

## محاسبه بُعد فراکتال سازندهای زمین‌شناسی و بررسی ارتباط آن با حساسیت سازندها

مهتاب علیمردی - کارشناس ارشد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد  
محمدرضا اختصاصی\* - استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد  
مهدی تازه - استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان  
حاجی کریمی - دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۰

### چکیده

ویژگی‌های زمین‌شناسی تأثیر بسیار زیادی در ویژگی‌های فیزیکی حوضه و شبکه آبراهه‌ها دارد. هدف از این پژوهش تعیین بُعد فراکتال شبکه هیدروگرافی و بررسی ارتباط بُعد فراکتال با الگوهای ژئومورفولوژی سازندهای زمین‌شناسی و میزان حساسیت آن‌ها در حوضه‌های مورد مطالعه است. پس از محاسبه بُعد فراکتال و تعیین میزان حساسیت هر سازند، ارتباط بُعد فراکتال با سازندها در حوضه‌های مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد بین عدد فراکتال و حساسیت سازندهای حوضه‌ها، که بیانگر میزان فرسایش و ناهمواری در حوضه است، ارتباط معناداری در سطح ۵ درصد و افزایشی وجود دارد؛ به نحوی که با افزایش حساسیت سنگ‌شناسی و، به تبع آن، تراکم زهکشی، عدد فراکتال افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار بُعد فراکتال در حوضه‌های مطالعاتی مربوط به سازند کواترنری ریزدانه معادل ۱/۶۵ و کمترین مقدار عددی بُعد فراکتال مربوط به سازند سروک معادل ۱/۰۶ است. همچنین، در سازندهایی با حساسیت بیشتر نسبت به سازندهای مقاوم تغییرات بیشتری در تراکم شبکه هیدروگرافی رخ داده است؛ در نتیجه، تغییر بُعد فراکتال آن‌ها نیز بیشتر مشاهده می‌شود.

کلیدواژه‌ها: ایلام، بُعد فراکتال، سازندهای زمین‌شناسی، شبکه هیدروگرافی.

### مقدمه

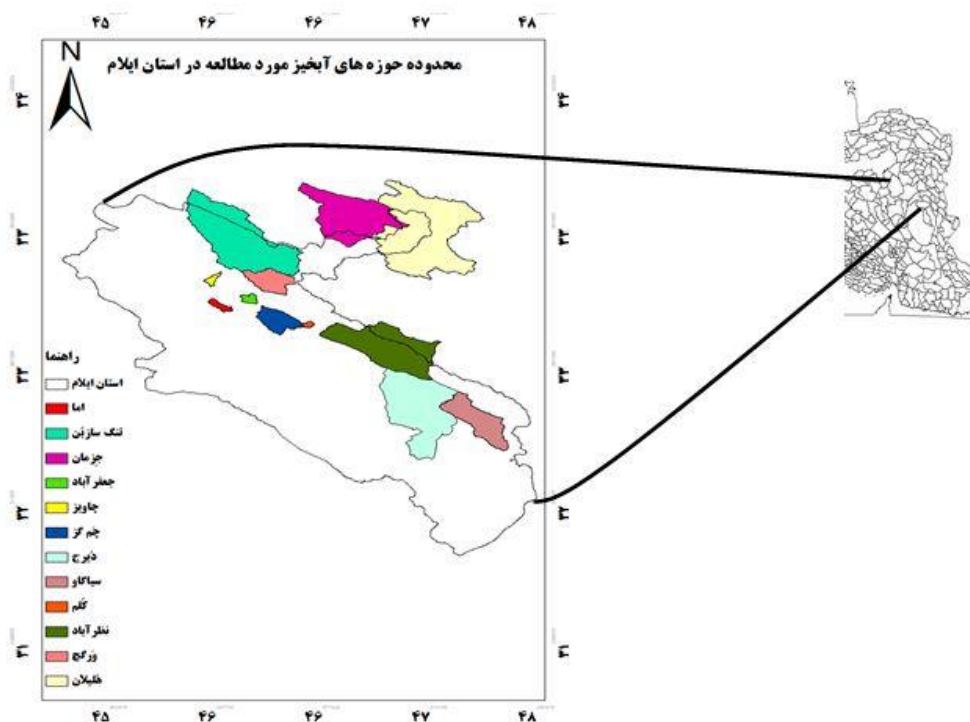
آبراهه‌ها مسیرهای شاخه‌ای هستند که پخش آب را بر روی سطوح شیب‌دار و ناهموار زمین میسر می‌کنند. پس از مطرح‌شدن مفهوم هندسه فراکتال توسط مندل بورت، در سال ۱۹۸۲، بسیاری از محققان تحلیل فراکتال را در مدل‌سازی شبکه‌های رودخانه‌ای به کار بردند و نشان دادند که الگوها و سایر شاخص‌های حوضه‌های آبریز و رودخانه‌ها از هندسه فراکتالی تبعیت می‌کنند. محققان قابلیت هندسه فراکتال را در توجیه رفتار فیزیکی و دینامیکی رودخانه‌ها آزموده‌اند. بررسی‌های محققان ذات و طبیعت فراکتالی این فرایندها را نیز ثابت کرده است. مثلاً، آنان رد پای هندسه فراکتالی را در سری‌های زمانی رسوبات رودخانه‌ها مشاهده کرده‌اند (دیبارتلو و همکاران، ۲۰۰۰: ۱۱۱). محققان برای بررسی هندسه رودخانه و همچنین برای تبدیل الگوهای هندسی به یکدیگر از معیارهایی چون نسبت پهنا به عمق، ضریب بریدگی، شیب طولی، توان رود، سینوزیته، شکل پلان، و لیتولوژی بستر رودخانه استفاده کرده‌اند (رضایی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۰: ۲). فراکتال یک شکل جزئی با الگوی هندسی ثابت است که نشان‌دهنده الگوی کلی یک پدیده است (اختصاصی، ۱۳۹۴). هندسه فراکتال ابزاری برای اندازه‌گیری اشکال نامنظم است. بر اساس روش مربع‌شمار، که یکی از ابزارهای

هندسه فراکتال است، بین بُعد فراکتال و بی‌نظمی اشکال ارتباط مستقیمی وجود دارد؛ به طوری که اجسام با بی‌نظمی بیشتر دارای بُعد فراکتال بزرگ‌تری هستند (طهماسبی و همکاران، ۱۳۹۴: ۴۱۷). هندسه فراکتال یکی از مهم‌ترین روش‌های ساختاری است که با تعیین بُعد فراکتال ساختارهای خطی مثل گسل‌ها، آبراهه‌ها، و مسیرهای پُریچ‌وخم رودخانه‌ها می‌توان بسیاری از خصوصیات آن‌ها (میزان جابه‌جایی، شناسایی میزان تغییرات، ...) را تخمین زد (تورکوت، ۱۹۹۲: ۳۴۵-۳۶۹). خاصیت فراکتالی آبراهه‌ها برای اولین بار در تحقیقات بریر<sup>۱</sup> (۱۹۹۲) گزارش شده است که مشاهدات وی محدود به مقیاس‌های کوچک و نیز تعداد کمی از نمونه‌ها بود (کرم و صابری، ۱۳۹۴: ۱۵۴). نخستین بررسی‌ها در راستای ایجاد مدل‌های کمی، ریاضی، و هندسی مناسب از شبکه رودخانه توسط هورتون در سال‌های ۱۹۳۲ و ۱۹۴۵ انجام پذیرفت. در سال‌های بعد، لا‌باربرا و روسو (۱۹۸۹) مفهوم فراکتالی شاخه‌های رودخانه را وارد فرمول‌بندی هورتون کردند؛ ولی بررسی ارتباط و مقایسه پارامترهای کمی با هندسه فراکتال به دو دهه اخیر برمی‌گردد. بُعد فراکتال حوضه‌های آبریز معرف میزان تشابه ژئومورفولوژیکی در بین آن‌هاست. پارامترهایی مانند طول کل رودخانه‌ها، میزان انشعاب، خمیدگی و فراوانی آن‌ها، و در مجموع شکل و گستردگی مسیرها در بُعد فراکتالی ملحوظ است (عدل و مهروند، ۱۳۸۳: ۱). یکی از ویژگی‌های اساسی فراکتال، که پایه و اساس تجزیه و تحلیل‌های فراکتالی است، خودتشابهی آماری است که بیان‌کننده تشابه ظاهری در یک یا همه جهات و مقیاس‌هاست (مندل بورت، ۱۹۸۲). به عبارت دیگر، خودتشابهی آماری بیان‌کننده حالتی است که الگوی تغییرات موردنظر در یک مقیاس معین در دیگر مقیاس‌ها نیز تکرار می‌شود (بروگ، ۱۹۸۱: ۲۴۲). این خودتشابهی ممکن است به صورت تقریبی یا تصادفی وجود داشته باشد (پریگارین و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۶۷). کرم (۱۳۸۹: ۸۰) در مقاله خود، با نام «نظریه آشوب، فرکتال، و سیستم‌های غیرخطی در ژئومورفولوژی»، به این موضوع اشاره می‌کند که رفتار آشوبناک در اغلب سیستم‌های دینامیکی پیچیده طبیعی و ژئومورفیک، از جمله جریان‌های سطحی، حرکت توده‌ای، و سیستم خاک، دیده می‌شود و دیدگاه‌های جدید در ژئومورفولوژی تلاش می‌کنند رفتار پیچیده آشوبناک در سیستم‌های یادشده را از طریق نظریه آشوب و مفاهیم مرتبط با آن تبیین کنند. احمدی و همکاران (۱۳۸۹: ۷۹) طی تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که بُعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری با مقادیر رس و سیلت و تخلخل خاک دارد و همبستگی منفی و معنی‌داری با درصد شن و میانگین هندسی قطر ذرات دارد. سرمدیان و همکاران (۱۳۹۰: ۶۱-۶۲) با مقایسه کارایی توابع انتقالی خطی، غیرخطی، و شبکه عصبی مصنوعی در برآورد بُعد فراکتال سطح داخلی خلل و فرج خاک به این نتیجه رسیدند که شبکه عصبی مصنوعی نسبت به سایر مدل‌های ارائه‌شده در این تحقیق با دقت بیشتری بُعد فراکتالی سطح داخلی خلل و فرج خاک را پیش‌بینی می‌کند.

## معرفی محدوده مورد مطالعه

### معرفی ایستگاه‌های هیدرومتری مورد بررسی

محدوده مورد مطالعه متشکل از دوازده حوضه آبریز شامل هلیلان، دُیرج، تنگ سازین، کلم، نظرآباد، جِزمان، و رَگج، چَم‌گَز، چاوِیز، سیاگاو، جعفرآباد، و اِما از زیرحوضه‌های آبریز استان ایلام است که پراکندگی مناسبی در دامنه‌های غربی رشته‌کوه زاگرس دارند و از سازندهای متنوعی برخوردارند. شکل ۱ سازندهای موجود در محدوده حوضه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد



شکل ۱. موقعیت استانی و کشوری حوضه‌های مورد مطالعه، استان ایلام

جدول ۱. مشخصات سازندهای موجود در محدوده مطالعاتی

نام سازند	علامت اختصاری	لیتولوژی	درجه حساسیت به فرسایش از ۱۰
کواترنری دانه‌ریز	Q <sub>t.al</sub>	نهبشته‌های آبرفتی بستر رودخانه	۱
کواترنری دانه‌درشت	Q <sub>t.af</sub>	مخروط‌افکنه	۵
آغاچاری	N <sub>e.aj</sub>	ماسه‌سنگ، مارن، آهک ماسه‌ای، کنگلومرا	۶
گچساران	N <sub>e.Gs</sub>	مارن، آهک مارنی	۳
آسماری - شهبازان	O <sub>l.as</sub>	آهک کارستی شده، دولومیت	۹
پابده - گورپی	Pa <sub>pa.G</sub>	تناوب شیل خاکستری و شیری با سنگ‌آهک مارنی	۷
کشکان	Eo <sub>.ka</sub>	کنگلومرا و ماسه‌سنگ و سیلتستون قرمز رنگ	۹
آهک تله‌زنگ	Eo <sub>te</sub>	سنگ‌آهک مارنی لایه متوسط سفید تا کرم رنگ	۹
امیران	Pa <sub>l.am</sub>	سیلتستون و ماسه‌سنگ‌های زیتونی رنگ تا قهوه‌ای تیره	۷
آهک امام حسن	Kt <sub>e.m</sub>	سنگ‌آهک ریفی فسیل‌دار کرم رنگ بامیان لایه‌های شیلی	۸
سروک	Kt <sub>sa</sub>	سنگ آهک نازک لایه	۹
ایلام	Kt <sub>il</sub>	سنگ‌آهک متوسط تا نازک لایه خاکستری و شیری رنگ	۷

در جدول ۱، با افزایش مقدار عددی درجه مقاومت، حساسیت سازند به فرسایش کاهش می‌یابد و اعداد کوچک‌تر نشان‌دهنده مقاومت کمتر به فرسایش است (طبقه‌بندی سنگ‌ها بر اساس سختی آن‌ها (بعد از پروتودیاکونوف)) (رزوسکی ونوویک، ۱۳۷۱).

ذکر این نکته لازم است که در طبقه‌بندی فیض‌نیا (۱۳۷۴)، که بر پایه تقسیم‌بندی رزوسکی<sup>۱</sup> انجام شده است، سنگ‌هایی با مقاومت بیشتر از امتیاز بالاتر (حداکثر ۲۰) و سنگ‌هایی با مقاومت کمتر از امتیاز پایین‌تر (حداقل ۱) برخوردار می‌شوند. بر این اساس، دامنه مقاومت به فرسایش سنگ‌ها و سازندهای موجود در حوضه‌های مورد بررسی از ۱ تا ۹ متغیر است.

## روش تحقیق

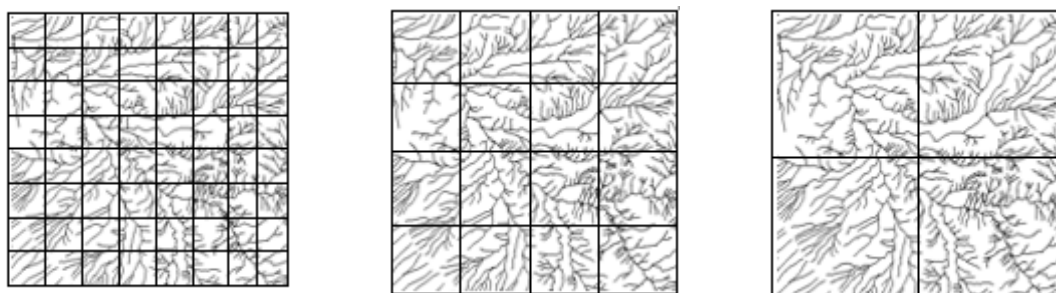
### بُعد فراکتال

اگر  $\varepsilon$  به عنوان مقیاسی که شیء فراکتالی در آن بررسی شده است در نظر گرفته شود؛ مثلاً طول منحنی مورد نظر با خط‌کشی که اندازه واحد اندازه‌گیری آن  $\varepsilon$  است اندازه گرفته شده باشد و  $N(\varepsilon)$  طول اندازه‌گیری شده باشد، آنگاه بُعد فراکتالی منحنی مورد نظر  $D$  از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log [N(\varepsilon)]}{\log \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)} \quad (1)$$

همان‌گونه که از این مثال پیداست، بُعد فراکتالی عموماً ناصحیح است؛ یعنی از آنجا که به عنوان مثال منحنی کج با وجود یک بُعدی بودن توانایی پُر نمودن صدمه را داراست و یک خم فراپرکن است، بُعد فراکتالی آن عددی بین بُعد ۱ (بُعد خط راست) و ۲ (بُعد صفحه) خواهد شد.

روش‌های مختلفی برای تعیین بُعد فراکتالی می‌توانند به کار گرفته شوند؛ یکی از پُرکاربردترین روش‌ها روش شمارش جعبه‌ای است. در صورتی که برای مثال تعیین بُعد فراکتالی شبکه هیدروگرافی یک حوضه مدنظر باشد، در این روش شبکه‌هایی با اندازه واحد شبکه متغیر بر روی شبکه هیدروگرافی حوضه قرار می‌گیرد و سپس با استفاده از رابطه ۱ بُعد فراکتالی شبکه هیدروگرافی حوضه آبریز به دست می‌آید. ذکر این نکته لازم است که در این روش  $\varepsilon$  اندازه واحد شبکه خواهد بود و  $N(\varepsilon)$  حداقل تعداد خانه‌هایی از شبکه است که کاملاً شبکه هیدروگرافی حوضه آبریز را پوشش می‌دهند (ملکشاهی و همکاران، ۱۳۹۱: ۲ و ۳). شکل ۱ کلی این روش را به تصویر می‌کشد.



شکل ۲. نحوه محاسبه بُعد فراکتال واحدهای ۲۵ کیلومتر مربع یا هر شکل طبیعی دیگر به طریق شمارش جعبه‌ای

### تهیه محدوده حوضه‌های مطالعاتی

به منظور تهیه محدوده حوضه‌های مطالعاتی برای مطالعه سازندها و شبکه هیدروگرافی آن‌ها، علاوه بر مدل رقمی ارتفاعی (DEM) ۵۰ متری موجود، از روش تفسیر و ترسیم مستقیم شبکه‌های هیدروگرافی از روی تصاویر ماهواره‌ای گوگل‌ارث با دقت حدود پنج متر استفاده شد.

### تهیه شبکه هیدروگرافی در محیط نرم‌افزار Arc GIS

پس از تعیین محدوده حوضه‌های آبریز، حوضه‌های مطالعاتی به محیط نرم‌افزار Arc GIS آورده شد. در محیط نرم‌افزار Arc GIS محدوده‌های مطالعاتی بر روی مدل رقومی ارتفاعی جدا شد و با استفاده از نرم‌افزار Arc Hydro طی مراحل شبکه‌های هیدروگرافی هر یک از حوضه‌های آبریز تهیه شد. ذکر این نکته لازم است که این شبکه‌ها بر اساس مختصات DEM ۵۰متری تهیه شده‌اند. در بسیاری از موارد دقت کافی نداشته و تعدادی از آبراهه‌ها نمایش داده نشده‌اند. بنابراین، پس از انتقال به محیط گوگل‌ارث، کاملاً با آبراهه‌های طبیعی تطبیق داده شد و با دقت پنج متر نقشه‌های هیدروگرافی ترسیم و تکمیل گردید تا بیانگر جزئیات کامل شبکه باشد.

### نحوه آماده‌سازی و تصحیح شبکه‌های هیدروگرافی به کمک نرم‌افزار گوگل‌ارث و تعیین بُعد فراکتال آن‌ها

از آنجا شبکه‌های هیدروگرافی به‌دست‌آمده در نرم‌افزار Arc Hydro با کمک DEM ۵۰متری از دقت مناسبی برخوردار نبود (مثلاً، در محیط گوگل‌ارث فقط آبراهه‌هایی با درجه ۳ مشخص شده بود و آبراهه‌هایی با درجه کمتر در بیشتر نقاط پیدا نبود)، که به نقص داده در روند کار منجر می‌شد، شبکه‌های هیدروگرافی هر یک از حوضه‌ها دوباره به محیط گوگل‌ارث آورده شد و مراحل اصلاح و تصحیح آن‌ها با استفاده از DEM پنج متر انجام شد. همان‌طور که اشاره شد، در محیط Arc GIS از شبکه‌های هیدروگرافی عکس‌هایی (خروجی‌هایی) با فرمت bmp تهیه می‌شود. این عکس‌ها ورودی نرم‌افزار Fractalys را تشکیل می‌دهد. فرمت bmp تصویر شبکه‌های هیدروگرافی را در قالب یک برگه A4 به‌دست می‌دهد. استفاده از این تصاویر موجب بروز خطا در عدد فراکتالی به‌دست‌آمده می‌شود؛ زیرا شبکه‌های هیدروگرافی محدوده‌های (محدوده سازند) بزرگ‌تر فشرده‌شده و عدد فراکتالی به‌دست‌آمده بیشتر از مقدار واقعی آن بود. در صورتی که در مورد محدوده‌های کوچک‌تر مقدار فشردگی کمتر بود یا وجود نداشت. بنابراین، بُعد فراکتالی به‌دست‌آمده کمتر از مقدار واقعی بود. این در حالی است که در مورد برخی مقاطع، که کوچک‌تر، با سازندهای حساس‌تر و تراکم بیشتر شبکه هیدروگرافی بود، انتظار عدد فراکتالی بالاتر می‌رفت. برای حل این مشکل و با توجه به اینکه در نرم‌افزار Fractalys نمی‌توان نقشه‌ها را هم‌مقیاس کرد، برای ایجاد نقشه‌های هم‌مقیاس جهت مقایسه بهتر (دقت بالاتر) با کمک برنامه Fish Net (در نرم‌افزار Arc GIS) عرصه‌هایی با مساحت یکسان ۲۵ کیلومتر تهیه شد. عرصه‌های مورد نظر بر روی سازندهای مشابه در حوضه‌های مختلف به‌صورت تصادفی انتخاب شد. برای هر سازند در حوضه مورد مطالعه سه عرصه ۲۵ کیلومتر مربع انتخاب شد و سپس با دقت پنج متر نقشه شبکه هیدروگرافی ترسیم و اصلاح گردید. نقشه‌های حاصل، که از مساحت و دقت ترسیم یکسان برخوردار شده بودند، با فرمت bmp بر روی صفحه A4 در محیط GIS با مقیاس یکسان ترسیم شدند و سپس به نرم‌افزار Fraktalys آورده شدند و نهایتاً ابعاد فراکتالی آن‌ها به روش جعبه‌شمارش هندسی محاسبه و استخراج شد و، با برآورد میانگین ابعاد فراکتال واحدهای ۲۵ کیلومتری برای هر حوضه، مقدار میانگین به‌دست‌آمده بُعد فراکتال حوضه در نظر گرفته شد.

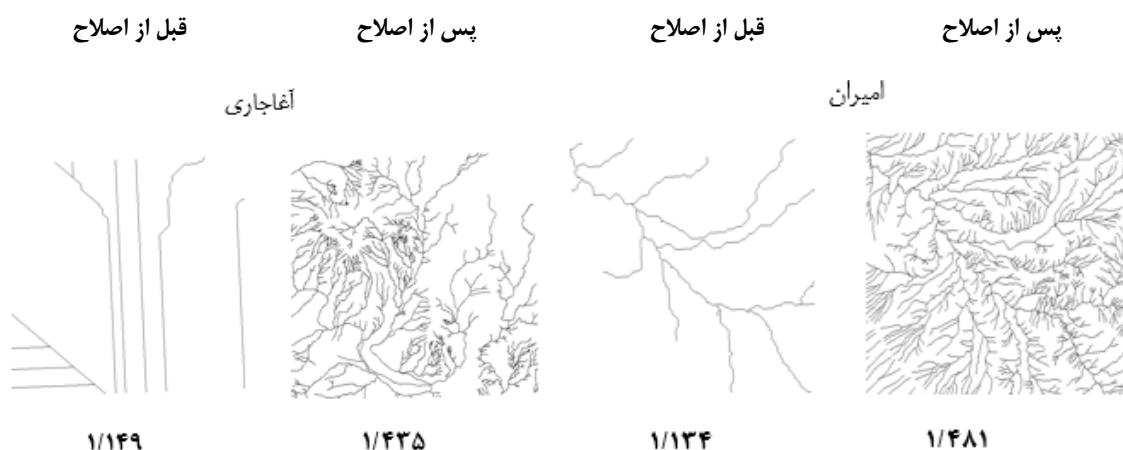
به‌منظور بررسی ارتباط بُعد فراکتال با سازندهای زمین‌شناسی از شاخص حساسیت‌پذیری سازندها استفاده شد و برای سازندها درجات حساسیتی بر اساس منابع مورد مطالعه تعریف گردید (فیض‌نیا و همکاران، ۱۳۸۷).

### نتایج و بحث

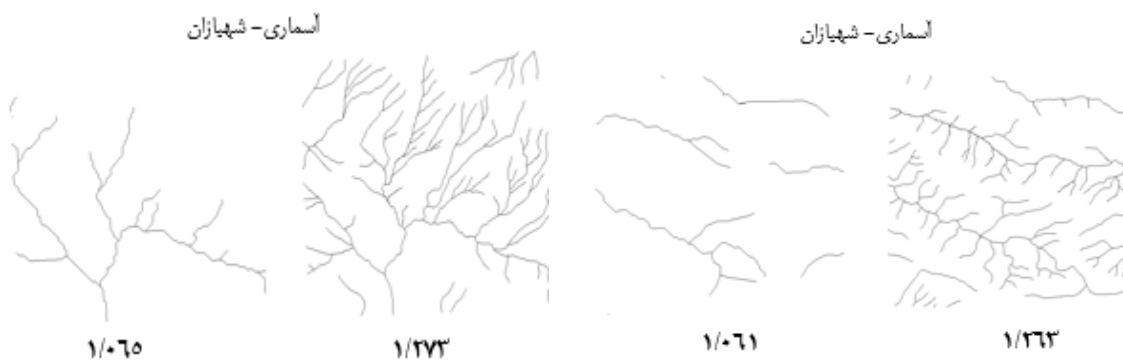
نتایج حاصل از تحقیق به منظور تعیین بُعد فراکتال سازندهای زمین‌شناسی در حوضه‌های آبریز استان ایلام و بررسی ارتباط آن با حساسیت سازندهای مورد مطالعه در تصاویر، جدول‌ها، و نمودارها ارائه شده است. از این رو، برای محاسبه

بُعد فراکتال از تصاویر شبکه‌های هیدروگرافی، که با استفاده از DEM ۵۰ متر (در نرم‌افزار ArcGIS) و تصاویری که به کمک نرم‌افزار گوگل‌ارث ترسیم شده بود، استفاده شد.

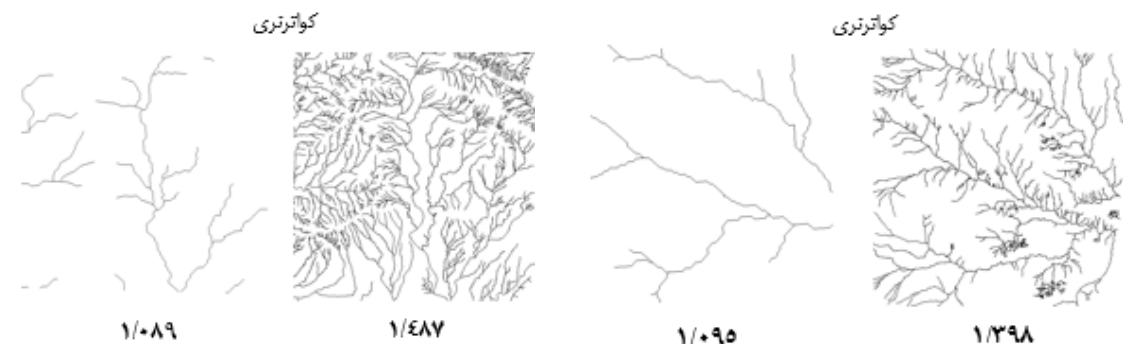
در شکل‌های زیر ابعاد فراکتالی محاسبه شده برای چند نمونه از واحدهای ۲۵ کیلومتری قبل و بعد از اصلاح شبکه هیدروگرافی مشاهده می‌شود. برای تعیین ارتباط بُعد فراکتال و نوع سازندها نیز از سازندهای غالب منطقه تعدادی نمونه تهیه شد و، پس از محاسبه بُعد فراکتال نمونه‌ها، میانگین آن‌ها بُعد فراکتال سازندِ مربوطه در نظر گرفته شد. برای تعیین رابطه بُعد فراکتال با سازندهای مربوطه، ارتباط عدد فراکتال سازندها با شاخص مقاومت به فرسایش آن‌ها بررسی شد.



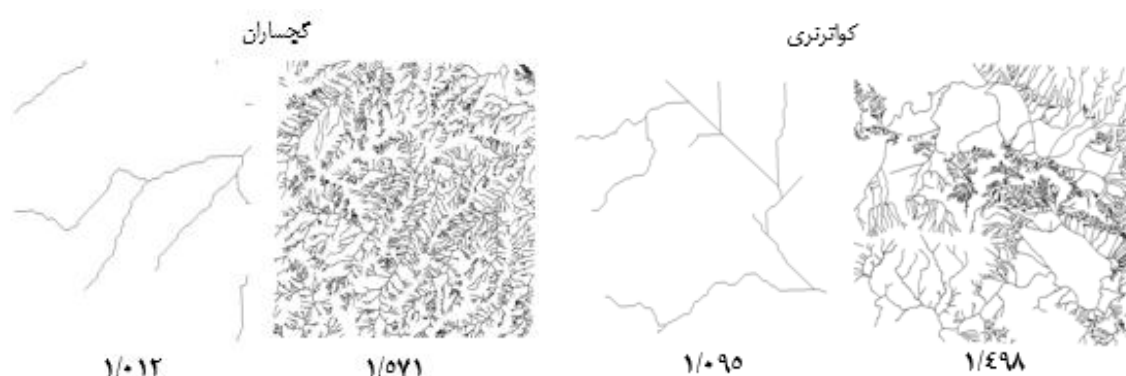
شکل ۳. بُعد فراکتال نمونه‌ای از شبکه هیدروگرافی سازند آغاچاری و امیران قبل و پس از اصلاح شبکه هیدروگرافی



شکل ۴. بُعد فراکتال نمونه‌ای از شبکه هیدروگرافی سازند آسماری - شهپازان قبل و پس از اصلاح شبکه هیدروگرافی



شکل ۵. بُعد فراکتال نمونه‌ای از شبکه هیدروگرافی سازند کواترنری قبل و پس از اصلاح شبکه هیدروگرافی

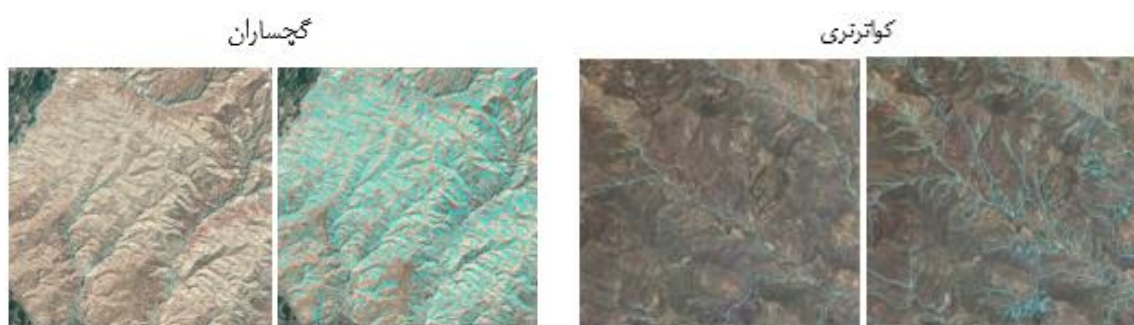


شکل ۶. بُعد فراکتال نمونه‌ای از شبکه هیدروگرافی سازند کواترنری و گچساران قبل و پس از اصلاح شبکه هیدروگرافی

شکل‌های ۳ الی ۶- شکل‌های مقایسه‌ای شبکه آبراهه قبل و بعد از اصلاح- نشان می‌دهد که شبکه آبراهه‌ای با دقت DEM ۵۰ متر در پلات‌های ۵×۵ کیلومتر مربع (۲۵ کیلومتر مربع) متناظر از دقت بسیار کمتر نسبت به شبکه زهکشی ترسیم‌شده از روی گوگل‌ارث با دقت نزدیک به پنج متر برخوردار است و اینکه پس از اصلاح شبکه هیدروگرافی بُعد فراکتال شبکه‌های اصلاح‌شده نسبت به بُعد فراکتال آن‌ها قبل از اصلاح بیشتر است؛ زیرا خطوط شبکه آبراهه در صفحه مربوط به تصویر واحد ۲۵ کیلومتر مربع افزایش یافته و  $N(\epsilon)$  حداقل تعداد خانه‌هایی از شبکه، که به طور کامل شبکه هیدروگرافی حوضه آبریز را پوشش می‌دهند، افزایش یافته است؛ بنابراین، طبق رابطه ۱ بُعد فراکتال نیز افزایش می‌یابد. البته، در سازندهایی با حساسیت بیشتر مانند گچساران و کواترنری نسبت به سازندهای مقاوم مثل آسماری-شهبازان تغییرات بیشتری در تراکم شبکه هیدروگرافی رخ داده است؛ در نتیجه، تغییر بُعد فراکتال آن‌ها نیز بیشتر مشاهده می‌شود.

در شکل‌های زیر تصاویر گوگل‌ارثی مربوط به تعدادی از نمونه‌هایی که شبکه هیدروگرافی آن اصلاح‌شده درج شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، تراکم خطوط شبکه هیدروگرافی، که با رنگ آبی نمایش داده شده، در تصاویر مربوط به شبکه هیدروگرافی اصلاح‌شده (تصاویر سمت راست) بیشتر است.

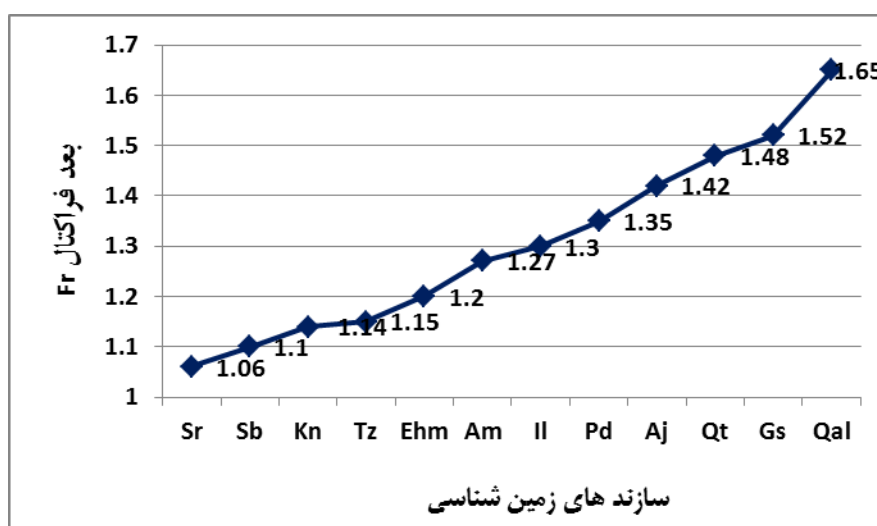
در شکل ۸ بُعد فراکتال سازندهای مورد مطالعه بعد از اصلاح شبکه هیدروگرافی نمایش داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد در محدوده مورد بررسی، سازندهای حساس به فرسایش همچون تشکیلات کواترنری ریزدانه و سازندهای گچساران و کواترنری درشت‌دانه به ترتیب با مقادیر بُعد فراکتال برابر با ۱.۶۵، ۱.۵۲، و ۱.۴۷ دارای بیشترین بُعد فراکتال و تشکیلات سخت‌آهکی مربوط به سازندهای آسماری-شهبازان و سروک به ترتیب با بُعد فراکتال برابر با ۱.۰۶ و ۱.۰۱ دارای کمترین بُعد فراکتال است.



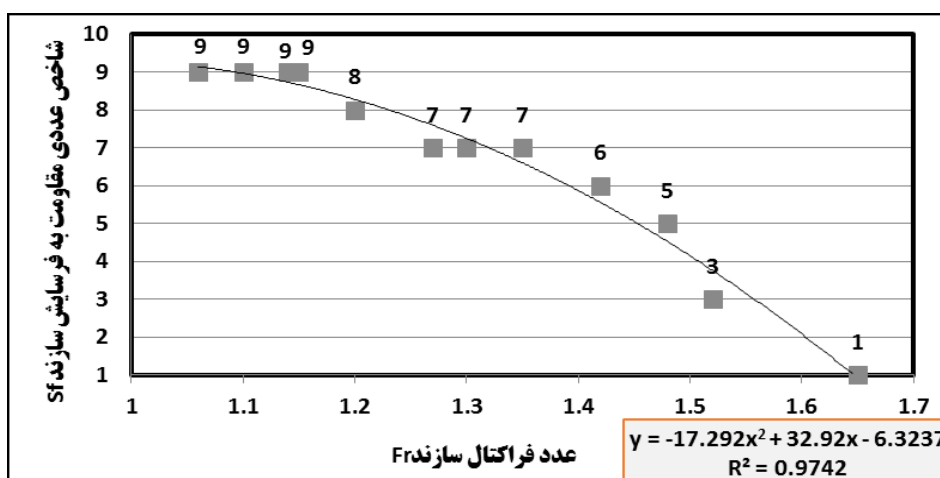
شکل ۷. اصلاح شبکه هیدروگرافی در واحد ۲۵ کیلومتری در گوگل‌ارث

جدول ۲. بُعد فراکتال نمونه‌هایی از واحدهای یکسان ۲۵ کیلومتر مربعی قبل و بعد از اصلاح شبکه هیدروگرافی

ردیف	نوع سازند	بعد فراکتال قبل از اصلاح	بعد فراکتال بعد از اصلاح
۱	آغاچاری	۱/۱۴۹	۱/۴۳۵
۲	امیران	۱/۱۳۴	۱/۴۸۱
۳	آسماری-شهبازان	۱/۰۶۵	۱/۲۷۳
۴	آسماری-شهبازان	۱/۰۶۱	۱/۲۶۳
۵	کواترنری	۱/۰۹۵	۱/۳۹۸
۶	کواترنری	۱/۰۸۹	۱/۴۸۷
۷	کواترنری	۱/۰۹۵	۱/۴۹۸
۸	گچساران	۱/۰۱۲	۱/۵۷۱
۹	گچساران	۱/۰۱	۱/۶۱۸
۱۰	کواترنری (آلوویوم)	۱/۰۳۳	۱/۴۸۴



شکل ۸. نمودار بُعد فراکتال سازندهای زمین‌شناسی در حوضه‌های مورد بررسی در استان ایلام



شکل ۹. رگرسیون داده‌های شاخص عددی مقاومت به فرسایش (Sf) و عدد فراکتال (Fr) سازندها پس از اصلاح واحدهای ۲۵ کیلومتری در آنها



شکل ۷ نمودار رگرسیون مقادیر بُعد فراکتال و شاخص عددی مقاومت به فرسایش سازندهای مورد بررسی را نشان می‌دهد که در آن مقدار  $R^2$  معادل ۰/۹۷۴۲، شده است. هرچه مقدار  $R^2$  به یک نزدیک باشد همبستگی داده‌ها بیشتر است. بنابراین، عدد ۰/۹۷۴۲ نشان‌دهنده همبستگی بالا و ارتباط معنادار بُعد فراکتال با شاخص عددی مقاومت به فرسایش است. با توجه به شکل ۷ با افزایش مقاومت سازند بُعد فراکتال کاهش می‌یابد. پس از بررسی نرمالیتۀ داده‌ها با آزمون کلموگراف-اسمیرنوف و با توجه به نرمال بودن توزیع داده‌ها از آزمون پیرسون برای بررسی همبستگی داده‌ها استفاده شد.

جدول ۳. آزمون همبستگی داده‌های درجه مقاومت سازندها (از ۲۰) (Sf) و عدد فراکتال (Fr) سازندها پس از اصلاح واحدهای ۲۵ کیلومتری در آن‌ها

		همبستگی	
		Sf	Fr
Sf	Pearson Correlation	۱	** -۰/۹۶۵
	Sig. (2-tailed)		۰/۰۰۰
	N	۱۲	۱۲
Fr	Pearson Correlation	** -۰/۹۶۵	۱
	Sig. (2-tailed)	۰/۰۰۰	
	N	۱۲	۱۲

مقدار همبستگی عدد مقاومت سازند و عدد فراکتال آن

جدول ۳ نتایج آزمون پیرسون و مقدار همبستگی (۰/۹۶۵) داده‌ها را نشان می‌دهد. مقدار آن همیشه عددی بین ۱- و ۱+ خواهد بود. هرچه قدر مطلق این عدد به ۱ نزدیک‌تر باشد، مقدار همبستگی بیشتر است و هرچه مقدار آن به صفر نزدیک باشد، همبستگی داده‌ها کمتر است (اسماعیلی و خیری، ۱۳۸۵). در نتیجه، بین مقاومت سازند و بُعد فراکتال آن ارتباط معنی‌دار وجود دارد. علامت منفی نشان‌دهنده ارتباط معکوس داده‌هاست (افشانی، ۱۳۸۷).

از آنجا که مقدار همبستگی معادل ۰/۹۶۵- است، بین بُعد فراکتال سازندها و مقاومت آن‌ها به فرسایش ارتباط معنادار و معکوس برقرار است؛ یعنی با افزایش مقاومت سازند به فرسایش بُعد فراکتال آن کاهش می‌یابد و بنابراین تراکم شبکه هیدروگرافی هم پایین‌تر است.

در جدول ۴ مقادیر R و R Square آمده است که به ترتیب R نشان‌دهنده همبستگی ساده بین دو متغیر است (شدت همبستگی که مقدار آن همیشه بین صفر و ۱+ است) و R Square (ضریب تعیین) نشان می‌دهد که چه مقدار از متغیر وابسته Sf می‌تواند توسط متغیر مستقل Fr تعیین شود. هرچه مقدار R به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده همبستگی بالای بین دو متغیر است؛ در اینجا عدد ۰/۹۶۵ گویای همبستگی بالای دو متغیر مقاومت سازند و عدد فراکتال آن است. همان‌طور که در جدول ۶ آمده، ارتباط دو متغیر ذکر شده معنادار و معکوس است.

جدول ۴. رگرسیون مقادیر داده‌های مقاومت سازند (Sf) و عدد فراکتال (Fr) حوضه‌ها پس از اصلاح واحدهای ۲۵ کیلومتری در آن‌ها

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
۱	۰/۹۶۵ <sup>a</sup>	۰/۹۳۱	۰/۹۲۴	۰/۰۵۱۱۶

جدول ۵. آزمون همبستگی داده‌های مقاومت سازند (Sf) و عدد فراکتال (Fr) حوضه‌ها پس از اصلاح واحدهای ۲۵ کیلومتری در آن‌ها به روش ANOVA<sup>d</sup>

ANOVA <sup>d</sup>					
Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	۰/۳۵۰	۱	۰/۳۵۰	۱۳۳/۸۸۷	۰/۰۰۰ <sup>a</sup>
Residual	۰/۰۲۶	۱۰	۰/۰۰۳		
Total	۰/۳۷۷	۱۱			

جدول ANOVA معنی‌داری کل مدل را مشخص می‌کند. به‌طور کلی، اگر سطح معنی‌داری آماره F کمتر از ۰/۰۵ باشد، متغیر مستقل به‌خوبی تغییرات متغیر وابسته را تبیین می‌کند. در غیر این صورت، متغیر مستقل تغییرات متغیر وابسته را به‌خوبی تبیین نمی‌کند (افشانی، ۱۳۸۷). همان‌گونه که در جدول ۵ مشخص شده، مقدار F برابر با ۱۳۳/۸۸۷ با سطح معنی‌داری ۰/۰۰۰ شده است که چون سطح معنی‌داری از ۰/۰۵ کمتر شده است، مدل معنی‌دار است.

جدول ۶. ضریب همبستگی داده‌های مقاومت سازند (Sf) و عدد فراکتال (Fr) حوضه‌ها پس از اصلاح واحدهای ۲۵ کیلومتری در آن‌ها

ANOVA <sup>d</sup>					
Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	۰/۳۵۰	۱	۰/۳۵۰	۱۳۳/۸۸۷	۰/۰۰۰ <sup>a</sup>
Residual	۰/۰۲۶	۱۰	۰/۰۰۳		
Total	۰/۳۷۷	۱۱			

در جدول ۶ بتا همان ضریب استاندارد شده است. هرچه مقدار بتا (Bete) و تی (t) بزرگ‌تر و سطح معنی‌داری (Sig) کوچک‌تر باشد، بیانگر تأثیرات شدید متغیر مستقل بر متغیر وابسته است (افشانی، ۱۳۸۷). مقدار Beta برابر با ۰-۰۹۶۵ شده است؛ در نتیجه تأثیر دو متغیر در سطح ۰/۰۰۰ معنادار و میزان تأثیر برابر ۰-۰۹۶۵ است که نشان از ارتباط معکوس داده‌ها دارد.

## نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق را می‌توان در سه بخش بیان کرد: بخش اول تغییرات بُعد فراکتال پیش و پس از اصلاح و تدقیق شبکه آبراهه‌ها بر اساس داده‌های گوگل‌ارث است. با توجه به نتایج این بخش، می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف بین آبراهه‌های شبکه زهکشی در سازندهای حساس به فرسایش پیش و پس از تدقیق به‌مراتب بیشتر از سازندهای مقاوم به فرسایش است. بدین ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت تدقیق نقشه شبکه آبراهه‌ها در سازندهای حساس به فرسایش دارای ضرورت بیشتری است. از آنجا که هدف از این مطالعه بررسی رابطه بُعد فراکتال شبکه آبراهه‌ها با سازندهای زمین‌شناسی است، مقادیر بُعد فراکتال شبکه آبراهه‌ها پس از اصلاح و تدقیق بررسی و ارزیابی شد. بخش دوم نتایج این تحقیق نشان می‌دهد سازندهای حساس به فرسایش همچون تشکیلات کواترنر ریزدانه و سازندهای گچساران و کواترنر درشت‌دانه با مقادیر بُعد فراکتال برابر با ۱/۶۵، ۱/۵۲، و ۱/۴۷ دارای بیشترین بُعد فراکتال و تشکیلات سخت‌آهکی مربوط به سازندهای آسماری-شهبازان و سروک با بُعد فراکتال برابر با ۱/۱ و ۱/۰۶ دارای کمترین بُعد فراکتال است. بدین ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت که بُعد فراکتال در تشکیلات مقاوم به فرسایش تا

سازندهای حساس به فرسایش دارای روند صعودی است که با نتایج پلتیر (۱۹۹۹)، که به تولید توپوگرافی فراکتالی و شبکه رودخانه‌ای فراکتالی منجر شد، هم‌خوانی دارد.

بخش سوم نتایج تحقیق مربوط به بررسی ارتباط بُعد فراکتال سازندهای زمین‌شناسی با شاخص‌های مقاومت به فرسایش آن‌هاست. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد رگرسیون ( $R^2$ ) مقادیر بُعد فراکتال و شاخص عددی مقاومت به فرسایش برای سازندهای مورد بررسی معادل ۰٫۹۷۴۲ است و نشان‌دهنده همبستگی بالای داده‌ها و ارتباط معنادار بُعد فراکتال با شاخص عددی مقاومت به فرسایش است.

با توجه به نتایج آزمون پیرسون، مقدار همبستگی بین مقاومت سازند و بُعد فراکتال آن معادل ۰٫۹۶۵- است؛ در نتیجه، بین بُعد فراکتال و مقاومت سازند ارتباط معنی‌دار و معکوس (علامت منفی) وجود دارد. بنابراین، بین بُعد فراکتال سازندها و مقاومت آن‌ها به فرسایش ارتباط معنادار و معکوس برقرار است؛ یعنی با افزایش مقاومت سازند به فرسایش بُعد فراکتال آن کاهش می‌یابد و بنابراین تراکم شبکه هیدروگرافی هم پایین‌تر است. مقادیر  $R$  و  $R^2$  به ترتیب برابر ۰٫۹۶۵ و ۰٫۹۳۱ است که نشان‌دهنده همبستگی بالای دو متغیر مقاومت سازند و عدد فراکتال آن است. در جدول ANOVA مقدار  $F$  برابر با ۱۳۳٫۸۸۷ با سطح معنی‌داری ۰٫۰۰۰ شده است که چون سطح معنی‌داری از ۰٫۰۵ کمتر شده است، مدل معنی‌دار است. مقدار  $Beta$  برابر با ۰٫۹۶۵- شده است؛ در نتیجه، تأثیر دو متغیر در سطح ۰٫۰۰۰ معنادار و میزان تأثیر برابر ۰٫۹۶۵- است که نشان از ارتباط معکوس داده‌ها دارد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و همبستگی آماری، می‌توان در محدوده استان ایلام با دقت بیش از ۹۰ درصد با داشتن بُعد فراکتال نوع سازندهای منطقه را پیش‌بینی کرد. این مورد با نتایج عدل و همکاران (۱۳۸۳)، به لحاظ اینکه بُعد فراکتال حوضه‌های آبریز معرف تشابه ژئومورفولوژیکی در بین آن‌هاست، همخوانی دارد. همچنین، با نتایج مهروند و همکاران (۱۳۸۳) از نظر ارتباط مستقیم بُعد فراکتال با شبکه زهکشی تطابق دارد.

## منابع

- احمدی، ح. و فیض‌نیا، س. (۱۳۷۸). سازندهای دوره کواترنر (مبانی نظری و کاربردی آن در منابع طبیعی)، ج ۱، انتشارات دانشگاه تهران.
- احمدی، ع.؛ نیشابوری، م.ر. و اسدی، ح. (۱۳۸۹). ارتباط بُعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات با برخی خصوصیات فیزیکی خاک، مجله دانش آب و خاک، ۱/۲۰(۱).
- اختصاصی، م.ر.، جدول ستون چین‌شناسی ایران (اختصاصی اقتباس از فیض‌نیا).
- اختصاصی، م.ر. (۱۳۹۴). مقدمه‌ای بر فراکتال، ژئومورفولوژی کمی، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد.
- اسماعیلی، ح.ا. و خیری، س. (۱۳۸۵). کارگاه مقدماتی آموزش نرم‌افزار SPSS ۱۱/۵، دانشگاه علوم پزشکی مشهد.
- افشانی، ع.ر. (۱۳۸۷). آموزش کاربردی SPSS در علوم اجتماعی و رفتاری، ج ۴، دانشگاه یزد.
- رضایی مقدم، م.ح.؛ ثروتی، م.ر. و اصغری سراسکانرود، ص. (۱۳۹۰). بررسی مقایسه‌ای الگوی پیچان‌رود با استفاده از تحلیل هندسه فراکتالی و شاخص‌های زاویه مرکزی و ضریب خمیدگی (مطالعه موردی: رودخانه قزل‌اوزن)، پژوهش‌نامه مدیریت حوضه آبخیز، ۲(۳).
- سرمدیان، ف.؛ قنبریان علویجه، ب.؛ تقی‌زاده مهرجردی، ر.ا. و کشاورزی، ع. (۱۳۹۰). مقایسه کارایی توابع انتقالی خطی غیرخطی و شبکه عصبی مصنوعی در برآورد بُعد فرکتال سطح خطی خلل و فرج خاک، نشریه مرتع و آبخیزداری، ۱(۱): ۶۴-۵۳.
- طهماسبی، ز.؛ زال، ف. و احمدی خلجی، ع. (۱۳۹۴). ریخت‌شناسی تورمالین در گرانیتهای مشهد (g2) با استفاده از آنالیز فراکتال و تئوری اجتماع با انتشار محدود (DLA)، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۲۳(۳).
- عدل، ا. و مهروند، ص. (۱۳۸۳). بُعد فرکتالی و مشخصات هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، NCCEI383، دانشگاه صنعتی شریف.
- فیض‌نیا، س. (۱۳۷۴). مقاومت سنگ‌ها در مقابل فرسایش در اقلیم مختلف ایران، مجله منابع طبیعی ایران، ۴۷: ۹۵-۱۱۶.
- کرم، ا. (۱۳۸۹). نظریه آشوب، فرکتال (برخال) و سیستم‌های غیرخطی در ژئومورفولوژی، نشریه جغرافیای طبیعی، ۳(۸): ۶۷-۸۲.
- کرم، ا. و صابری، م. (۱۳۹۴). محاسبه بُعد فرکتال در حوضه‌های زهکشی و رابطه آن با برخی خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوضه (مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز شمال تهران)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۴(۳): ۱۶۷-۱۵۳.
- ملکشاهی، م. (۱۳۹۱). بررسی رابطه بین میزان رواناب و رسوب با پارامترهای فیزیکی و بُعد فراکتال در حوضه‌های آبخیز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی منابع طبیعی، آبخیزداری، دانشگاه یزد.
- Adl, I. and Mehrvand, S. (2004). Fractal dimension and hydrological characteristics of catchments, Sharif University, Tehran.
- Afshani, S.A. (2008). *Practical training of SPSS in social and Behavioral Sciences*, Yazd University.
- Ahmadi, A.; Nyshaboori, M.R. and Asadi, H. (2010). The relationship between size distribution fractal dimension with some physical properties of soil, *Water and Soil Science*, 20(4): 73-81.
- Ahmadi, H. and Feyznia, S. (1999). Quaternary period formations (Theoretical and Applied Principles of Natural Resources), Vol. 1, Tehran University Press.
- Burrooug, P.A. (1981). Fractal dimansions of landscapes and environmental data, *Nature* 294: 240-242.

- De Bartolo, S.G.; Gabriele, S. and Gaudio, R. (2000). Multifractal behavior of river networks, *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(1): 105-112.
- Ekhtesasi, M.R. (1994). *An Introduction to the fractal, Quantitative geomorphology*, Desert and Natural Resources College, Yazd University.
- Ekhtesasi, M.R. (n.d.). *Stratigraphic column of the table of Iran (Ekhtesasi to the adaptation of Feyz Nia)*.
- Esmaeili, H.A. and Kheyri, S. (2006). *Introductory Workshop 11/5 SPSS software training*, Mashhad University of Medical Sciences.
- Feyznia, S. (1995). Resistance of rocks against erosion in different parts of Iran, *Journal of Natural Resources of Iran*, 47: 95-116.
- Karam, A. and Saberi, M. (2015). Calculating the fractal dimension in drainage basins and its relationship with the characteristics of the basin Geomorphological (Case study: watershed north of Tehran, *Quantitative geomorphology*, 4(3): 153-167.
- Karam, A. (2010). Chaos theory, fractal (fractal) and nonlinear systems in geomorphology, *Journal of Natural Geography*, 3(8): 67-82.
- La Barbera, P. and Rosso, R. (1989). On the fractal dimension of stream network, *Water Resources Research*, 25(4): 735-741.
- Malekshahi, M.; Talebi, A. and Sobuti, S. (1391). How to calculate the shape of the watershed (or any other natural form) by counting the box, *Third National Conference on Integrated Water Resources Management*, Agricultural Sciences and Natural Resources of Sari University.
- Mandelbrot, B.B. (1982). *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman, San Francisco.
- Pelletier, Jon D. (1999). Self-organization and scaling relationships of evolving river networks, *Jornal april10, Geophysical research*, p. 7359-7375.
- Prigarin, S.P.; Sandau, K.; Kazmierczak, M. and Hahn, K. (2013). Estimation of Fractal Dimension: A Survey with Numerical Experiments and Software Description, *International Journal of Biomathematics and Biostatistics*, 2(1): 167-180.
- Rezaei Moghaddam, M.H.; Servati, M.R and Asghari Seraskanrood, S. (1390). A comparative study of fractal geometry analysis and pattern meanders using indexes central angle and curvature coefficient (Case Study: River Qzlavzn), *Journal of watershed management*, 2(3).
- Roach, D. and Fowler, A. (1993). Dimensionality analysis of patterns: fractal measurements, *AA(Ottawa Carleton Geoscience Centre and Department of Geology*, 19(6): 849-869.
- Srmadiyan, F.; Ghanbariyan Alavijeh, B.; Taghizade Mehrjardi, R.A. and Keshavarzi, A. (2011). Comparing performance linear transformation functions are non-linear and linear neural network in estimation of soil pores, *Journal of range and warershed management*, 64(1): 53-64.
- Tahmasebi, Z.; Zal, F. and Ahmadi Khalaji, A. (1394). Tourmaline granites morphology in Mashhad (g2) using fractal analysis and social theory with a limited release (DLA), *Crystallography and Mineralogy of Iran*, 23(3).
- Turcotte, D.L. (1992). *Fractal and Chaos in Geology and Geophysics*, *Geophysics Combridge university press*.