

## کاربرد بُعد فراکتال در تحلیل حساسیت پذیری سازندهای زمین شناسی مناطق خشک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دشت یزد- اردکان)

مژده محمدی<sup>۱</sup>، محمدرضا اختصاصی<sup>۲\*</sup>، علی طالبی<sup>۳</sup>، سید زین العابدین حسینی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۲۹

### چکیده

هندسه فراکتال یا همان زبان ریاضی طبیعت، ابزاری کمی برای بررسی ژئومورفولوژی شبکه‌های زهکشی و مدل‌سازی بسیاری از پدیده‌های پیچیده طبیعی است. از آنجا که متغیرهای زمین‌شناسی تأثیر گسترده‌ای بر ماهیت و فعالیت سیستم‌های شبکه آبراه‌های دارند، در این بررسی، نقش سنگ‌شناسی و سازند زمین‌شناسی در کمی‌سازی شبکه‌های زهکشی حوضه دشت یزد- اردکان استفاده شده است. مقادیر عددی بُعد فراکتال برای سه سازند زمین‌شناسی حوضه مورد مطالعه به دست آمد؛ میانگین بُعد فراکتال ۱/۱۴۹ نشان‌دهنده سازند آهک تفت، میانگین بُعد فراکتال ۱/۱۶۱، سازند گرانیت و مقدار ۱/۲۰۷ سازند کهر است که بیشترین مقدار عددی بُعد فراکتال در سازند کهر (۱/۲۷۹) و کمترین آن در سازند تفت (۱/۰۴۶) محاسبه شد. استفاده از آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه نشان داد بین میانگین بُعد فراکتال سه سازند زمین‌شناسی با اطمینان ۰/۹۹ اختلاف معنی‌دار وجود دارد. نتایج حاصل از این بررسی، روابط معنی‌داری بین ابعاد فراکتال شبکه‌های زهکشی و شاخص‌های مورفومتریک (تراکم زهکشی، تعداد رتبه، متوسط طول رتبه و فراوانی رتبه) نیز نشان می‌دهد که بیشترین ضریب همبستگی متعلق به روابط رگرسیونی بین تراکم شبکه‌های زهکشی و بُعد فراکتال است (در سطح ۰/۹۹). نتایج بررسی عدم قطعیت کارایی بُعد فراکتال در طبقه‌بندی و تفکیک سازندهای زمین‌شناسی نشان داد که تنها در سازند زمین‌شناسی کهر با احتمال ۹۰ درصد بُعد فراکتال از روند ثابتی برخوردار است و در دو سازند زمین‌شناسی آهک تفت و سازند گرانیت شیرکوه، این میزان حدود ۷۰ درصد می‌باشد. بنابراین بُعد فراکتال در شناسایی شبکه‌های زهکشی سازند کهر، قوی‌تر از دو سازند دیگر گرانیتی و آهکی عمل کرده و توانایی بیشتری نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** شبکه‌های زهکشی، بُعد فراکتال، سازندهای زمین‌شناسی، دشت یزد- اردکان، عدم قطعیت.

۱. دکتری آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد

۲. استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد؛ [mr\\_ekhtesasi@yazd.ac.ir](mailto:mr_ekhtesasi@yazd.ac.ir)

۳. استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد

۴. استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد

## مقدمه

الگوی شبکه‌های زهکشی تحت‌تأثیر عواملی مانند زمین‌شناسی، توپوگرافی، تکتونیک و اقلیم دارای تنوع است. بررسی و تحلیل نقش هریک از این عوامل، منجر به شناخت عوامل مؤثر در شکل‌گیری نوع الگوی شبکه‌زهکشی در هر منطقه می‌شود. در این میان، متغیرهای زمین‌شناسی به‌آسانی کمی‌سازی نمی‌شوند، اما تأثیر گسترده‌ای به‌ویژه در ماهیت و فعالیت شبکه‌های زهکشی دارند (محمدی، ۲۰۱۶). در بررسی کمی شبکه‌های زهکشی و مدل‌سازی این پدیده پیچیده طبیعی، توجه به این نکته ضروری است که شبکه‌های زهکشی ساختارهای درخت مانند فراکتالی هستند که روابط توانی بسیاری بین اجزا ژئومورفیک آن‌ها برقرار است (پلیتر، ۲۰۰۷). در واقع هندسه فراکتال یا همان زبان ریاضی طبیعت، ابزاری کمی برای بررسی ژئومورفولوژی شبکه‌های زهکشی و مدل‌سازی بسیاری از پدیده‌های پیچیده طبیعی است. پدیده‌های طبیعی متغیرهای فراوانی دارند که برقراری روابط بین آن‌ها با استفاده از روش‌های معمول ریاضی مشکل است و حجم نمونه‌برداری و صحرایی زیادی را می‌طلبد. این مسئله در کنار عدم امکان اندازه‌گیری تمام اجزای طبیعت، منجر به شکل‌گیری تحولی بزرگ در شیوه درک و تبیین پدیده‌ها شده است. در این شیوه، می‌توان از طریق هندسه فراکتال<sup>۲</sup> با این تئوری که خیلی از پدیده‌های جهان طبیعت در عین بی‌نظمی دارای نظم هستند، هر جزء از طبیعت را به‌صورت یک عدد کمی هندسه فراکتال درآورد. با استفاده از هندسه فراکتال می‌توانیم به ضرایبی دست یابیم که قابل تعمیم به سایر نقاط باشد (محمدی، ۲۰۱۶).

هندسه فراکتال از ضرایب و نسبت‌هایی که در طبیعت برای ما قابل اندازه‌گیری است، استفاده می‌کند؛ مثلاً برای به دست آوردن ضریب فراکتال شبکه آبراه‌های از نسبت دوشاخ‌های شدن به نسبت بدون بعد طول استفاده می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که بسیاری از خصوصیات خاک و گیاه دارای رفتار فراکتالی است (پالمر<sup>۳</sup>، ۱۹۸۸؛

بورگ<sup>۴</sup>، ۱۹۸۱). بر پایه نظریه آشوب، پدیده‌های ژئوفیزیکی مثل رودخانه که در ظاهر دارای پیچیدگی و بی‌نظمی است، با استفاده از روابطی در قالب هندسه فراکتال می‌توان آن را منظم و بر اساس روال و منطق خاصی مشاهده تعریف کرد (فتاحی و طالب‌زاده، ۲۰۱۷).

نخستین بررسی‌ها در جهت ایجاد مدل هندسی مناسب از شبکه رودخانه توسط هورتون در سال‌های ۱۹۳۲ و ۱۹۴۵ صورت پذیرفت. در سال‌های بعد، مفهوم بُعد فراکتالی شاخه‌های رودخانه وارد فرمول بندی هورتون گردید (لباربارا و روسو<sup>۵</sup>، ۱۹۸۹). کاربرد تحلیل فراکتال برای توصیف کمی ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی در دهه‌های اخیر افزایش یافته است (دی‌کولا و لم<sup>۶</sup>، ۱۹۹۳؛ فیلیپس<sup>۷</sup>، ۱۹۹۳؛ بن‌زیون و سمیس<sup>۸</sup>، ۲۰۰۳؛ گلوگان<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸؛ ترکات<sup>۱۰</sup>، ۱۹۹۷ و ۲۰۰۷؛ شهزاد و همکاران، ۲۰۱۰؛ ایبازن<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۴) و کاربرد آن موفقیت‌های بزرگی را نشان داده است. در گذشته، عمده تحقیقاتی که برای تعیین خواص فراکتال روی شبکه‌های پراکنده انجام می‌شد، در سایر مطالعات شبکه‌های مترام جریان نیز در نظر گرفته می‌شد. نتایج نشان داد که ابعاد فراکتال به‌طور گسترده‌ای متفاوت بوده و حوضه‌های مورد مطالعه بیشتر خودوابسته هستند (شولر<sup>۱۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۱). همچنین با استفاده از بُعد فراکتالی می‌توان رنگ رسوبات منبع رسوب را در یک حوزه کوچک تعیین کرد (کرین<sup>۱۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۳).

ابعاد فراکتال شبکه‌زهکشی با ویژگی‌های ژئومورفولوژی مانند شکل، مساحت، نسبت انشعاب و نسبت طول در حوضه‌ها روابط معنی‌داری نشان دادند (خان‌بابایی و همکاران، ۲۰۱۳). رابطه‌ای معکوس و منفی بین بُعد فراکتال نسبت انشعاب با مساحت در حوضه‌های دامنه شمال بینالود به دست آمد (خسروی و همکاران، ۲۰۱۷). علاوه بر این با افزایش بُعد

4. Burrough
5. La Barbera & Rosso
6. De Cola & Lam
7. Phillips
8. Ben-Zion & Sammis
9. Gloaguen
10. Turcotte
11. Ibanez
12. Schuller
13. Krein

1. Pelletier
2. Fractal Geometry
3. Palmer

حوضه یکی از مهم‌ترین حوضه‌های استان یزد از دیدگاه منابع طبیعی به شمار می‌رود. این حوضه به‌وسیله رشته‌کوه‌های شیرکوه در جنوب، کوه هنگران و مرغ زرد در غرب، کوه‌های هفت آدمین و خونزا در شرق و کوه چک چک در شمال محصور شده است. تراکم پوشش گیاهی از صفر تا ۲۰ درصد متغیر بوده و بیش از ۴۰ درصد مساحت دشت را اراضی لخت و بدون پوشش گیاهی با تراکم کمتر از ۲ درصد در بر می‌گیرد. این منطقه به‌دلیل واقع بودن در زیر مرکز پرفشار جنب استوایی دارای بارندگی کم و نوسانات درجه‌حرارت زیاد است. جهت غالب وزش باد شمال غربی است و میزان بارش منطقه کمتر از ۶۵ میلی‌متر در حوالی کویر سیاه‌کوه تا بیش از ۲۵۰ میلی‌متر در ارتفاعات شیرکوه متفاوت است.

این محدوده عمدتاً از سنگ‌های دوران سوم، به‌ویژه سازندهای نئوژنی تشکیل شده و روی این سنگ‌ها را کنگلومرا و رسوبات آبرفتی سیلابی کواترنر پوشانده است. در حوضه مورد مطالعه، آثار قدیمی‌ترین واحدهای زمین‌شناسی مربوط به پرکامبرین تا جدیدترین آن یعنی پادگانه‌های آبرفتی و نهشته‌های ماسه‌بادی به چشم می‌خورد. قدیمی‌ترین سازند موجود در منطقه به‌صورت سنگ‌های دگرگونی متشکل از فیلیت، شیل و شیست سبز و سیاه سازند کهر مربوط به پرکامبرین است. دوره ژوراسیک با رخساره‌های متنوع شامل شیل و ماسه‌سنگ و سنگ آهک از سازند ناینند و شمشک، سنگ آهک تیره از سازند اسفندیار و در نهایت، گرانیت تا گرانودیوریت شیرکوه بخش وسیعی از مناطق کوهستانی حوضه را در بر گرفته است. از بین رخنمون‌های سنگی مذکور رخساره‌های گرانیت و گرانودیوریت هوازده شیرکوه به‌صورت توده‌سنگی تا برونزدسنگی بخش وسیعی از مناطق کوهستانی جنوب و جنوب شرق یزد از ارتفاع ۱۸۰۰ متر تا ۴۰۵۰ متر قله شیرکوه را در بر گرفته است. دوره کرتاسه با رخساره آهکی مربوط به سازند غیررسمی تفت نیز محدوده وسیعی از دامنه‌های شمالی جبال شیرکوه غالباً ارتفاعات ۱۶۰۰ تا ۴۰۰۰ متری را در بر می‌گیرد. این دوره به‌صورت سنگ آهک با لایه‌بندی منظم و دیواره‌مانند، کوهپایه‌های اسلامی، فخرآباد و ده بالا در جنوب یزد، نرکوه و کوه میمون و چلتاش در جنوب

فراکتالی یک الگوی آبراهه‌ای از مرتبه  $X+1$ ، تعداد و یا طول آبراهه‌ها از مرتبه  $X+1$  افزایش می‌یابد (کیوساک<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴)؛ همچنین بعد فراکتالی بالا معرف تراکم زهکشی بیشتر و زمان کمتر برای رسیدن به جریان دائمی است (علمی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۳). بررسی ساختار فراکتالی سیستم هیدروگرافی کاشویان در شمال لهستان، نشان داد این شبکه هیدروگرافی هنوز در مرحله سازمان‌دهی قرار داشته و بیشترین مرحله بلوغ آن در دامنه‌های جنوبی با ابعاد فراکتال  $1/97-1/79$  قابل مشاهده است (فک‌بندا<sup>۲</sup>، ۲۰۱۳). پژوهش‌ها نشان داد کاربرد فراکتال در ترسیم هیدروگراف حوضه، نتایج بهتری به همراه دارد (فتاحی و طالب‌زاده، ۲۰۱۷). هندسه فراکتالی می‌تواند به‌عنوان ابزار ریاضی مناسب برای بررسی ژئومورفولوژی رودخانه‌ها به کار گرفته شود (نیکویی و همکاران، ۲۰۰۸). مطالعه و بررسی لندفرم‌های یخچالی در هیمالیا با استفاده از تحلیل چندفراکتالی نشان داد که این لندفرم‌ها ساختار پیچیده‌تری نسبت به لندفرم‌های رودخانه‌ای دارند و تحلیل چندفراکتالی قادر به تفکیک لندفرم‌های به‌وجودآمده توسط فرایندهای مختلف است (دوتا و همکاران، ۲۰۱۴). در این مقاله، کارایی بعد فراکتال در طبقه‌بندی و تفکیک شبکه‌های زهکشی بر روی سازندهای زمین‌شناسی (گرانیت شیرکوه، آهک تفت و کهر) حوضه دشت یزد-اردکان بررسی می‌شود. به همین منظور، ابعاد فراکتالی شبکه‌های زهکشی سه سازند زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه محاسبه شد تا علاوه بر ارزیابی فرسایش‌پذیری سازندهای زمین‌شناسی، روابط بین این ابعاد فراکتالی با شاخص‌های مورفومتریک منطقه مورد مطالعه ارزیابی شود و عدم قطعیت کارایی بعد فراکتال در طبقه‌بندی و تفکیک سازندهای زمین‌شناسی تعیین گردد.

## مواد و روش‌ها

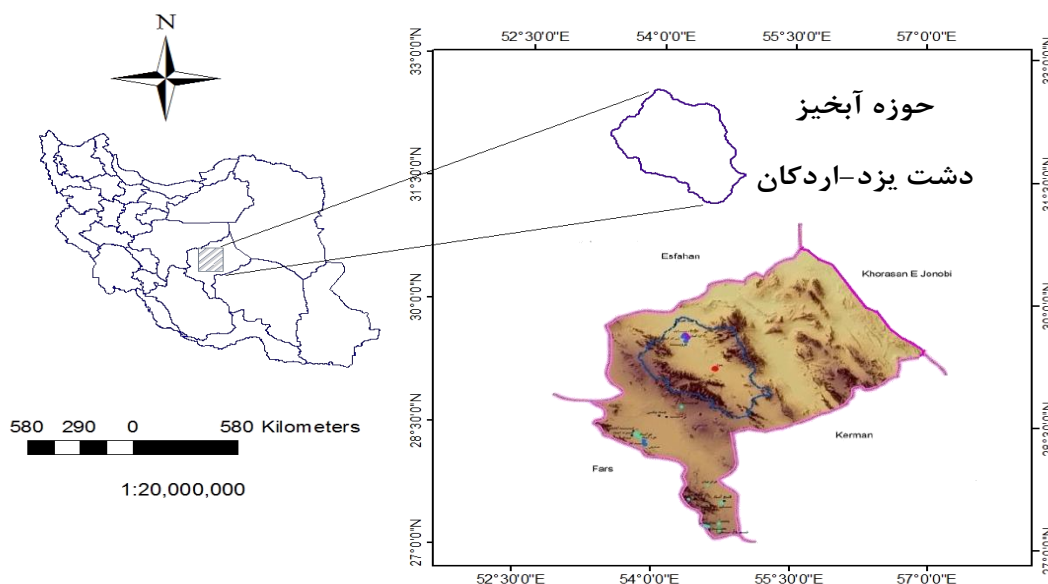
### موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز دشت یزد-اردکان در مختصات جغرافیایی  $28^{\circ}$   $31^{\circ}$  تا  $32^{\circ}$   $13^{\circ}$  عرض شمالی و طول شرقی  $57^{\circ}$   $52^{\circ}$  تا  $59^{\circ}$   $54^{\circ}$  فلات مرکزی ایران گسترده شده است (شکل ۱). این

1. Kusák  
2. Fac-Beneda

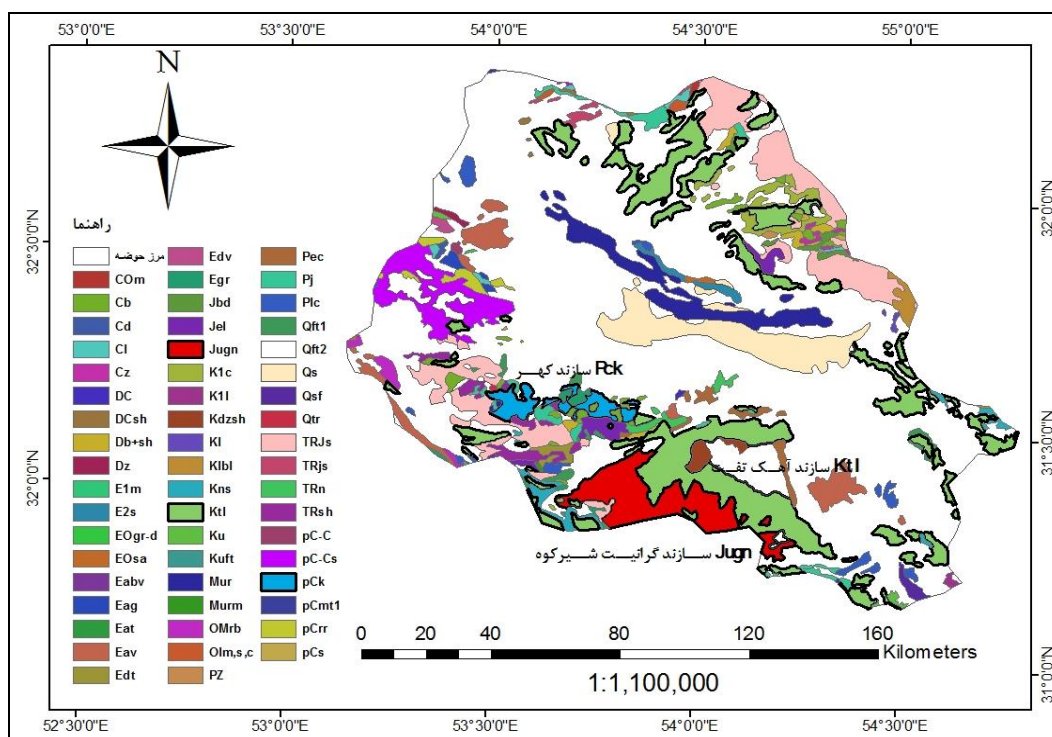
شرق یزد و کوه‌های درید، چک‌چک و هریش در شمال شرق اردکان را شامل می‌شود. این رخساره بعد از گرانیب شیرکوه بخش وسیعی از مناطق کوهستانی جنوب و جنوب شرق حوزه را در بر گرفته و به‌صورت واریزه‌های آواری و یا

انحلال، در تشکیل نهشته‌های تخریبی و تبخیری دشت یزد- اردکان نقش مهمی را ایفا کرده است (شکل ۲).



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Figure (1): Geographic location of the studied area



شکل (۲): پراکنش سازندهای زمین‌شناسی در دشت یزد- اردکان

Figure (2): Geological formations of Yazd- Ardakan Basin

## روش انجام پژوهش

پژوهش حاضر از چهار بخش اصلی تشکیل شده است:

۱. جمع‌آوری نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی مورد نیاز

در این بخش، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ حوضه یزد-اردکان، سه سازند زمین‌شناسی، کهر، گرانیت شیرکوه و آهک تفت انتخاب شد و میزان فرسایش‌پذیری این سه سازند در شرایط اقلیمی خشک تا نیمه‌خشک سرد مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور از روش‌های پسیاک، دکتر فیض‌نیا و روش سلبی در برآورد وضعیت فرسایش و تولید رسوب هر سازند استفاده شد. گفتنی است که شبکه‌زهکشی برآوردی در سازندهای زمین‌شناسی مورد بررسی، از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ استخراج شده است. به همین منظور از داده‌ها و نقشه‌های توپوگرافی رقمی با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور به تعداد ۹ شیت، واقع در ۴ بلوک نائین (بلوک ۶۹)، اردکان (بلوک ۷۰)، آباده (بلوک ۷۹) و یزد (بلوک ۸۰) استفاده گردید. انتخاب این سه سازند، به دلیل گستردگی مکانی و عدم پراکندگی آنهاست؛ این امر، امکان نمونه‌برداری تصادفی در سطحی وسیع و همگن را مقدور می‌سازد. نمونه‌برداری در هر سازند با استفاده از پلات‌های ۱×۱ کیلومتر مربعی انجام گرفت. انتخاب اندازه پلات ۱×۱ کیلومتر مربعی به این دلیل در نظر گرفته شد تا بتوان با توجه به وسعت سازندهای زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه، میانگین دقیق‌تری از بعد فراکتال شبکه‌زهکشی ارائه داد؛ زیرا در اندازه‌های بیشتر، امکان حذف سازند زمین‌شناسی از روند مطالعاتی و عدم بررسی دقیق شبکه‌زهکشی وجود داشت. همچنین، در اندازه پلات‌های کمتر از ۱×۱ کیلومتر مربعی، امکان بررسی تمامی درجات آبراه‌ها وجود نداشت و شکل کاملی از یک شبکه آبراه حاصل نمی‌شد. به همین منظور اندازه پلات ۱×۱ کیلومتر مربعی انتخاب گردید و در هر سه سازند، به صورت تصادفی، تعداد ۳۳ پلات برای محاسبه بعد فراکتال شبکه‌زهکشی در نظر گرفته شد.

## ۲. برآورد بعد فراکتال

در بخش دوم، مقادیر بعد فراکتال در ۳۰ پلات ۱×۱ کیلومتر مربعی، سه سازند زمین‌شناسی، کهر، گرانیت شیرکوه و آهک تفت به دست آمد. در هر سازند زمین‌شناسی بعد فراکتال به روش شمارش جعبه‌ای<sup>۱</sup> با استفاده از نرم‌افزار Fractalyse محاسبه شد. با استفاده از روش ترسیمی (فخارایزدی و همکاران، ۲۰۱۶)، تعداد پلات مورد نیاز در هر سازند مشخص شد. به این ترتیب که ابتدا مقدار میانگین بعد فراکتال دو پلات محاسبه می‌شود و این روند میانگین دوتایی‌ها ادامه می‌یابد تا جایی که دیگر میانگین بعد فراکتال تغییری نداشته باشد و ثابت گردد. با رسم نمودار جایی که تغییر شیب (نقطه عطف نمودار) کاملاً مشخص و بعد از آن نقطه نمودار به مقدار ثابتی رسیده و فاقد نوسان است، به عنوان تعداد پلات مورد نیاز در نظر گرفته می‌شود. سپس با مشخص شدن تعداد پلات مورد نیاز در هر سازند، میانگین بعد فراکتال در هر سازند به دست آمد (محمدی، ۲۰۱۶).

## ۳. محاسبه شاخص‌های مورفومتریک

در بخش سوم این پژوهش، شاخص‌های مورفومتریک شامل تراکم زهکشی، تعداد رتبه، متوسط طول رتبه و فراوانی رتبه در تعداد پلات انتخابی هر سازند محاسبه شد؛ زیرا با استفاده از شاخص‌های مورفومتریک می‌توان ویژگی‌های فراکتالی شبکه‌های زهکشی روی سازندهای زمین‌شناسی را بررسی کرد. به همین منظور، همبستگی بین شاخص‌های مورفومتریک و بعد فراکتال شبکه‌زهکشی به دست آمد.

## ۴. بررسی عدم قطعیت کارایی بعد فراکتال

در بخش پایانی، عدم قطعیت کارایی بعد فراکتال در طبقه‌بندی و تفکیک سازندهای زمین‌شناسی مورد بررسی قرار گرفت. در بیشتر مطالعات انجام‌گرفته در زمینه بعد فراکتال، عدم قطعیت این روش در نظر گرفته نشده است. در نتیجه، یافته‌های آنها از صحت کافی برای تعمیم به پدیده‌های طبیعی برخوردار نیست. از این رو، در این پژوهش، عدم قطعیت کارایی بعد فراکتال در طبقه‌بندی و تفکیک

در واقع، ارزش‌های ارائه شده در مورد سنگ‌شناسی در این دو روش، دامنه وسیعی از سنگ‌های مختلف را در بر می‌گیرد، ضمن اینکه بسیاری از سنگ‌شناسی‌ها را نیز شامل نمی‌شود. همچنین توصیف‌های سنگی ابهام‌آمیز در این دو روش، مانع طبقه‌بندی و تفکیک دقیق مقاومت سنگ‌ها و سازندها به فرسایش می‌شود (پیروان و شریعت‌جعفری، ۲۰۱۳). بنابراین از روش طبقه‌بندی سلبی برای افزایش کیفیت نتایج خروجی استفاده شد؛ زیرا روش‌های پسیاک و دکتر فیض‌نیا به‌رغم کاربرد راحت و فراگیر در مطالعات آبخیزداری از دقت کافی برخوردار نیست. این مسئله به‌خصوص در ارتباط با سازندهایی که از نظر حساسیت‌پذیری در طبقات نزدیک به هم قرار دارند، بیشتر مشاهده می‌شود. در روش سلبی، ۶ عامل مؤثر در مقاومت و حساسیت سنگ به فرسایش در ۵ طبقه درجه‌بندی می‌شود و به هریک از آن‌ها امتیازاتی داده می‌شود. شرح امتیازات این روش در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): امتیازدهی میزان مقاومت به فرسایش سازندها به روش سلبی ۱۹۸۰ (میرعلوی، ۲۰۰۹)

Table (1): Ranking of the resistance to erosion of geological formations using Selbi method 1980 (Mirallavi, 2009)

پارامترها	خیلی حساس	حساس	مقاوم متوسط	مقاوم	بسیار مقاوم
مقاومت سنگ بر پایه چکش اشمیت (R)	۳۵-۱۰	۳۵-۴۰	۴۰-۵۰	۵۰-۶۰	۶۰-۱۰۰
نمره	۵	۱۰	۱۴	۱۸	۲۰
هوازدگی	به‌طور کامل هوازده	هوازدگی زیاد	هوازدگی متوسط	کمی هوازده	بدون هوازدگی
نمره	۳	۵	۷	۹	۱۰
فاصله بین درزه‌ها	کمتر از ۵۰ میلی‌متر	۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر	بین ۰/۳ تا ۱ متر	بین ۱ تا ۳ متر	بیش از ۳ متر
نمره	۸	۱۵	۲۱	۲۸	۳۰
جهت یافتگی درزه‌ها نسبت به شیب دامنه	خیلی نامساعد، شیب درزه‌ها تند و خلاف جهت شیب دامنه	نامساعد، شیب درزه‌ها متوسط، و خلاف جهت شیب دامنه	نسبتاً مساعد، درزه‌ها نسبت به دامنه افقی یا تقریباً افقی اند. (سنگ‌های سخت)	مساعد، شیب درزه‌ها متوسط و در جهت شیب دامنه	خیلی مساعد شیب درزه‌ها تند و در جهت شیب دامنه، درزه‌ها متقاطع
نمره	۵	۹	۱۴	۱۸	۲۰
عرض درزه‌ها	بیش از ۲۰ میلی‌متر	۵ تا ۲۰ میلی‌متر	۱ تا ۵ میلی‌متر	۰/۱ تا ۱ میلی‌متر	کمتر از ۰/۱ میلی‌متر
نمره	۱	۴	۵	۶	۷
پیوستگی درزه‌ها	با پرشدگی زیاد	با پرشدگی کم	بدون پرشدگی	بسیار کم	منقطع
نمره	۱	۴	۵	۶	۷
جمع نمره‌ها	<۲۴	۲۵-۴۸	۴۹-۶۵	۶۶-۸۵	۸۶-۹۴

سازندهای زمین‌شناسی سه سازند زمین‌شناسی کهر، گرانیته شیرکوه و آهک تفت در ۳۰ پلات (برای هر سازند زمین‌شناسی ۱۰ پلات کنار گذاشته شد که در مجموع سه سازند، ۳۰ پلات انتخاب گردید) ۱×۱ کیلومتر مربعی که به‌منظور تست روش از سایر بخش‌های مطالعاتی کنار گذاشته شده بود، بررسی شد. به این صورت که مقادیر بُعد فراکتال شبکه‌زهکشی در این ۳۰ پلات محاسبه شد. با توجه به مقادیر بُعد فراکتال در این پلات‌ها، احتمال حضور سازند زمین‌شناسی کهر، آهک تفت و گرانیته شیرکوه به دست آمد.

### روش سلبی در تعیین حساسیت‌پذیری سازند به فرسایش

نکته قابل توجه در خصوص امتیازدهی حساسیت سازندها به فرسایش با استفاده از روش‌های رایج پسیاک و دکتر فیض‌نیا (میرعلوی، ۲۰۰۹) این است که فاکتور مؤثر سنگ‌شناسی در این روش‌ها با تنوع سنگ‌شناسی کشور ایران همخوانی لازم را ندارد و بعضی از سنگ‌شناسی‌های موجود در ایران در فهرست دو روش پسیاک و روش دکتر فیض‌نیا وجود ندارد.



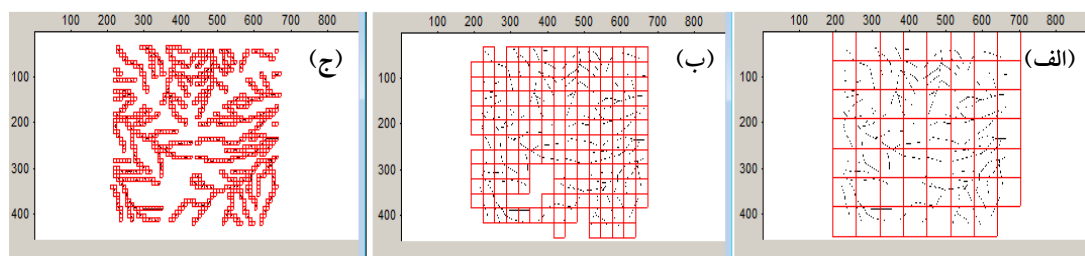
می‌شود. حد نهایی این قسمت زمانی است که  $\varepsilon$  به صفر میل می‌کند. شمارش و حاصل این شمارش  $N\varepsilon$  تعداد مربعات خواهد بود (مندلبرت، ۱۹۸۳).

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log(N\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)} \quad (1)$$

مرحله بعد ترسیم مقادیر  $\log(N\varepsilon)$  در مقابل  $\log(1/\varepsilon)$  است. شیب خط مستقیم که به بهترین وجه اطلاعات را به نمایش می‌گذارد، تقریباً برابر بعد فراکتال است. بنابراین برای محاسبه بعد فراکتال لازم است نمودار غیرخطی بعد فراکتال رسم شود. در این نمودار محور  $x$  ها اندازه شبکه و محور  $y$  ها نشان‌دهنده نقاط موجود در هر مربع است. سپس این نمودار با منحنی نظریه فراکتال برازش داده می‌شود تا همبستگی میان دو نمودار به دست آید. طی این کار، همبستگی بین تعداد و اندازه شبکه نشان داده می‌شود.

$$N = \varepsilon D + c \quad (2)$$

در این رابطه،  $D$  بعد فراکتال و یا همان همبستگی بعد و  $c$  ضریب ثابت است. نرم‌افزار Fractalyse از جمله نرم‌افزارهایی است که با آن می‌توان بعد فراکتال را به روش شمارش جعبه‌ای و سایر روش‌ها محاسبه کرد.



شکل (۳): نحوه محاسبه بعد فراکتال شبکه‌زهکشی روی سازند کهر با تغییر مقیاس: الف. اندازه جعبه ۸، ب. اندازه جعبه ۱۶، ج. اندازه جعبه ۳۲

Figure (3): How to calculate the fractal dimension of drainage network on the Kahar formation by changing the scale, a) with box size 8 b) with box size 16 and c) with box size 32

گرانیت شیرکوه و آهک تفت در کلاس مقاوم به فرسایش قرار دارند (جدول ۲). اما از محدودیت‌های روش پسیاک و دکتر فیض‌نیا عدم توجه به تنوع سنگ‌شناسی و استفاده از سنگ‌شناسی و توصیف‌های سنگی ابهام‌آمیز است که مانع طبقه‌بندی و تفکیک دقیق مقاومت سنگ‌ها و سازندها به فرسایش می‌شود. بنابراین برای مقایسه فرسایش‌پذیری دو سازند گرانیت شیرکوه و آهک تفت از روش سلبی استفاده شد. نتایج نشان داد که سازند گرانیت شیرکوه در کلاس

## بعد فراکتال (روش شمارش جعبه‌ای)

در بین روش‌های مختلفی که برای محاسبه بعد فراکتال ارائه شده، در صورتی که شبکه‌زهکشی به‌عنوان یک جسم خود متشابه در نظر گرفته شود، بهترین روش برای محاسبه بعد آن، محاسبه بعد فراکتال به روش مرسوم است. اما اگر شبکه‌زهکشی خودالحاقی یا خودوابسته در نظر گرفته شود، بهترین راه، محاسبه بعد فراکتال آن به روش شمارش جعبه‌ای است (کیوساک، ۲۰۱۴). روش شمارش جعبه‌ای معروف‌ترین روش محاسبه بعد فراکتال است؛ زیرا از این روش می‌توان برای محاسبه بعد فراکتالی تمامی عناصر، ابعاد و اشکال مختلف استفاده کرد و سرعت انجام محاسبات آن بیشتر از سایر روش‌هاست. علاوه بر این، الگوریتم آن قابلیت استخراج نتایجی با اطمینان بالا را فراهم می‌آورد. در این روش شبکه‌ای از خانه‌های مربع شکل روی تصویر مورد نظر قرار داده می‌شود. اندازه شبکه با  $\varepsilon$  مشخص می‌شود که معیاری از مقیاس است. تعداد مربعاتی که (به‌صورت مجازی ضخامت خطوط شبکه صفر در نظر گرفته می‌شود) هر قسمت از منحنی مورد نظر را پوشش می‌دهد، محاسبه می‌شود. این کار برای مربعات با اضلاع مختلف تکرار

## نتایج و بحث

۱. برآورد میزان فرسایش‌پذیری سازند زمین‌شناسی ویژگی‌های سنگ‌شناسی در حوزه‌های آبخیز از عوامل کنترل‌کننده فرسایش به حساب می‌آید. با تعیین مقاومت سنگ‌ها و سازندها می‌توان به‌گونه‌ای مناسب، منطقه‌های مختلف را از نظر حساسیت به فرسایش طبقه‌بندی کرد. نتایج امتیازدهی دو روش پسیاک و دکتر فیض‌نیا (میرعلوی، ۲۰۰۹) نشان داد سازند کهر در کلاس نسبتاً حساس و دو سازند

زمین‌شناسی است که به آسانی کمی‌سازی نمی‌شوند. با توجه به این امر میزان بُعد فراکتال ۳۳ پلات ۱×۱ کیلومتر مربعی به صورت تصادفی - سیتماتیک در سه سازند کهر، گرانیب شیرکوه و آهک تفت محاسبه شد. با توجه به نتایج، تعداد پلات لازم به ترتیب برای سازند کهر، گرانیب شیرکوه و آهک تفت، ۱۶، ۲۲ و ۲۶ عدد محاسبه شد (شکل ۴). بیشترین کمترین بُعد فراکتال به ترتیب در سازند کهر و سازند تفت به دست آمد. سازند کهر تناوبی از شیل و ماسه‌سنگ است که فاصله این دو لایه از هم بسیار کم می‌باشد؛ به همین دلیل الگوی شبکه شاخه درختی در این سازند ایجاد شده است. در صورتی که فاصله لایه‌های شیل و مارن زیاد بود، امکان ایجاد شبکه داربستی نیز وجود داشت.

متوسط و سازند آهک تفت در کلاس مقاوم قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر، سنگ‌های گرانیبی به رغم مقاومت فیزیکی بالا در محیط‌های آزمایشگاهی در اقلیم‌های خشک و سرد هم چون کوهستان‌های یزد حدود ۲۵ درصد پایداری کمتری نسبت به سنگ آهک داشته و به همین میزان سهم بیشتری در تولید رسوب ایفا می‌کند. سنگ‌های گرانیبی در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک سرد در مقابل دما شکافتگی و هیدرولیز بسیار حساس‌تر از سنگ‌های آهکی بوده و با فرایند دانه‌دانه شدن و تبدیل به قطعات کوچک‌تر برای جابه‌جایی و فرسایش آماده می‌شوند (جدول ۳).

## ۲. برآورد بُعد فراکتال

همان‌طور که پیش‌تر نیز به آن اشاره شد، از عوامل مؤثر در شکل‌گیری نوع الگوی شبکه‌زهکشی در هر منطقه متغیرهای

جدول (۲): امتیازدهی میزان مقاومت به فرسایش سه سازند زمین‌شناسی به روش پسیاک و دکتر فیض‌نیا

Table (2): Ranking of the resistance to erosion of geological formations using PSIAK and Feyznia methods

ردۀ حساسیت	ضریب حساسیت		سازند	سنگ‌شناسی	نماد	دوره	دوران
	دکتر فیض‌نیا	پسیاک					
مقاوم	۱۰-۱۲	۳	آهک تفت	آهک با لایه‌بندی منظم و دیواره‌مانند	Ktl	کرتاسه	مزوزوئیک
مقاوم	۱۰-۱۲	۳	گرانیب شیرکوه	گرانیب تا گرانودیوریت	gsh	ژوراسیک	
نسبتاً	۵-۶	۸	کهر	سنگ‌های دگرگونی فیلیت، شیل و شیست	Pek	پرکامبرین	

جدول (۳): امتیازدهی میزان مقاومت به فرسایش سه سازند زمین‌شناسی به روش سلبی (میرعلوی، ۲۰۰۹)

Table (3): Ranking of the resistance to erosion of geological formations using Selbi method (Mirallavi, 2009)

پارامترها	امتیازات آهک تفت	امتیازات گرانیب شیرکوه
مقاومت سنگ بر پایه چکش اشمیت (R)	۱۹	۱۷
هوازدگی	۹	۷
فاصله بین درزه‌ها	۲۱	۱۰
جهت یافتگی درزه‌ها نسبت به شیب دامنه	۱۸	۱۸
عرض درزه‌ها	۵	۵
پیوستگی درزه‌ها	۶	۴
جمع امتیاز	۷۸	۶۱
ردۀ حساسیت	مقاوم	مقاوم متوسط



شکل (۴): نمودار تغییرات بُعد فراکتال با تعداد پلات منتخب از هر سازند

Figure (4): Fractal dimension changes with the number of selected plots from each geological formation



را برای محاسبه میانگین بُعد فراکتال به خود اختصاص داده است. رفتار کارستیک سازند آهک تفت و تأثیر انحلال و فرسایش در دوره‌های گذشته، منجر به تشکیل آبراهه‌هایی با ابعاد و زوایای متنوع نسبت به دو سازند کهر و گرانیتی شده که متأثر از فعالیت‌های فرسایشی هستند و به همین سبب دامنه تغییرات در سازند آهک تفت بیشتر است. به منظور مقایسه تفاوت موجود بین میانگین بُعد فراکتال سه سازند زمین‌شناسی و تعیین سطح معنی‌داری نتایج به دست آمده، از آزمون تجزیه واریانس یک طرفه با استفاده از SPSS استفاده شد. چون سطح معنی‌داری از ۰/۰۱ کوچک‌تر است با اطمینان ۰/۹۹، بین میانگین بُعد فراکتال سه سازند آهک تفت، گرانیت شیرکوه و سازند کهر اختلاف معنی‌دار وجود دارد. در ادامه به منظور بررسی توزیع ارتفاعی پلات‌ها، ابتدا نقشه توپوگرافی هرکدام از پلات‌ها در نرم‌افزار Arc GIS ۱۰.۳ رقومی و نقشه شیب استخراج شد. بررسی‌ها نشان داد که شیب‌های بالای ۴۰ درصد، در حدود ۶۰ درصد مساحتی سازند تفت را به خود اختصاص داده است، سازند گرانیت شیرکوه در حدود ۵۰ درصد و در سازند کهر، در همه پلات‌ها مقدار شیب کمتر از ۴۰ درصد برآورد شده است. این مسئله اثرپذیری بُعد فراکتال را از شیب منطقه نشان می‌دهد به گونه‌ای که در سازند مقاوم آهک تفت به طرف سازند بسیار حساس کهر، میزان شیب کاهش یافته، اما میزان بُعد فراکتال افزایش داشته است. بنابراین، مقدار شیب رابطه‌ای مستقیم با درجه مقاومت سنگ‌شناسی دارد (جدول ۵).

شیب‌های زیاد در سنگ‌شناسی مقاوم فرصت نفوذ و تراکم آبراهه را از منطقه می‌گیرند؛ از این رو تراکم آبراهه در آن‌ها کمتر و بُعد فراکتال پایین‌تر است.

گفتنی است با توجه به سنگ‌شناسی سازندها، الگوی شبکه‌زهکشی مشاهده‌شده روی هر سه سازند زمین‌شناسی، الگوی شاخه‌درختی است. سازند کهر، فرسایش‌پذیرترین سازند از میان این سه سازند محسوب می‌شود و متوسط بُعد فراکتال آن، ۱/۲۰۷ است که بیشترین میزان بُعد فراکتال است. دلیل بالا بودن میزان بُعد فراکتال این سازند، فرسایش‌پذیری و سن بالای آن (هرچه سن سازند بیشتر باشد به علت تحمل تنش‌های بیشتر و توزیع متفاوت محلی آن، تراکم آبراهه بیشتری دارد) است که منجر به تشکیل شبکه آبراهه متراکم با شاخه‌های متعدد شده است. مقدار پایین بُعد فراکتال در سازند آهک تفت (۱/۱۴۹) را می‌توان به دلیل همگنی که در این سازند وجود دارد و مقاوت بالای این سازند به فرسایش اشاره کرد (جدول ۴). همان‌طور که نتایج بررسی مقاومت به فرسایش سازندها به روش سلبی نشان داد، سازند گرانیت نسبت به سازند آهک تفت از مقاومت کمتری برخوردار است و با توجه به وضعیت اقلیمی منطقه و قرارگیری آن در شرایط خشک و سرد، این سازند مستعد هوازدگی است و هوازدگی شدید، به صورت پدیده دانه‌دانه شدن و تولید مواد رسوبی ریزدانه عمل می‌کند. در واقع، مقادیر به دست آمده از بُعد فراکتال تفاوت در مقاومت به فرسایش دو سازند آهک تفت و گرانیت شیرکوه را به خوبی نشان می‌دهد. نکته حائز اهمیت دیگر، همخوانی و مطابقت تعداد پلات مورد نیاز و دامنه تغییرات بُعد فراکتالی در این سه سازند است؛ به طوری که با افزایش دامنه تغییرات، تعداد پلات نیز آهنگ افزایشی دارد. کمترین دامنه تغییرات مربوط به سازند کهر است که کمترین تعداد پلات (۱۶ پلات) را برای محاسبه شاخص‌های مورفومتریک لازم دارد. اما بیشترین دامنه تغییرات متعلق به سازند آهک تفت است که بیشترین تعداد پلات (۲۶ پلات)

جدول (۴): مقادیر آماری بعد فراکتال در سه سازند زمین‌شناسی

Table (4): Statistical values of fractal dimension in three geological formations

سازند	حداقل	حداکثر	میانگین	دامنه تغییرات	تعداد پلات
کهر	۱/۲	۱/۳	۱/۲۰۷	۰/۱۴	۱۶
گرانیت شیرکوه	۱/۰۷۳	۱/۲۲	۱/۱۶۱	۰/۱۵	۲۲
آهک تفت	۱/۰۴۶	۱/۲۰۷	۱/۱۴۹	۰/۱۶۱	۲۶

جدول (۵): مقادیر آماری بعد فراکتال و شیب در سه سازند زمین‌شناسی

Table (5): Statistical values of fractal dimension and slope in three geological formations

سازند	شیب		میانگین بعد فراکتال
	$< 40\%$	$> 40\%$	
کهر	-	۱۰۰	۱/۲۰۷
گرانیت شیرکوه	۴۸	۵۲	۱/۱۶۱
آهک تفت	۶۰	۴۰	۱/۱۴۹

### ۳. محاسبه شاخص‌های مورفومتری شبکه زهکشی

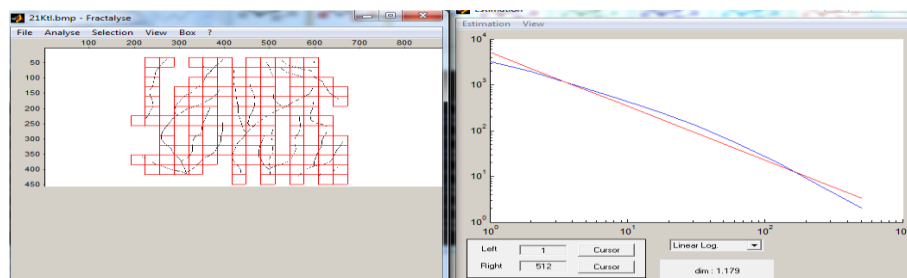
#### و ارتباط آن با بُعد فراکتال شبکه

در تحقیق حاضر، رتبه‌بندی شبکه‌های زهکشی استخراج‌شده از نقشه‌های توپوگرافی، به روش استراهلر انجام شد و شاخص‌های مورفومتری شبکه‌زهکشی شامل تعداد و طول رتبه‌ها، تراکم زهکشی، فراوانی رتبه‌ها و متوسط طول رتبه‌های آبراهه به دست آمد و همبستگی بین بُعد فراکتال (متغیر وابسته) و شاخص‌ها (متغیر مستقل) بررسی شد. بررسی رابطه بین بُعد فراکتال با شاخص‌های مورفومتری یک شبکه‌زهکشی سه سازند آهک تفت، گرانیت شیرکوه و سازند کهر در جدول (۶) نشان داده شده است. با توجه به اینکه سطح پلات در مطالعه مورد نظر  $1 \times 1$  در نظر گرفته شده است، به همین سبب مقدار مجموع طول کل آبراهه‌ها همان تراکم زهکشی است. تراکم زهکشی یکی از مهم‌ترین پارامترهای ژئومورفولوژیکی حوزه آبخیز است که اغلب از آن به‌عنوان شاخصی برای بیان وضعیت شبکه‌زهکشی استفاده می‌شود. با دانستن رابطه دقیق بین خصوصیات حوضه با تراکم زهکشی، می‌توان با در اختیار داشتن تراکم زهکشی سایر خصوصیات حوضه را پیش‌بینی کرد.

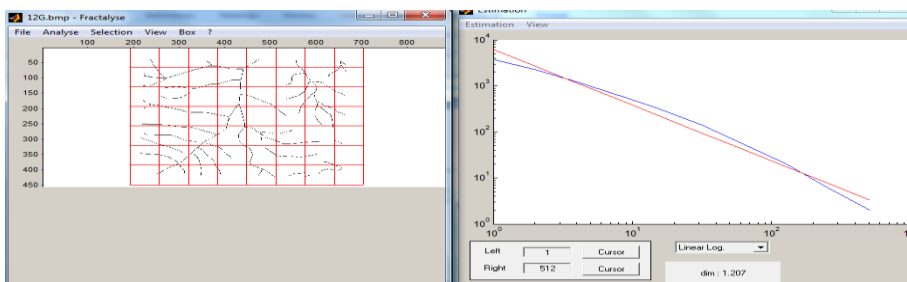
نتایج نشان داد که ارتباط بین بُعد فراکتال و تراکم‌زهکشی در سازندهای زمین‌شناسی در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است. بنابراین مقدار بُعد فراکتال متأثر از جنس سازندها و ضریب فرسایش‌پذیر است. همچنین بیشترین تراکم زهکشی و طول آبراهه مربوط به سازند کهر است. در واقع با بیشتر شدن طول آبراهه، میزان بُعد فراکتال نیز افزایش می‌یابد. این در حالی است که مجموع طول کل آبراهه‌ها در سازند آهک تفت به‌جز در رتبه ۲ تفاوت زیادی

با سازند گرانیت و کهر ندارد. طول بلند آبراهه‌ها از ویژگی‌های سازندهای آهکی به شمار می‌رود (فتاحی و طالب‌زاده، ۲۰۱۷). با وجود این ویژگی، مقدار بُعد فراکتال در سازند آهک تفت کمتر از دو سازند دیگر است؛ این امر ناشی از کمی تعداد آبراهه رتبه ۱ و عدد رتبه آبراهه است و این خود نشان‌دهنده اهمیت حضور و تراکم آبراهه‌های رتبه ۱ در مقدار عددی بُعد فراکتال شبکه می‌باشد. یکی از ویژگی‌های نظریه فراکتال حساسیت بسیار بالای به شرایط اولیه است، به‌طوری که با کوچک‌ترین تغییر در شرایط شبکه‌زهکشی، تغییرات بزرگی در مقادیر بُعد فراکتال کل شبکه ایجاد می‌شود. این مسئله به‌خوبی در نتایج این پژوهش نشان داده شد، به این ترتیب که تعداد بالای آبراهه‌های رتبه ۱ در شبکه‌های زهکشی روی سازند کهر برخلاف سازند آهک تفت مقادیر بالای بُعد فراکتال را به همراه داشته است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش، عدد رتبه آبراهه در سازند کهر به رتبه ۶ می‌رسد اما در سازند گرانیت شیرکوه و تفت، شبکه آبراهه به ترتیب تا رتبه ۴ و ۵ گسترش دارد؛ زیرا در سازندهای سست به دلیل فرسایش‌پذیری بالای آن، تراکم شکستگی‌ها بیشتر و شبکه آبراهه‌ای متراکم شکل می‌گیرد. به این ترتیب، فرسایش‌پذیری بالای سازند کهر، منجر به تشکیل و اضافه شدن تعداد زیاد آبراهه‌های رتبه اول و حتی رتبه دوم به شبکه‌زهکشی شده است. این امر در رتبه بقیه آبراهه‌ها نیز اثر مستقیمی دارد. هرچه بُعد فراکتالی بیشتر باشد، تراکم زهکشی و به همان نسبت دبی پیک هیدروگراف نیز بیشتر خواهد بود. بنابراین تعداد انشعابات آبراهه از رتبه‌های مختلف، همچنین سطح و طول این انشعابات از رابطه توانی و فراکتالی پیروی می‌کنند (شکل‌های ۵ تا ۷). رابطه رگرسیون تعداد آبراهه با بُعد فراکتال در دو سازند،

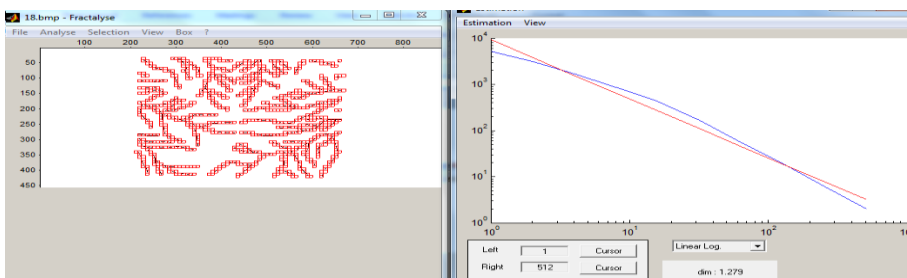
کهر و گرانیت نزدیک به ۰/۹ معنی دار است اما در سازند ناشی از همان رفتار کارستیک و انحلالی سازند آهک تفت تفت این مقدار حدود ۰/۷ می باشد که این کاهش می تواند دانست.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۵): محاسبه بعد فراکتال در نرم افزار Fractalyse

الف. سازند آهک تفت، پلات ۲۱؛ ب. سازند گرانیت شیرکوه، پلات ۱۲؛ ج. سازند کهر، پلات ۱۸

Figure (5): How to calculate the fractal dimension by Fractalyse Software

a. Taft formation, plot 21; b. Shirkouh granite formation, plot 12; c. Kahar formation, plate 18

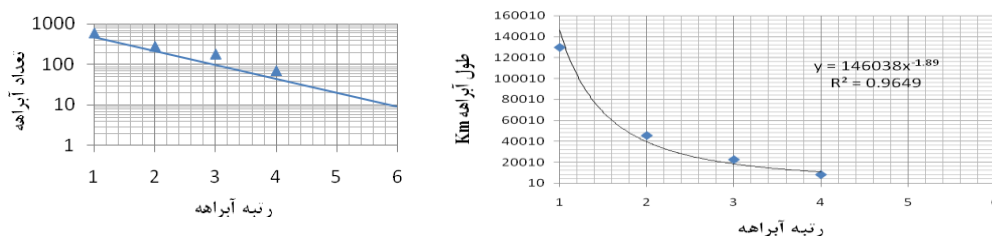
جدول (۶): روابط رگرسیونی بعد فراکتال با شاخص های مورفومتری در سه سازند زمین شناسی

Table (6): Regression relations of fractal dimension with morphometric indices in three geological formations

سازند	معادله رگرسیونی	ضریب همبستگی (r)	
کهر	تراکم زهکشی	$y = 2E-05 X + 1/01$	۰/۹۴
	رتبه آبراهه	$y = 613/19 X - 672/08$	۰/۸۴
	متوسط طول رتبه	$y = -0/0008 X + 1/3339$	۰/۵۶
	فراوانی رتبه	$y = 0/233 X + 1/1142$	۰/۸۴
گرانیت شیرکوه	تراکم زهکشی	$y = 3E-05 X + 0/9531$	۰/۹۹
	رتبه آبراهه	$y = 0/0024 X + 1/0379$	۰/۸۹
	متوسط طول رتبه	$y = -0/001 X + 1/3283$	۰/۵
	فراوانی رتبه	$y = 0/0535 X - 1/038$	۰/۸۹
آهک تفت	تراکم زهکشی	$y = 3E-05 X + 0/9462$	۰/۹۸
	رتبه آبراهه	$y = 0/0025 X + 1/0466$	۰/۶۵
	متوسط طول رتبه	$y = -0/0003 X + 1/2153$	۰/۲
	فراوانی رتبه	$y = 0/0664 X + 1/0466$	۰/۶۵

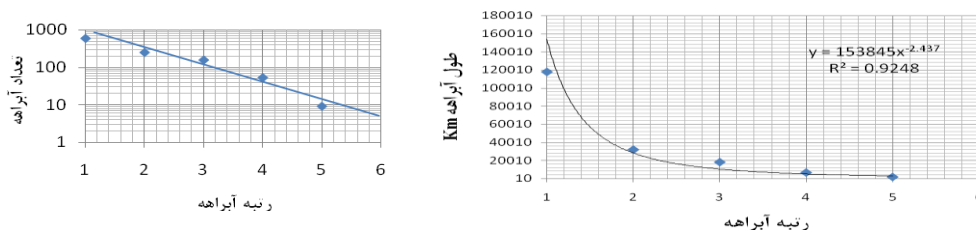
تحلیل فراکتالی شبکه زهکشی باشد؛ زیرا یافته‌های آن‌ها نیز نشان داد که بین بُعد فراکتال و حساسیت سازندهای زمین‌شناسی ارتباط معنی‌داری وجود دارد به نحوی که با افزایش حساسیت سنگ‌شناسی و به تبع آن تراکم زهکشی، عدد فراکتال افزایش می‌یابد و در سازندهای با حساسیت بیشتر نسبت به سازندهای مقاوم تغییرات بیشتری در تراکم شبکه زهکشی رخ داده است (علمی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۳؛ محمدی، ۲۰۱۶؛ علیمردی و همکاران، ۲۰۱۸؛ ایلدرمی و سپهری، ۲۰۱۸). همچنین بررسی‌ها نشان داد که شبکه زهکشی از خواص فراکتالی تبعیت می‌کند، به طوری که بُعد فراکتالی بالا معرف تراکم زهکشی بیشتر است. در واقع، تعداد انشعابات از رتبه‌های مختلف، سطح و طول این انشعابات از رابطه توانی و فراکتالی پیروی می‌کند (کیوساک، ۲۰۱۴). در ارتباط با روابط معنی‌دار بین بُعد فراکتال شبکه زهکشی و پارامترهای موفومتریک شبکه زهکشی مانند تراکم زهکشی، تعداد رتبه، متوسط طول رتبه و فراوانی رتبه، سایر محققان نیز نتایج مشابهی نشان دادند (خان‌بابایی و همکاران، ۲۰۱۳؛ خسروی و همکاران، ۲۰۱۷؛ علمی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۳؛ کرم و صابری، ۲۰۱۵). این نتایج بیانگر کارایی بُعد فراکتال به عنوان ابزاری کمی، برای بررسی ژئومورفولوژی شبکه‌های زهکشی است. در واقع، بُعد فراکتال می‌تواند پیچیدگی‌های شبکه زهکشی را به خوبی انعکاس دهد (هوپی و همکاران، ۲۰۱۷؛ گو و همکاران، ۲۰۱۵؛ علیمردی و همکاران، ۲۰۱۸؛ محمدی، ۲۰۱۶).

میزان فراوانی رتبه‌ها از آبراهه رتبه ۱ به سمت رتبه‌های بالاتر روند کاهشی دارد و بیشترین میزان فراوانی رتبه‌ها، در رتبه ۱ و سازند کهر دیده می‌شود. بین بُعد فراکتال و متوسط طول رتبه، رابطه‌ای معکوس وجود دارد؛ یعنی هرچه میزان متوسط طول رتبه بیشتر شود، بُعد فراکتال کاهش می‌یابد. در سازند کهر و گرانت این رابطه در حدود ۰/۵ و در سازند آهک تفت حدود ۰/۲ معنی‌دار است. بیشترین رتبه‌های آبراهه همان طور که در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده، رتبه ۱ است. طبق یک قانون کلی، تعداد آبراهه‌های یک حوضه با کاهش رتبه آبراهه افزایش می‌یابد (کومار و همکاران، ۲۰۰۰). با توجه به نتایج مشخص می‌شود که آبراهه‌های درجه اول در مجموع طول بیشتری از حوضه را نسبت به آبراهه‌های درجه دوم و آبراهه‌های درجه سوم نسبت به درجه سوم دارا هستند. علت این نتایج می‌تواند به علت تغییرات در شیب و توپوگرافی در منطقه مورد مطالعه باشد. مقدار فراوانی آبراهه‌ها در سه سازند زمین‌شناسی نشان‌دهنده ارتباط بین آبراهه‌ها و وضعیت زمین‌شناسی منطقه است. به طوری که با افزایش تعداد و طول آبراهه و تراکم زهکشی، میزان فرسایش‌پذیری در منطقه افزایش می‌یابد که منطبق بر مقادیر بالای بُعد فراکتال است. بنابراین می‌توان ادعا کرد با بررسی بُعد فراکتال شبکه بر روی سازندهای زمین‌شناسی، تا حد زیادی می‌توان خصوصیات ژئومورفولوژیکی شبکه زهکشی را پیش‌بینی نمود و دیدی کلی از منطقه به دست آورد. نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر می‌تواند تأییدکننده نتایج سایر پژوهش‌های انجام‌شده در ارتباط با



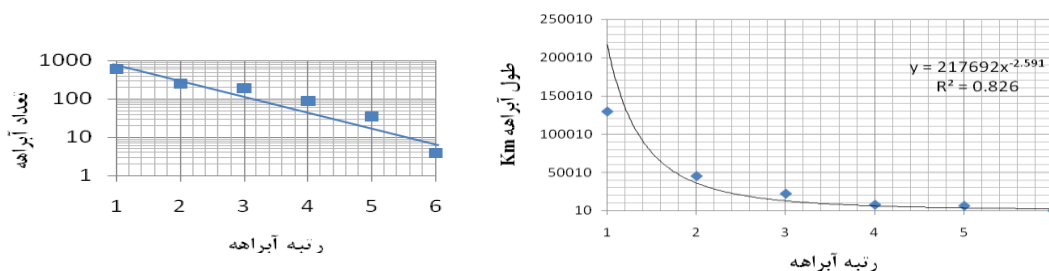
شکل (۶): رابطه بین رتبه آبراهه با تعداد و طول آبراهه‌ها (سازند آهک تفت)

Figure (6): Relationship between stream rank with the number and length of the stream (Taft Formation)



شکل (۷): رابطه بین رتبه آبراهه با تعداد و طول آبراهه‌ها (سازند گرانیت شیرکوه)

Figure (7): Relationship between stream rank with the number and length of the stream (Shirkouh granite Formation)



شکل (۸): رابطه بین رتبه آبراهه با تعداد و طول آبراهه‌ها (سازند کهر)

Figure (8): Relationship between stream rank with the number and length of the stream (Kahar Formation)

زهکشی است و در دو سازند زمین‌شناسی آهک تفت و گرانیت شیرکوه، این میزان حدود ۷۰ درصد است (جدول ۷). بعد فراکتال در سازند کهر به دلیل ماهیت فرسایش پذیر آن، نسبت به دو سازند آهک تفت و گرانیت شیرکوه، از توانایی بیشتری در تفکیک و طبقه‌بندی شبکه‌های زهکشی بر روی سازندهای زمین‌شناسی برخوردار است. در تمام نتایج و روابط به‌دست‌آمده از شاخص‌های مورفومتریک و بعد فراکتال، یک طبقه‌بندی و تفکیک مشخص بین سازند کهر با دو سازند گرانیت شیرکوه و آهک تفت حاصل می‌شود که می‌توان از این مشخصه برای رسیدن به یک شاخص هندسی جدید و دقیق در ارزیابی کمی شبکه آبراه‌های بهره برد.

#### ۴. بررسی عدم قطعیت کارایی بعد فراکتال

مسئله مهم دیگری که در بیشتر مطالعات انجام‌گرفته در زمینه بعد فراکتال دیده می‌شود، در نظر نگرفتن عدم قطعیت این روش در مطالعات است (علمی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۳؛ علیمرادی و همکاران، ۲۰۱۸؛ ایلدرمی و سپهری، ۲۰۱۸). در نتیجه یافته‌های آن‌ها از صحت کافی برای تعمیم به پدیده‌های طبیعی برخوردار نیست. از این رو در این پژوهش، عدم قطعیت کارایی بعد فراکتال در طبقه‌بندی و تفکیک سازندهای زمین‌شناسی (کهر، آهک تفت و گرانیت شیرکوه) بررسی شد. نتایج این بررسی نشان داد که تنها در سازند زمین‌شناسی کهر با احتمال ۹۰ درصد بعد فراکتال، قادر به تفکیک شبکه‌های

جدول (۷): عدم قطعیت کارایی بعد فراکتال در طبقه‌بندی و تفکیک سه سازند زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

Table (7): Uncertainty of fractal dimension in classification and separation of three geological formations of the study area

ردیف	سازند کهر (Pck)	سازند گرانیت شیرکوه (gsh)	سازند آهک تفت (Ktl)
۱	✓	✓	(gsh) ×
۲	✓	✓	(gsh) ×
۳	✓	(Ktl) ×	✓
۴	✓	✓	✓
۵	✓	✓	✓
۶	✓	(Pck) ×	✓
۷	✓	✓	✓
۸	(gsh) ×	(Ktl) ×	(gsh) ×
۹	✓	✓	✓
۱۰	✓	✓	✓
مجموع %	۹۰	۷۰	۷۰

## نتیجه گیری

از آنجا که متغیرهای زمین شناسی تأثیر گسترده‌ای بر ماهیت و فعالیت سیستم‌های شبکه آبراه‌های دارند، در این بررسی، نقش سنگ‌شناسی و سازند زمین‌شناسی در کمی‌سازی شبکه‌زهکشی استفاده شده است. مقادیر عددی بُعد فراکتال برای سه سازند زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه به دست آمد؛ میانگین بُعد فراکتال ۱/۱۴۹ نشان‌دهنده سازند آهک تفت، میانگین بُعد فراکتال ۱/۱۶۱، سازند گرانیت و مقدار ۱/۲۰۷ سازند کهر است. بیشترین مقدار عددی بُعد فراکتال در سازند کهر و کمترین آن در سازند تفت محاسبه شد. بالاترین روابط معنی‌دار بین بُعد فراکتال و مجموع طول کل آبراه‌ها به دست آمد. در واقع تحلیل ابعاد فراکتال امکان بررسی سریع و با دقتی از ویژگی‌های فرسایشی و حساسیت به فرسایش سازندهای منطقه مورد مطالعه را امکان‌پذیر می‌کند. در این پژوهش، با استفاده از روش سلبی، ۶ عامل مؤثر در مقاومت و حساسیت سنگ به فرسایش (چکش اشمیت، هوازدگی، فاصله بین درزه‌ها، جهت‌یافتگی درزه‌ها نسبت به شیب دامنه، عرض و پیوستگی درزه‌ها) در دو سازند گرانیت شیرکوه و آهک تفت مورد بررسی قرار گرفت

## منابع

- Alimoradi, M., Ekhtesasi, M. R., Tazeh, M., Karimi, H., 2018. Calculation of Fractal Dimension of the Geological Formations and Their Relationship to the Formation Sensibility. *Physical Geography Research Quarterly*, 50(2), 241-253. (In Persian)
- Ben-Zion, Y., Sammis, C.G., 2003. Characterization of fault zones. *Pure and Applied Geophysics*, 160(3-4), 677-715 .
- Burrough, P., 1981. Fractal dimensions of landscapes and other environmental data. *Nature*, 294(5838), 240-242 .
- De Cola, L., Lam, N.S.-N., 1993. Introduction to fractals in geography. *Fractals in Geography* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ) pp, 3-22.
- 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.
- ElmiZade, H., Mahpeikar, O., Sadatmand, M., 2013. Investigate the theory of fractals in fluvial geomorphology: A Case Study Zarrinehroud. *Research of quantitative geomorphology*, 3(2), 130-141. (In Persian)
- Fac-Beneda, J., 2013. Fractal structure of the Kashubian hydrographic system. *Journal of Hydrology*, 488, 48-54 .
- Fakhar Izadi, N., Naseri, K., Mesdaghi, M., 2016. The Effects of Plot Size and Shape on Accuracy and Precision of Estimation of Production at Some Pastures by Sampling Simulation. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 4(14), 51-60. (In Persian)
- Fattahi, M. H., Talebzadeh, Z., 2017. The relationship between watershed compactness coefficient and the fractal characteristics. *Iran Water Resources Research*, 13(1), 191-203. (In Persian)

که بررسی این عوامل، بازدیدهای میدانی و صرف زمان و هزینه زیادی را به دنبال دارد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که با محاسبه مقادیر عددی بُعد فراکتال سازندهای زمین‌شناسی می‌توان پی به وضعیت فرسایشی آن‌ها برد و میزان مقاومت و حساسیت سازندهای زمین‌شناسی به فرسایش را اولویت‌بندی و مقایسه کرد. نتایج بررسی عدم قطعیت کارایی بُعد فراکتال در طبقه‌بندی و تفکیک سازندهای زمین‌شناسی نشان داد که تنها در سازند زمین‌شناسی کهر با احتمال ۹۰ درصد بُعد فراکتال از روند ثابتی برخوردار می‌باشد و در دو سازند زمین‌شناسی آهک تفت و سازند گرانیت شیرکوه، این میزان حدود ۷۰ درصد است. بنابراین بُعد فراکتال در شناسایی شبکه‌زهکشی سازند کهر قوی‌تر از دو سازند دیگر گرانیتی و آهکی عمل کرده و توانایی بیشتری نشان می‌دهد. در تمام نتایج و روابط به دست آمده از شاخص‌های مورفومتریک و بُعد فراکتال، طبقه‌بندی و تفکیک مشخصی بین سازند کهر با دو سازند گرانیت شیرکوه و آهک تفت حاصل می‌شود که می‌توان از این مشخصه برای رسیدن به یک شاخص هندسی جدید و دقیق در ارزیابی کمی شبکه آبراه‌های بهره برد.



10. Gloaguen, R., Marpu, P., Niemeyer, I., 2007. Automatic extraction of faults and fractal analysis from remote sensing data. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 14(2), 131-138 .
11. Gloaguen, R., Kabner, A., Wobbe, F., Shahzad, F., Mahmood, A., 2008. Remote sensing analysis of crustal deformation using river networks. Paper presented at the Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International.
12. Guo, Y., Zhang, S., Wang, Z., 2015. Correlation between flood frequency and geomorphologic complexity of river network- A case study of Hangzhou China.
13. 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(2), 165-174.
14. Ibanez, D.M., de Miranda, F.P., Riccomini, C., 2014. Geomorphometric pattern recognition of SRTM data applied to the tectonic interpretation of the Amazonian landscape. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 192-204 .
15. Ildoromi, A. R., Sepehri, M., 2018. Relationship of Quantitative Geomorphological Indices Using Fractal. *Quantitative Geomorphological Research*, 6(4), 70-87. (In Persian)
16. Karam, A., Saberi, M., 2015. Calculating fractal dimension in drainage basins and its relationship with the characteristics of the basin, *Research of quantitative geomorphology*, 4(3), 153-167. (In Persian)
17. Khanbabaie, Z., Karam, A., Rostamizad, G., 2013. Studying Relationships between the Fractal Dimension of the Drainage Basins and Some of Their Geomorphological Characteristics. *International Journal of Geosciences*, 4, 636 .
18. Khosravi, A., Sepehr, A., Abdollahzadeh, Z., 2017. Fractal Behavior and Its Relationship with Hydromorphometric Characteristics over Catchments of Binaloud Northern Hillslopes. *Scientific Journal Management System*, 3(9), 1-20. (In Persian)
19. Krein, A., Petticrew, E., Udelhoven, T., 2003. The use of fine sediment fractal dimensions and colour to determine sediment sources in a small watershed. *Catena*, 53(2), 165-179 .
20. Kumar R., Kumar S., Lohani A. K., Nema R. K., Singh R.D., 2000. Evaluation of Geomorphological Characteristics of a Catchment Using GIS, *GIS India*, Vol. 9, No. 3, 2000, pp. 13-17.
21. Kusák, M., 2014. IN THE STUDY OF COMPLEX GEOMORPHIC NETWORKS.
22. La Barbera, P., Rosso, R., 1989. On the fractal dimension of stream networks. *Water Resources Research*, 25(4), 735-741.
23. Mandelbrot, B.B., 1983. The fractal geometry of nature/Revised and enlarged edition. New York, WH Freeman and Co., 1983, 495 p., 1 .
24. Miralavi, A.S., 2009. Investigation of the Effects of Lithological Units in sediment production in Arid Areas (Case Study: Manshad Watershed). M.Sc. thesis, Yazd University.
25. Mohammadi Khashoui, M., 2016. Quantitative analysis of geomorphology patterns of the drainage networks and its fractal dimension on geological formations in arid areas (Case Study, Yazd- Ardakan Basin). Dissertation for Ph.D in watershed Management, Yazd University: faculty of Watershed Management.
26. Nikooyi, E., Heydari, M., Talebbeydokhti, N. Hekmatzadeh, A.A., 2008. Fractal geometry in river engineering: ideas, concepts and achievements, National Congress on Civil Engineering, 14-15 May, University of Tehran. (In Persian)
27. Palmer, M.W., 1988. Fractal geometry: a tool for describing spatial patterns of plant communities. *Vegetatio*, 75(1-2), 91-102 .
28. Pelletier, J. D. 1999. Self-organization and scaling relationships of evolving river networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B4), 7359-7375.
29. Peyrowan, H. R., Shariat Jafari, M., 2013. Presentation of a comprehensive method for determining erodibility rate of rock units with a review on Iranian geology. *Watershed Engineering and Management*, 5(3), 199-213. (In Persian)
30. Phillips, J., 1993. Interpreting the fractal dimension of river networks. *Fractals in geography*, 7, 142-157.
31. Shahzad, F., Mahmood, S., Gloaguen, R., 2010. Nonlinear analysis of drainage systems to examine surface deformation: an example from Potwar Plateau (Northern Pakistan). *Nonlinear Processes in Geophysics*, 17(2), 137-147 .
32. Schuller, D., Rao, A., Jeong, G., 2001. Fractal characteristics of dense stream networks. *Journal of Hydrology*, 243(1), 1-16 .
33. Turcotte, D.L., 1997. Fractals and chaos in

- geology and geophysics: Cambridge university press.  
34. Turcotte, D.L., 2007. Self-organized complexity in geomorphology: Observations and models. *Geomorphology*, 91(3), 302-310.

## The Application of fractal dimension and morphometric properties of drainage networks in the analysis of formation sensibility in arid areas (Case Study, Yazd-Ardakan Basin)

Mojdeh Mohammadi<sup>1</sup>, Mohammad Reza Ekhtesasi\*<sup>2</sup>, Ali Talebi<sup>2</sup>, Seyed Zeynalabedin Hosseini<sup>3</sup>

Received: 15/01/2019

Accepted: 19/05/2019

### Expanded abstracts

**Introduction:** Many natural phenomena have many variables that make it difficult to find relationships between them using common mathematical methods. This problem, along with the impossibility of measuring all elements of nature, has led to a major evolution in the way of understanding and explaining phenomena. In this way, one can use the fractal geometry with the theory that many natural phenomena are order in the chaos. Each element of nature is represented as a fractal geometry number. In fact, fractal geometry is a quantitative tool for studying the geomorphology of drainage networks and modeling many complex natural phenomena. Since geological variables have a profound effect on the nature and activity of the drainage networks. In this study, the role of lithology and geological formations is studied to quantify the drainage networks and used fractal dimension to indicate sensitivity to erosion of the formations of this area.

**Material and Method:** The present study consists of four main sections. The first section is the collection of maps and data. In this section, geological maps of 1:100000 areas were provided and selected from the geological formations of Yazd- Ardakan basin, three geological formations of Kahar, Granit and Taft. Sensitivity to erosion of these formations was studied in this area using PSIAC, Feyznia and Selby methods. In second section, fractal dimension is estimated in 30 plots of  $1 \times 1 \text{ km}^2$ , three geological formations of Kahar, Granite and Taft. In each geological formation, fractal dimension was calculated by box counting method using Fractalise software and the number of plots required in each formation was determined using Graphical method. In the third section of this study, morphometric indices were calculated including drainage density, number of ranks, average length of rank and rank frequency. In the final section, uncertainty analysis of fractal dimension efficiency was studied in classification and separation of geological formations. In most studies in the field of fractal dimension, the uncertainty of this method is not considered. As a result, their findings do not have enough accuracy to generalize to natural phenomena. Therefore, in this study, uncertainty of fractal dimension efficiency was investigated in 30 plots of  $1 \times 1 \text{ km}^2$  that were excluded from other study sections for testing this method.

**Result:** The mean fractal dimension of 1.149 represents Taft formation, the mean fractal dimension of 1.161, is Granite formation and the amount of 1.207 is Kahar formation. The highest fractal dimension was calculated in

1. Ph.D of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University

2. Prof., Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University; mr\_ekhtesasi@yazd.ac.ir

3. Prof., Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University

4. Assistant Prof., Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University

DOI: 10.22052/deej.2018.7.24.1

Kahar formation (1.279) and the lowest in Taft formation (1.046). In addition, the correlation coefficient is 99%. The results also indicated a significant and meaningful relationship between fractal dimensions of drainage networks and morphometric properties. In this paper, a positive relationship is observed between morphometric parameters and fractal dimension, so that the greatest correlation coefficient is found between the fractal dimension and the drainage density (0.99). The results of uncertainty analysis of fractal dimension showed which fractal dimension in the geological formation of Kahar with 90% has a steady trend and in two geological formations of Taft and Granite, this amount is about 70%. Therefore, fractal dimension in the drainage network identification of the Kahar formation is more powerful than two other granite and Taft formations.

**Discussion and conclusion:** The drainage networks are the most prominent landscapes on earth that are the basis of many hydrological and geomorphological models. Due to the geomorphological characteristics of the region, the drainage network shows its own fractal properties that are saved as code in it. In fact, drainage networks are fractal phenomena with fractal behavior. In this study, the fractal dimension and morphometric properties of the drainage network were used to analyze the sensitivity to erosion of the geological formations of this area. PSIAC and Feyznia methods did not perform well in separating the sensitivity to erosion of Taft and granite formation, and they are unable to distinguish between these two formations. So, using the Selby method, six effective factors were investigated on the resistance and sensitivity of formations to erosion (Schmidt Rebound Hardness, weathering, distance between joints, direction of the joints relative to the slope, the width and connection of the joints) in Taft and Granite formations. The study of these factors leads to field visits and spends a lot of time and cost. As the results of the resistance to erosion of formations were shown by Selby method, Granite formation has less resistance to Taft formation. Due to the climatic conditions in this area, Granite formation is susceptible to weathering. Extreme weathering acts as arenization process. In fact, fractal dimension in three geological formations of the study area is well showed the difference in resistance to erosion of both Taft and Granite formations. The results of this study showed that fractal dimension allows for a quick and accurate analysis of the erosion characteristics and sensitivity to erosion of the formations of this area.

**Keywords:** Drainage network, Fractal dimension, Geological formation, Yazd-Ardakan Basin, uncertainty.