیانگر کارایی خوب تکنیک جهت شناسایی و تفکیک واحدهای زمین‌شناسی منطقه است. با توجه به نزدیکی اعداد ضریب تعیین در تکنیک بعد فراکتال تراکم شبکه زهکشی به عدد ۱، زاویه انحراف کم و نزدیکی ارقام محاسباتی آن به صفر، تکنیک بعد فراکتال شبکه زهکشی برای تفکیک واحدهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه بهترین و مناسب‌ترین تکنیک است. به طور کلی نتایج نشان داد که با افزایش بعد فراکتال، همراه با پارامتر شبکه زهکشی، دقت تفکیک واحدهای زمین‌شناسی نیز افزایش می‌یابد (جدول ۸).

جدول ۷: معادله خط، ضریب تعیین و زاویه انحراف در تفکیک واحدهای زمین‌شناسی به کمک بعد فراکتال شبکه زهکشی

واحد زمین‌شناسی	معادله خطی	R ²	زاویه نمودار (درجه)	زاویه انحراف (درجه)
گرانیت الوند	Y=0.26X-1.58	۰/۰۶۴	۴۱/۲۷	۱/۵۷۵
هورنفلس کلریت دار	Y=0.14X-1.53	۰/۰۱۴	۴۴/۲۳	۱/۵۲۸
سنگ آهک مارنی	Y=0.13X+1.71	۰/۰۳۳	۴۳/۷۶	۱/۱۷۱
شیست استرولیت دار	Y=0.51X-1.91	۰/۳۷۲	۴۴/۵۷	۱/۹۰۹
خط انطباق	Y=X	۱	۴۵	۰

جدول ۸: ارزیابی تکنیک بعد فراکتال شبکه زهکشی

نوع روش	پارامتر	گرانیت الوند	هورنفلس کلریت دار	سنگ آهک مارنی	شیست استرولیت دار
بعد فراکتال شبکه زهکشی	زاویه انحراف	۱/۵۷۵	۱/۵۲۸	۱/۱۷۱	۱/۹۰۹
	ضریب تعیین	۰/۲۵۲	۰/۱۱۸	۰/۱۸۲	۰/۶۱۰

پس از اطمینان از نتایج حاصل از دقت و کارایی بعد فراکتال در تفکیک سازندهای منطقه مورد مطالعه بررسی و ارزیابی ارتباط بعد فراکتال و حساسیت سازندهای منطقه با استفاده از تحلیل ضریب همبستگی و آزمون پیرسون انجام شد. بررسی رگرسیون مقادیر بعد فراکتال و شاخص عددی مقاومت به فرسایش سازندهای مورد بررسی نشان می‌دهد که مقدار R² معادل ۰/۸۳۵ نشان‌دهنده همبستگی بالا و ارتباط معنی‌دار بعد فراکتال با شاخص عددی مقاومت به فرسایش است و نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت سازندها، بعد فراکتال آن‌ها کاهش می‌یابد (جدول ۹).

جدول ۹: آزمون همبستگی داده‌های درجه مقاومت (Sf) و عدد فراکتال (Fr) سازندهای منطقه

بعد فراکتال شبکه زهکشی سازندها	درجه مقاومت سازندها	تعداد داده‌ها	ضریب همبستگی پیرسون
۰/۸۲۸- **	۱		درجه مقاومت سازندها
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱۳	
۱۳	۱۳		
۱	۰/۸۲۸- **	۱۳	بعد فراکتال شبکه زهکشی سازندها
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰		
۱۳	۱۳		

نتایج بررسی آزمون پیرسون و مقدار همبستگی (۰/۸۲۸-) داده‌ها نشان می‌دهد مقدار عددی آن بین -۱ و +۱ می‌باشد. لذا با توجه به اینکه هر چه قدر مطلق این عدد به ۱ نزدیک‌تر باشد، مقدار همبستگی بیشتر است و هر چه مقدار آن به صفر نزدیک باشد، همبستگی داده‌ها کمتر است، بنابراین بررسی‌ها نشان می‌دهد که بین مقاومت سازندها و بعد فراکتال آن‌ها ارتباط معنی‌داری وجود دارد و علامت منفی نشان‌دهنده رابطه معکوس داده است. از آنجایی که مقدار همبستگی معادل ۰/۸۲۸- است، لذا بین بعد فراکتال سازندها و مقاومت آن‌ها به فرسایش ارتباط معنی‌دار معکوس برقرار است، یعنی

با افزایش مقاومت سازندها به فرسایش بعد فراکتال آن‌ها کاهش می‌یابد و لذا تراکم زهکشی هم پایین است. در جدول (۱۰) مقادیر R و Rsquare ارائه شده است که به ترتیب R نشان دهنده همبستگی ساده بین دو متغیر است. یعنی شدت همبستگی که مقدار آن بین صفر و +۱ است و Rsquare (ضریب تعیین) نشان می‌دهد که مقدار متغیر وابسته Sf می‌تواند توسط متغیر مستقل Fr تعیین شود. هر چه مقدار R به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده همبستگی بالای بین دو متغیر است، در این رابطه مقدار عددی $-0/828$ گویای همبستگی قابل قبول دو متغیر مقاومت سازندها و عدد فراکتال آن‌ها است و مشاهده می‌شود که ارتباط دو متغیر معنادار و معکوس است (جدول ۱۰).

جدول ۱۰: رگرسیون مقادیر داده‌های مقاومت (Sf) و عدد فراکتال (Fr) سازندهای منطقه

مدل	R	مجموع مربعات خطا	(مربع خطا تخمین زده شده)	(تخمین خطای انحراف معیار)
۱	$-0/828$	$0/798$	$0/793$	$0/0508$

نتایج بررسی جدول ANOVA معنی‌داری کل مدل را به خوبی نشان می‌دهد و نشان می‌دهد اگر سطح معنی‌داری آماره F کمتر از $0/05$ باشد، متغیر مستقل به خوبی تغییرات متغیر وابسته را تبیین می‌کند. مقدار F برابر $114/879$ با سطح معنی‌داری $0/000$ مشخص شده و چون با سطح معنی‌داری $0/05$ کمتر محاسبه شده است، نتایج بررسی نشان می‌دهد که مدل معنی‌دار است. بنابراین نتایج بیانگر این است که مقدار همبستگی $-0/828$ به خوبی ارتباط و تاثیر دو متغیر در سطح $0/000$ معنادار و به شکل معکوس می‌باشد (جدول ۱۱). بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده و مقادیر همبستگی آماری، می‌توان در دامنه‌های شمالی الوند همدان با صرف هزینه کمتر و با سرعت بیشتری با داشتن بعد فراکتال نه تنها نوع سازندهای منطقه را با دقت قابل قبول پیش‌بینی و تفکیک نمود، بلکه می‌توان با استفاده از بعد فراکتال شبکه زهکشی و تشابه ژئومورفولوژیکی در بین آن‌ها، ارتباط مستقیم بعد فراکتال و حساسیت سازندها به فرسایش را با دقت قابل قبولی ارزیابی و تفکیک کرد. نتایج نشان می‌دهد که بعد فراکتال در تشکیلات مقاوم به فرسایش تا سازندهای حساس به فرسایش دارای روند صعودی است و این موضوع به خوبی بیانگر است که یکی از ویژگی‌های مهم ژئومورفولوژیکی منطقه به نام توپوگرافی فراکتالی و شبکه زهکشی رودخانه‌ای فراکتالی در تفکیک حساسیت سازندها بسیار موثر و یکی از ابزارهای مفید و سودمند در تفکیک حساسیت سازندها می‌باشند و نشان می‌دهد که تطابق شیب، شبکه زهکشی، سازند و حساسیت به فرسایش را در منطقه می‌توان با ارزیابی بعد فراکتال آن‌ها به خوبی بررسی نمود. بدین ترتیب تدقیق نقشه شبکه آبراهه‌ها در سازندهای حساس به فرسایش بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

جدول ۱۱: آزمون همبستگی داده‌های مقاومت (Sf) و عدد فراکتال (Fr) سازندهای منطقه به روش

ANOVA

مدل	مجموع مربعات خطا	درجات آزادی	میانگین مربعات	f توزیع
	$0/260$	۱	$0/260$	
باقی مانده رگرسیون	$0/021$	۱۲	$0/000a$	$114/879$
	$0/281$	۱۲	$0/003$	

نتیجه‌گیری

از آنجایی که متغیرهای زمین‌شناسی تأثیر گسترده‌ای بر ماهیت و فعالیت سیستم‌های شبکه آبراهه‌ای دارند، لذا ویژگی‌های زمین‌شناسی تأثیر بسیار زیادی در ویژگی‌های فیزیکی حوضه و شبکه آبراهه‌ها دارد. به عبارتی نقش سنگ‌شناسی و سازندهای زمین‌شناسی در کمی‌سازی شبکه زهکشی بسیار مشخص است. بنابراین می‌توان از روی شبکه زهکشی نیز

ویژگی‌های زمین‌شناسی و حساسیت آن‌ها به فرسایش را تا حدودی بررسی و به نتایج مطلوبی دست یافت. لذا هدف از این پژوهش تفکیک حساسیت سازندهای زمین‌شناسی دامنه‌های شمالی توده کوهستانی الوند همدان با استفاده از بعد فراکتال شبکه زهکشی می‌باشد. نتایج نشان داد که با تحلیل ابعاد فراکتال می‌توان به بررسی سریع و با دقتی قابل قبول واحدهای زمین‌شناسی را تفکیک نمود، که این امر باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت عمل می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیشترین ضریب همبستگی بعد فراکتال سازندهای منطقه به ترتیب در واحد هورنفلس کلریت‌دار، سنگ آهک مارنی، شیست استرولیت‌دار و گرانیت الوند وجود دارد و در دامنه‌های شمالی الوند همدان هرچه طول، تعداد، انشعاب آبراهه‌ها و تراکم شبکه زهکشی افزایش یابد بعد فراکتال آن هم افزایش می‌یابد که از مهمترین دلایل آن می‌توان به تفاوت عواملی چون شیب، مورفولوژی، وجود درزها و شکاف‌ها، نفوذپذیری، شیستوزیته و ترکیب کانی‌شناسی اشاره نمود و بیانگر این است که با افزایش شاخص تراکم شبکه زهکشی در واحد سطح بعد فراکتال نیز افزایش می‌یابد. بیشترین تراکم زهکشی در دو واحد زمین‌شناسی هورنفلس کلریت‌دار و سنگ آهک مارنی نسبت به دو واحد دیگر مشاهده می‌شود که بیانگر تراکم آبراهه‌ها و انشعاب آبراهه‌های بیشتر در این دو واحد زمین‌شناسی است. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به نزدیکی اعداد ضریب تعیین در تکنیک بعدفراکتال شبکه زهکشی به عدد ۱، زاویه انحراف کمتر و نزدیکی ارقام محاسباتی آن به صفر می‌توان نتیجه گرفت که تکنیک بعد فراکتال تراکم زهکشی برای شناسایی و تفکیک واحدهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه بهترین و مناسب‌ترین تکنیک است. نتایج بررسی آزمون پیرسون و مقدار همبستگی (-0.828) داده‌ها نشان می‌دهد که بین مقاومت سازندها و بعد فراکتال آن‌ها ارتباط معنی‌داری و معکوس وجود دارد، یعنی با افزایش مقاومت سازندها به فرسایش بعد فراکتال آن‌ها کاهش می‌یابد و لذا تراکم زهکشی هم پایین است. نتایج بررسی آماری ANOVA معنی‌داری کل مدل و ارتباط و تاثیر دو متغیر حساسیت سازند و بعد فراکتال را در سطح 0.000 معنادار و به شکل معکوس نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که بعد فراکتال در تشکیلات مقاوم به فرسایش تا سازندهای حساس به فرسایش دارای روند صعودی است که با نتایج برزگری دهج و همکاران (۱۳۹۸)، که به تولید توپوگرافی فراکتالی و شبکه رودخانه ای فراکتالی منجر می‌شود، همخوانی دارد. با توجه به نتایج حاصله از همبستگی آماری در رابطه با، ارتباط مستقیم بعد فراکتال و حساسیت سازندها به فرسایش و تشابه ژئومورفولوژیکی در بین بعد فراکتال، نوع سازند و حساسیت به فرسایش، می‌توان با دقت قابل قبول و مناسب از این تکنیک در تفکیک نوع سازندها و حساسیت آن‌ها به فرسایش و با صرف هزینه کمتر و با سرعت بیشتری استفاده نمود که با نتایج (جوکار سرهنگی و همکاران، ۱۳۹۹)؛ خلیفه سلطانی و همکاران، ۱۳۹۵ و علیمردی و همکاران، ۱۳۹۷) از نظر ارتباط مستقیم بعد فراکتال با شبکه زهکشی و حساسیت سازندها همخوانی دارد.

منابع

- احمدی خلجی، ا.، و طهماسبی، ز.، ۱۳۹۴. شیمی کانی گارت در پگماتیت‌ها و سنگ‌های دگرگونی منطقه همدان، نشریه: زمین‌شناسی اقتصادی، دوره ۷، شماره ۲، صص ۲۴۳ - ۲۵۸.
- امیری، م.، پیروان، ح. ر. و احمدی خلجی، ا.، ۱۳۹۴. طبقه‌بندی مارن‌های همدان و ارتباط گروه‌های مارنی منطقه با نوع و شدت فرسایش، نشریه: مهندسی و مدیریت آبخیز، دوره ۷، شماره ۴، صص ۴۲۵ - ۴۴۱.
- برزگری دهج، و.، زارع، م.، و اختصاصی، م.، ۱۳۹۸. مقایسه شاخص بدون بعد تراکم شبکه زهکش و بعد فراکتال شبکه زهکشی در جداسازی واحدهای سنگ‌شناسی (منطقه مورد مطالعه: حوضه آبخیز تفت، یزد). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۸، شماره ۳۱، صص ۸۰ - ۹۶.
- جوکار سرهنگی، ع.، و بخشی، م.، ۱۳۹۹. ارتباط بین سازندهای زمین‌شناسی و فرم منحنی میزان نقشه‌های توپوگرافی در بخشی از البرز شمالی و جنوبی. فصل‌نامه جغرافیای طبیعی، دوره ۱۳، شماره ۵۰، صص ۸۱ - ۹۵.

- چرچی، ع.، خطیب، م.، مظفرخواه، م.، و برجسته، آ.، ۱۳۹۰. استفاده از تحلیل فراکتالی برای تعیین پویایی تکتونیک شمال منطقه لالی در شمال شرق خوزستان. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱، صص ۳۷-۴۷.
- حسینی، ع. و فتاحی، هادی، ۱۴۰۰. بررسی مقایسه‌ای شاخص مورفولوژی زاویه مرکزی (A) با پارامترهای چند فراکتالی الگوی تکامل پیمان رودها با استفاده از روابط رگرسیونی (مطالعه موردی: رودخانه قره آغاج در استان فارس)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۹، شماره ۴ - شماره پیاپی ۳۶، بهار ۱۴۰۰، صفحه ۹۶-۱۱۱.
- خلیفه سلطانی، ا.، علوی، ا.، و قاسمی، ۱۳۹۵. بررسی نقش ساختارهای زمین‌شناسی در ابعاد فراکتالی شکستگی‌ها و آبراهه‌ها در جنوب باختری لنجان - اصفهان. نشریه علوم زمین، سال ۲۶، شماره ۱۰۱، صص ۴۵-۵۶.
- سپاهی گرو، ع.، ا.، جعفری، س.، ر.، مؤذن، م.، و شهبازی، ح. ۱۳۹۷. بررسی شیمی کانی، دما فشارسنجی و سنگ زایی سنگ‌های میگماتیته منطقه همدان، پترولوژی، دوره ۹، شماره ۳۳، صص ۱۶۵ - ۱۹۰.
- سپاهی گرو، ع.، ا.، و معین وزیری، ح. ۱۳۷۹. مروری بر فازهای نفوذی و رگه‌های موجود در مجموعه نفوذی الوند، نشریه علوم دانشگاه تهران، دوره ۲، شماره پیاپی ۱۳۱۸، صص ۱۷۵-۱۸۶.
- سلطانی، ش.، قهرودی تالی، م.، و صدوق، ح. ۱۳۹۸. کاربرد سنجش از دور و مدل ریاضی فراکتال در بررسی رفتار و تغییرات لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه ارس. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۷، شماره ۴، صص ۹۲-۷۳.
- شکیبیا، س.، سپاهی گرو، ع.، ا.، قاسمیپور، م.، ر.، و کازو، ن. ۱۳۹۹. کاربرد شیمی کانی‌های بیوتیت و ارتوپروکسن در بررسی شرایط تکتونو- ماگمایی انکلاوهای توده پلوتونیک الوند و سنگ میزبان آن‌ها، نشریه علوم زمین، دوره ۳۰، شماره ۱۱۸، صص ۲۲۵- ۲۴۰.
- شهبازی، ح.، ۱۳۸۹. پترولوژی مجموعه سنگ‌های آذرین و میگماتیته‌های کمپلکس الوند و توده نفوذی آلموقلاخ همدان و ارتباط بین آن‌ها، رساله دکتری، دانشگاه شهید بهشتی.
- شایان، س.، مقصودی، م.، گل‌علیزاده، م.، شریفی‌کیا، م.، و نوربخش، ف. ۱۳۹۴. تحلیل فضایی لندفرم‌های بادی با استفاده از نظریه فراکتالی (مطالعه موردی: ریگ اردستان). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۸، شماره ۲، صص ۲۴۵-۲۳۱.
- شایان، س.، یمانی، م.، و یادگاری، م. ۱۳۹۴. مورفولیتولوژی توده الوند و نقش آن در مورفومتری و الگوی شبکه زهکشی. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۴، شماره ۳، صص ۱۶-۱.
- علیمردادی، م.، اختصاصی، م.، تازه، م.، و کریمی، ح. ۱۳۹۷. محاسبه بعد فراکتال سازندهای زمین‌شناسی و بررسی ارتباط آن با حساسیت سازندها. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)، دوره ۵۰، شماره ۲، صص ۲۵۳-۲۴۱.
- فتاحی، م. و طالب زاده، ز. ۱۳۹۶. ارتباط بین ضریب فشردگی حوضه آبریز با ویژگی‌های فراکتال آن، نشریه تحقیقات منابع آب ایران، دوره ۱۳، شماره ۱، صص ۱۹۱ - ۲۰۳.
- فتاحی، م.، و کامیاب، س. ۱۳۹۷. انطباق سنجی خواص ژئومورفولوژیک حوضه آبریز و ویژگی‌های چند فراکتال شکل آبراهه. نشریه تحقیقات منابع آب ایران، دوره ۱۴، شماره ۵، صص ۳۳۹-۴۵۱.
- فیض‌نیا، س. ۱۳۷۴. مقاومت سنگ‌ها در مقابل فرسایش در اقلیم مختلف ایران، مجله منابع طبیعی ایران، ۴۷: صص ۹۵-۱۶۵.
- کرم، ا.، و صابری، م. ۱۳۹۴. محاسبه بعد فراکتال در حوضه‌های زهکشی و رابطه آن با برخی خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوضه (مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز شمال تهران). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۴، شماره ۳، صص ۱۶۷-۱۵۳.
- کامیاب، س.، و فتاحی، م. ۱۳۹۷. انطباق سنجی خواص ژئومورفولوژیک حوضه آبریز و ویژگی‌های چند فراکتال شکل آبراهه تحقیقات منابع آب ایران، دوره ۱۴، شماره ۵، صص ۳۲۶-۳۱۱.
- محمدی خشویی، م.، اختصاصی، م.، طالبی، ع.، و حسینی، ز. ۱۳۹۸. بررسی رابطه بین بعد فراکتال و ویژگی‌های مورفومتریکی شبکه زهکشی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز دشت یزد-اردکان). نشریه خشک بوم، دوره ۹، شماره ۲، صص ۱-۱۶.

- محمدی خشویی، م.، و اختصاصی، م. ۱۳۹۸. مقایسه بعد فراکتال و ویژگی‌های ژئومورفولوژیک در مدیریت حوضه آبخیز عقدا. پژوهش‌های فرسایش محیطی، دوره ۹، شماره ۱، صص ۶۲-۸۴.
- نظری صارم، م.، دبیری، ر.، انصاری، م.، و وثوقی عابدینی، م. ۱۳۹۹. برآورد بعد فراکتالی ژئومورفولوژی کرانه‌های شمال خلیج فارس با استفاده از روش شمارش جعبه‌ای. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۹، شماره ۳۴، صص ۱۷۴-۱۵۹.
- Ariza, V. A., Jiménez-Hornero, F., Gutiérrez de Ravé, E. (2013). Multi-fractal analysis applied to the study of the accuracy of DEM-based stream derivation, *Geomorphology*, 197: 85-95.
- Baas, A.C.W. (2002). Chaos, fractals and self-organization in coastal geomorphology: simulating dune landscapes in vegetated environments. *Journal of Geomorphology*, 48: 309-328.
- Bi, L., He, H., Wei, Z., Shi, F. (2012). Fractal properties of landform in the Ordos block and surrounding areas. *Journal of China Geomorphology*, 175: 151-162.
- Campos, P., & Paz, I. (2020). Spatial Diagnosis of Rain Gauges' Distribution and Flood Impacts: Case Study in Itaperuna, Rio de Janeiro—Brazil. *Journal of Water*, 12(1): 1120-1147.
- Dutta, S., Ghosh, D., Chatterjee, S. (2014). Multifractal detrended fluctuation analysis of pseudorapidity and azimuthal distribution of pions emitted in high energy nuclear collisions, *Int. J. Mod. Phys, A* 29, 1450084.
- Donadio, C., Magdaleno, F., Mazzarella, A., Kondolf, G. M. (2014). Fractal dimension of the hydrographic pattern of three large rivers in the Mediterranean morphoclimatic System: geomorphologic interpretation of Russian (USA), Ebro (Spain) and Volturno (Italy) *Fluvial Geometry, Pure and Applied Geophysics*, 172: 1975-1984.
- Fac-Beneda, J. (2013). Fractal structure of the Kashubian hydrographic system, *Journal of Hydrology*, 488: 48 – 54.
- Garsia-Ruiz. Juan, M. (1992). *Fractal Trees and Horton's Laws Mathematical Geology*, vol24
- Horton, R.E. (1945). *Erosional Developments of Streams and Their Drainage Basin; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology*; *Geol. Soc. Am. Bull*, 56: 275-370.
- Hosseini, M. Fattahi, M.H. and Eslamian, S. (2020). Experimental Analytical Study on Fractal Behaviors of the Density Current. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44(4): 75-90.
- Hui, Y., Changxing, S. (2017). The Fractal Characteristics of Drainage Networks and Erosion Evolution Stages of Ten Kongduis in the Upper Reaches of the Yellow River, China. *Journal of Resources and Ecology*, 8: 165 –174.
- Ildoromi, A.R. (2011). Evaluation of Watershed Stability using Geomorphologic and Tectonics Evidence (Case study: Alvand Mountain), *International Journal of Natural Resources and Marine Sciences* 2011, 1 (3), 175-186.
- Kusak, M. (2014). Methods of fractal geometry used in the study of complex geomorphic networks, *AUC Geographica*, 49: 99–110
- Kumar, A. (2014). Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph Based Hydrologic Response Models for Ungauged Hilly Watershed in India, *Water Resources Management*, DOI 10.1007/s11269-014-0848-z.
- Lee, A., Aubeneau, A & Cardenas, M. (2020). The Sensitivity of Hyporheic Exchange to Fractal Properties of Riverbeds” *Journal of Water*, 56(5): 20-42.
- Marin, G.A., Estevez, J., Morbidelli, R., Saltalippi, C., Murioz, J., & Flammini, A. (2020). Assessing Inhomogeneities in Extreme Annual Rainfall Data Series by Multifractal Approach” *Journal of Water*, 12(1): 1030-1048.

- Mandelbrot, B. B., 1983. *The fractal geometry of nature/Revised and enlarged edition*, New York, WH Freeman and Co. 495p.
- Prigarin, S.P., Sandau, K., Kazmierczak, M., Hahn, K. (2013). *Estimation of Fractal Dimension: A Survey with Numerical Experiments and Software Description*, *International Journal of Biomathematics and Biostatistics*, 2: 167-180.
- Teng, Y., & Shang, P. (2018). *Detrended fluctuation analysis based on higher-order moments of financial time series*. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 490(1): 311-322
- Turcotte, D.L. (2007). *Self-organized Complexity in Geomorphology: Observations and Models*, *Geomorphology*, 91: 302-310.
- Vargas, K., & Salarriaga, J. (2019). *Analysis of Fractality in Water Distribution Networks Using Hydraulic Criteria*. *World Environmental and Water Resources*, 15(1): 25-38.
- Waniki, M. W., Moeller, M. S., Schellmann, G. (2015). *A comparison of Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) in mapping geology and visualizing lineaments: A case study of central region Kenya*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- Zhang, X., Zhang, G., Qiu, L., Zhang, B., Sun, Y., Gui, Z., & Zhang, Q. (2019). *A Modified Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (MFDFA) Approach for Multifractal Analysis of Precipitation in Dongting Lake Basin, China*. *Journal of Water*, 11(5): 891-1009.