

## مقایسه‌ی بعد فراکتال و ویژگی‌های ژئومورفولوژیک در مدیریت حوزه آبخیز عقدا

مژده محمدی خوشی\*: پژوهشگر پسادکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه یزد، یزد

محمدرضا اختصاصی: استاد دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه یزد، یزد

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۱۱

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۵)

## چکیده

هندسه فراکتال، زبان ریاضی است که می‌تواند به صورت ابزاری کمی برای بررسی ژئومورفولوژی حوضه‌ی آبخیز و مدل‌سازی بسیاری از پدیده‌های پیچیده‌ی طبیعی استفاده شود. در حقیقت پدیده‌های ژئوفیزیکی مانند حوضه‌های آبخیز، پدیده‌هایی فراکتالی هستند که الگوی فراکتالی در رفتارهای آنها قابل بررسی است. شناخت عوامل ژئومورفولوژیکی و عملکرد آنها، اهمیت بالایی در مدیریت حوضه دارد. پژوهش حاضر با هدف تحلیل رفتار فراکتالی حوضه آبخیز عقدا، از طریق محاسبه‌ی ابعاد فراکتال شکل حوضه و شبکه‌زهکشی و مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با ۱۸ ویژگی ژئومورفولوژیک حوضه‌ی مورد مطالعه انجام شده‌است. نتایج نشان داد که در بین زیرحوضه‌های مستقل، زیرحوضه‌ی T8 با بعد فراکتال  $1/47$  و در میان زیرحوضه‌های تجمعی، زیرحوضه‌ی T03 با بعد فراکتال  $1/6$  دارای بیشترین بعد فراکتال شبکه زهکشی هستند و بیشترین بعد فراکتال شکل حوضه را نیز به ترتیب با مقادیر  $1/05$  و  $1/08$  به خود اختصاص می‌دهند. نتایج حاصل از این بررسی، روابط معنی‌داری بین ابعاد فراکتال شکل حوضه و شبکه‌زهکشی با ویژگی‌های ژئومورفولوژیک نشان می‌دهد. بالاترین ضریب همبستگی متعلق به روابط رگرسیونی بین مجموع طول آبراهه  $0/98$ ، مساحت  $0/97$  و مساحت فرسایش‌پذیر حوضه  $0/95$  با بعد فراکتال شبکه‌زهکشی است و بعد فراکتال شکل حوضه نیز بالاترین همبستگی را با تعداد آبراهه  $0/82$ ، مجموع طول آبراهه  $0/78$  و مساحت  $0/7$  نشان می‌دهد (در سطح  $0/99$ ). در ادامه با بررسی ویژگی‌های ژئومورفولوژیک و مقایسه‌ی آن با بعد فراکتال شکل حوضه و شبکه‌زهکشی منطقه، وضعیت فرسایشی منطقه‌ی مورد مطالعه مشخص شد. با توجه به نتایج مشخص شد که واحدهای مستقل مربوط به واحدهای T8، T1 و T6 و در واحد ترکیبی، T03 دارای بیشترین فرسایش‌پذیری هستند. این نتایج می‌تواند در برنامه‌های کنترل رسوب و آبخیزداری استفاده شود و راهکارهای لازم را برای مدیریت منطقه ارائه دهد. در واقع، پژوهش حاضر نشان داد که تحلیل ابعاد فراکتال می‌تواند به بررسی سریع و دقیقی از ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه و شبکه‌زهکشی منجر شود.

واژگان کلیدی: بعد فراکتال، پارامتر ژئومورفولوژیک، روش شمارش جعبه، مدیریت حوضه آبخیز.

## ۱- مقدمه

بسیاری از پدیده‌های طبیعی، متغیرهای فراوانی دارند که برقراری روابط بین آنها با استفاده از روش‌های معمول ریاضی مشکل است. این مسئله در کنار عدم امکان اندازه‌گیری تمام اجزای طبیعت، به شکل‌گیری تحولاتی بزرگ در شیوه‌ی درک و تبیین پدیده‌ها منجر شده‌است. در این شیوه از طریق هندسه‌ی فراکتال با این تئوری که خیلی

از پدیده‌های جهان طبیعت در عین بی‌نظمی دارای نظم هستند، می‌توان هر جزء از طبیعت را به صورت یک عدد کمی هندسه فراکتال در آورد. هندسه فرکتال<sup>۱</sup> (Mandelbrot, 1967 & 1983)، مبحث جدیدی است که در طول دو دهه‌ی اخیر محققان را بر آن داشته تا با مطالعه‌ی روابط موجود بین پدیده‌ها به شاخص‌هایی دست یابند که بتوانند بر مبنای آن، به تبیین خصوصیات بیشتری از حوضه، شبکه‌زهدکشی و خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوضه آبخیز بپردازند. امروزه ریاضیات، ابزاری قدرتمند برای توصیف فرآیندها و پیچیدگی‌های موجود در طبیعت است که در اختیار طبیعی‌دانان قرار دارد تا بتوانند آنها را در قالب ریاضی و روابط کمی درآورند. واژه‌ی فرکتال توسط Mandelbrot در سال ۱۹۶۷ برای توصیف اشیای هندسی پیچیده که درجه‌ی بالایی از خود تشابهی دارند، ابداع شد. یک فرکتال، شکل هندسی است که می‌تواند به بخش‌هایی تقسیم شود که هر کدام از آنها یک کپی تعدیل یافته از لحاظ اندازه از کل است. روش شمارش جعبه‌ای<sup>۲</sup>، معروف‌ترین روش محاسبه‌ی بعد فرکتال است؛ چرا که از این روش می‌توان برای محاسبه‌ی بعد فرکتالی تمامی عناصر، ابعاد و اشکال مختلف استفاده کرد و سرعت محاسبات آن بیش از سایر روش‌ها است. علاوه بر این، الگوریتم آن از قابلیت استخراج نتایجی با اطمینان بالا برخوردار است. استفاده از تجزیه و تحلیل فراکتال برای توصیف کمی ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی در دهه‌های اخیر افزایش یافته‌است (Mandelbrot, 1983 & Ben-Zion, 2003 & Gloaguen et al, 2007 & Gloaguen et al, 2008 & Shahzad et al, 2010 & Khanbabaei et al, 2013 & Ibanez et al, 2014). به طور کلی، می‌توان ادعا کرد که گسترش تحقیقات ژئومورفولوژی در زمینه‌ی فراکتال به کشف و شناسایی ابعاد جدیدی از توانایی هندسه‌ی فراکتال در مدل‌سازی اشکال ژئومورفولوژیکی منجر خواهد شد. در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، بررسی کاملی از دیدگاه هندسه‌ی فراکتالی برای مدل‌سازی شبکه رودخانه‌ای صورت گرفته‌است. این تحلیل‌ها بر اساس قوانین هورتون – که با استفاده از نسبت انشعاب و طول رودخانه و قوانین طول و مساحت حوضه که فراکتال خودمتشابه را در الگوی رودخانه‌ها نشان می‌دهد – صورت گرفته‌است (Gloaguen et al, 2007 & 2008).

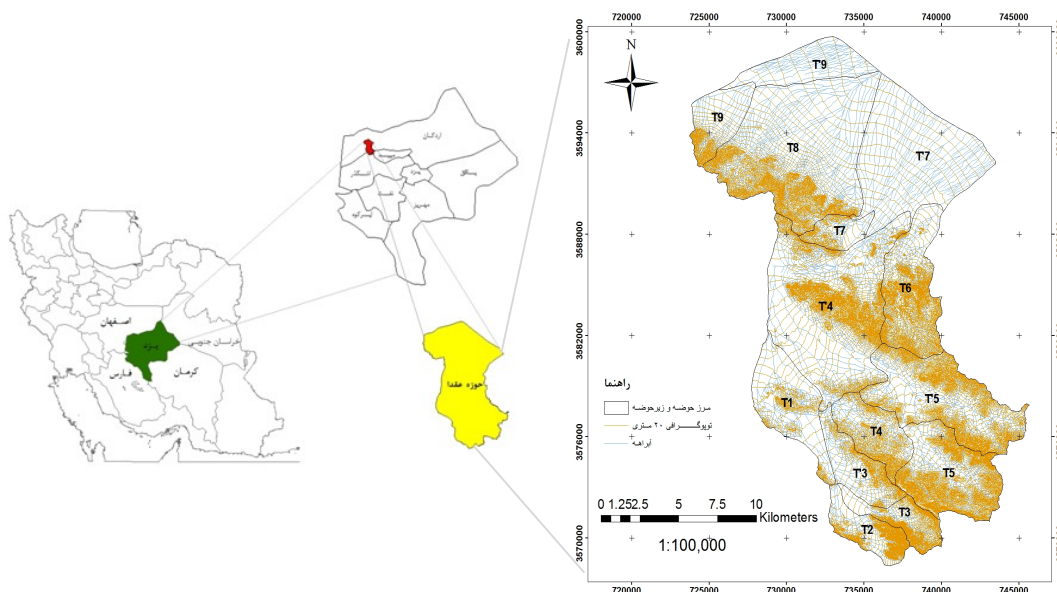
روابط بین ابعاد فراکتال با خصوصیات مورفومتری حوضه‌های آبریز دامنه‌ای شمال بینالود نشان داد که بین بعد فراکتال نسبت انشعاب با مساحت حوضه‌های مورد مطالعه، رابطه‌ای معکوس و منفی وجود دارد. علاوه بر این، بیشترین ضریب همبستگی مربوط به بعد فراکتال انشعاب رودخانه‌ای و شکل حوضه نیز حاصل شد (خسروی و همکاران، ۲۰۱۷). در مطالعه‌ای با بررسی ساختار فراکتالی سیستم هیدروگرافی کاشویان در شمال لهستان، بعد فراکتال در هفت حوضه از ۳۰ زیر حوضه‌ی هیدروگرافی منطقه‌ی مورد مطالعه به دو روش فراکتال زمین‌ریختی و شمارش جعبه‌ای حاصل شد. نتایج نشان داد که شبکه هیدروگرافی کاشویان هنوز در مرحله‌ی سازماندهی قرار داشته و بیشترین مرحله‌ی بلوغ شبکه هیدروگرافی، در دامنه‌های جنوبی با ابعاد فراکتال ۱/۷۹- ۱/۹۷ قابل مشاهده‌است (Fac-Beneda, 2013). بررسی رابطه بین ابعاد فراکتال شبکه زهدکشی و برخی از ویژگی‌های ژئومورفولوژی این شبکه نشان داد که بین بعد فراکتال و عواملی مانند شکل، مساحت، نسبت انشعاب و نسبت طول در حوضه‌ها رابطه‌ی معنی‌داری وجود دارد (Khanbabaei et al, 2013). علاوه بر این، با افزایش بعد فراکتالی یک الگوی آبراهه‌ای از مرتبه‌ی  $X+1$ ، تعداد یا طول آبراهه‌ها از مرتبه‌ی  $X+1$  افزایش می‌یابد (Kusák, 2014)، و اینکه بعد فراکتالی بالا معرف تراکم زهدکشی بیشتر و زمان کمتر

<sup>۱</sup> Fractal<sup>۲</sup> Box- counting Method

برای رسیدن به جریان دائمی است و هر چه بعد فراکتالی بیشتر باشد، دبی اوج هیدروگراف خروجی نیز به همان نسبت بیشتر خواهد بود (علمی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۳). شبکه‌های رودخانه‌ای به عنوان پدیده‌ی ژئوفیزیکی، یکی از بارزترین الگوهای فراکتالی در طبیعت است. تعداد انشعابات یک رودخانه از مرتبه‌های گوناگون، همچنین سطح و طول این انشعابات از رابطه‌ی توانی و فراکتالی پیروی می‌کنند. از این روابط می‌توان برای بررسی تغییر انشعابات رودخانه‌ها و بررسی شرایط حوضه در گذر زمان بهره‌جست (محمدی، ۲۰۱۶). شکل هندسی رودخانه (منحنی رودخانه) می‌تواند به عنوان یک خم چندفراکتال مد نظر قرار گیرد و از این دیدگاه، تئوری ریاضی چند فراکتال نیز می‌تواند به عنوان ابزاری مناسب برای پیش‌بینی شکل هندسی آتی رودخانه‌های پر پیچ و خم به خدمت گرفته شود (نیکویی و همکاران، ۲۰۰۸). کاربرد هندسه فراکتال در زمینه‌ی ضریب فشردگی حوضه آبریز و ترسیم هیدروگراف حوضه به این شکل است که هر چه ضریب فشردگی به  $1/5$  نزدیک‌تر باشد، حوضه دایره‌ای‌تر و هیدروگراف‌ها از تطابق بیشتری برخوردار است. در واقع، کاربرد فراکتال در ترسیم هیدروگراف نتایج بهتری به همراه دارد؛ این در حالی است که اگر عدد ضریب فشردگی از  $1/5$  فاصله بگیرد، تطابق در هیدروگراف کمتر می‌شود (فتاحی و طالب‌زاده، ۲۰۱۷). مطالعه و بررسی بر روی لندفرم‌های یخچالی در هیمالیا با استفاده از تحلیل چندفراکتالی نشان داد که این لندفرم‌ها نسبت به لندفرم‌های رودخانه‌ای، ساختار پیچیده‌تری دارند و تحلیل چندفراکتالی می‌تواند لندفرم‌های به وجود آمده توسط فرآیندهای مختلف را تفکیک کند (Dutta et al, 2014). بررسی ارتباط بعد فراکتال با میزان حساسیت هر سازند نشان داد که با افزایش حساسیت سنگ‌شناسی و به تبع آن تراکم زهکشی، عدد فراکتال افزایش می‌یابد (علی‌مرادی، ۲۰۱۸). ارتباط بین خصوصیات فراکتالی شبکه‌زهکشی و مراحل تکاملی فرسایش در حوضه‌ی رودخانه‌ی زرد چین نشان داد که مقادیر فراکتالی شبکه‌زهکشی با مقادیر تحویل رسوب و رواناب حوضه، رابطه‌ای مثبت و خطی دارد. همچنین مقادیر بعد فراکتال کمتر از  $1/06$ ، بیانگر مرحله‌ی فرسایشی جوان در حوضه است و مقادیر بعد فراکتال بیش از  $1/06$ ، مرحله‌ی بلوغ یا پیری حوضه را مشخص می‌کند (Hui and Changxing, 2017). در حقیقت پدیده‌های ژئوفیزیکی مانند حوضه‌های آبخیز، پدیده‌هایی فراکتالی هستند که الگوی فراکتالی در رفتارهای آن‌ها قابل بررسی است. همچنین شناخت عوامل ژئومورفولوژیکی و عملکرد آنها در حوضه آبخیز، اهمیت بالایی در مدیریت حوضه‌های آبخیز دارد. پژوهش حاضر با هدف تحلیل رفتار فراکتالی حوضه آبخیز عقدا، از طریق محاسبه‌ی ابعاد فراکتال شکل حوضه، شبکه‌زهکشی و مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه‌ی مورد مطالعه انجام شده است.

## ۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

حوضه آبخیز عقدا، بین عرض‌های  $32^{\circ} 31'$  تا  $32^{\circ} 14'$  عرض شمالی و طول شرقی  $53^{\circ} 25'$  تا  $53^{\circ} 57'$  واقع شده است. مساحت و محیط کل حوضه به ترتیب  $369/63$  کیلومتر مربع و  $105/26$  کیلومتر است. حوضه‌ی مورد مطالعه در استان یزد، شهرستان اردکان و در سمت جنوب غربی آن قرار گرفته است (شکل ۱). متوسط بارش سالانه در حوضه‌ی عقدا  $105/32$  میلی‌متر است که دی‌ماه با بیش از ۲۰ درصد بارندگی سالیانه، پر باران‌ترین ماه سال به شمار می‌رود. روند تغییر ارتفاع در حوضه، از جنوب شرق به شمال شرق و قسمت‌های شمالی (خروجی حوضه) است.



شکل ۱: موقعیت حوزه آبخیز عقدا در استان یزد و زیرحوضه های آن

حداکثر ارتفاع حوضه، ۲۸۲۱ متر است که در ارتفاعات جنوب حوضه مشاهده می شود و حداقل ارتفاع آن، نزدیک به ۱۱۹۵ متر در قسمت های شمالی حوضه است. اقلیم حوضه ی مورد مطالعه به روش دومارتن اصلاح شده، خشک سرد است. شکل شبکه زهکشی در حوضه عقدا شاخه درختی و شیب متوسط وزنی ۲۹/۷۴ درصد به دست آمد. کهن ترین سنگ های رخمون یافته در این حوضه آبخیز به سری دزو تعلق دارد و شامل کریستال های توف شیشه ای و گدازه های ریولیتی، ماسه سنگ، شیل، دولومیت و سنگ آهک تیره رنگ معروف به آهک عقدا است که از نظر سنی به کامبرین زیرین تعلق دارد. نهشته های پالئوژئیک میانی تا بالایی شامل ماسه سنگ های کوارتزی و شیل های سیلتی، ماسه سنگی و آهکی سازندهای زاگون و لالون و سنگ آهک هم ارز سازند میلا و ماسه سنگ های تیره و سنگ آهک متعلق به کربونیفر است. نهشته های دوران مزوزوئیک شامل سنگ آهک، ماسه سنگ و سنگ آهک هم ارز سازند نایبند، مارن و ماسه سنگ و سنگ آهک ژوراسیک و ماسه سنگ و سنگ آهک متعلق به کرتاسه است. نهشته های ترسیر در این منطقه دربرگیرنده ی گدازه ها و توف های داسیتی تیره رنگ انوسن، توده های گرانیتی و نهشته های آواری کم ژرفا و سنگ های آتشفشانی متعلق به میوسن است. همچنین آبرفت های کواترنری را در بخش های نسبتاً بلند منطقه می توان مشاهده کرد و نهشته های تبخیری و رسی را در بخش های ژرف تر.

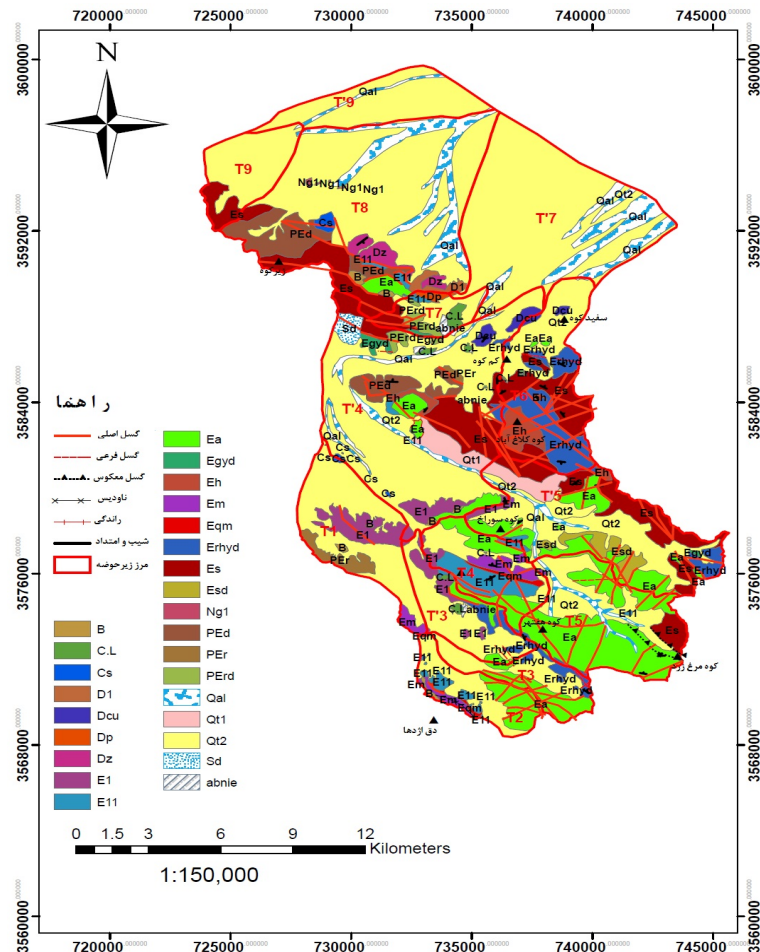
### ۳- مواد و روش

پژوهش حاضر از سه بخش اصلی تشکیل شده است:

#### ۳-۱- تهیه نقشه ی زمین شناسی و توپوگرافی حوضه عقدا و محاسبه ویژگی های ژئومورفولوژیک

در این بخش، نقشه ی زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ حوضه عقدا از سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شد. سپس سازندهای زمین شناسی حوضه ی مورد مطالعه، استخراج و میزان فرسایش پذیری سازندهای زمین شناسی در شرایط

اقلیمی خشک سرد بررسی شد؛ به همین منظور، از روش پسیاک برای برآورد وضعیت فرسایش و تولید رسوب در هر سازند استفاده شد (میرعلوی، ۲۰۰۹).



شکل ۲: نقشه‌ی زمین‌شناسی حوضه آبخیز عقدا

در ادامه، با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی رقومی با مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور به تعداد ۵ شیت، لایه‌های مورد نیاز از قبیل حوضه و زیرحوضه‌های عقدا و شبکه‌زهکشی آن حاصل شد. به منظور بررسی دقیق‌تر، این حوضه‌ی به ۹ زیرحوضه‌ی هیدرولوژیک (مستقل)، ۵ زیرحوضه‌ی غیرهیدرولوژیک (غیرمستقل) و ۴ زیرحوضه‌ی ترکیبی تقسیم شد (جدول ۱). برای حوضه‌ی مورد مطالعه نیز سه خروجی مستقل T8، TO3 و TO4 در نظر گرفته شد.

جدول ۱: مساحت حوضه و زیرحوضه های عقدا

| (ha) مساحت |        | زیر حوضه ها |     |
|------------|--------|-------------|-----|
| ۲۰۹۶/۲۸    | T1     | TO2         | TO3 |
| ۱۰۶۷/۹۶    | T2     |             |     |
| ۹۸۶/۳۹     | T3     |             |     |
| ۱۳۱۶/۵۸    | T3     |             |     |
| ۱۴۴۳/۶۰    | T4     |             |     |
| ۶۳۵۵/۲۰    | T'4    |             |     |
| ۲۷۲۵/۰۷    | T5     |             |     |
| ۳۶۴۰/۹۰    | T'5    |             |     |
| ۲۵۵۷/۸۷    | T6     |             |     |
| ۶۶۶/۰۷     | T7     |             |     |
| ۴۷۱۰/۳۲    | T'7    |             |     |
| ۶۶۹۴/۵۱    | T8     |             |     |
| ۱۲۰۱/۴۴    | T9     | TO4         |     |
| ۱۵۰۰/۸۶    | T'9    |             |     |
| ۳۶۹۶۳/۰۳   | جمع کل |             |     |

جدول ۲: سازندهای زمین‌شناسی حوضه آبخیز عقدا

| ردیف             | دوران      | دوره             | دور      | سازند | نماد                          | لیتولوژی                       | مساحت (ha) |
|------------------|------------|------------------|----------|-------|-------------------------------|--------------------------------|------------|
| ۱                | سنوزوئیک   | کواترنری         | پلیستوسن | -     | Cultivated                    | نهشته‌های آبرفتی جدید          | ۱۳۳/۶۴     |
| ۲                |            |                  |          | -     | abnie                         | نهشته‌های آبرفتی جدید          | ۶۶/۴۰      |
| ۳                |            |                  |          | -     | Qt2                           | پادگان‌های آبرفتی جوان         | ۲۰۰۴۳/۲۸   |
| ۴                |            |                  |          | -     | Qt1                           | پادگان‌های قدیمی               | ۵۱۹/۷۸     |
| ۵                |            |                  |          | -     | Qal                           | رسوبات جوان بستر رودخانه‌ها    | ۲۴۷۶/۶۰    |
| ۶                |            |                  |          | -     | Qsd                           | رسوبات جوان ماسه‌بادی          | ۱۳۲/۶۰     |
| ۷                |            | ترشیاری          | نئوژن    | -     | Ng1                           | ماسه‌سنگ و مارن ماسه‌ای        | ۱۴/۴۷      |
| ۸                | پالئوزوئیک | پرمین - کربونیفر |          | -     | Cs                            | شیل و ماسه‌سنگ                 | ۸۲/۸۴      |
| ۹                |            | کربونیفر - دونین | پیشین    | -     | DC <sup>u</sup>               | سنگ آهک دوباره تبلور یافته     | ۱۶۸/۶۳     |
| ۱۰               |            |                  | زیرکوه   |       | D <sub>z</sub>                | سنگ آهک زیرکوه                 | ۲۵۷/۳۸     |
| ۱۱               |            |                  | شیستو    |       | D <sub>l</sub>                | سنگ آهک، مارن، شیل             | ۱۱۰/۱۱     |
| ۱۲               |            |                  | پادها    |       | D <sub>p</sub>                | کوارتزیت، دولومیت              | ۴۷/۹۴      |
| ۱۳               |            | کامبرین          | میانی    |       | E <sub>m</sub>                | سنگ آهک، دولومیت، خاکستری تا   | ۳۴۸/۵۲     |
| ۱۴               |            |                  |          |       | E <sub>m</sub> <sup>q</sup>   | ماسه‌سنگ کوارتزین سفید         | ۹۰/۶۷      |
| ۱۵               |            |                  | لالون    |       | E <sub>l</sub> <sup>l</sup>   | ماسه‌سنگ و شیل قرمز            | ۶۶۷/۷۱     |
| ۱۶               |            |                  | زیرین    | -     | E <sub>l</sub>                | کامبرین پایینی تفکیک نشده      | ۸۵۹/۸۳     |
| ۱۷               |            |                  | عقدا     |       | E <sub>a</sub>                | سنگ آهک عقدا                   | ۴۰۱۷/۲۸    |
| ۱۸               |            |                  | سری      |       | E <sub>d</sub> <sup>s</sup>   | ماسه‌سنگ کوارتز آرنایتی تا     | ۲۶۱/۰۳     |
| ۱۹               |            |                  | دزو      |       | E <sub>h</sub>                | شیل‌های تیره تا خاکستری        | ۳۶۴/۸۹     |
| ۲۰               |            |                  |          |       | E <sub>d</sub> <sup>rhy</sup> | مجموعه‌ای از گدازه‌های تراکیتی | ۱۲۳۹/۱۷    |
| ۲۱               |            |                  |          | -     | B                             | سنگ درونی بازیگ                | ۱۰۶/۰۴     |
| ۲۲               |            |                  |          | -     | E <sub>d</sub> <sup>gy</sup>  | سنگ گچ                         | ۱۰۵/۷۷     |
| ۲۳               |            | کامبرین - ون‌دین | سلطانیه  |       | E <sub>s</sub>                | دولومیت با باندهای چرت         | ۳۴۲۵/۷۷    |
| ۲۴               |            | ون‌دین           | بالایی   | درین  | PE <sub>d</sub>               | دولومیت، شیل، ماسه سنگ         | ۱۰۲۳/۰۸    |
| ۲۵               |            |                  |          |       | PE <sub>rd</sub>              | توف ریولیتی، دولومیت           | ۱۷۳/۶۴     |
| ۲۶               |            |                  |          |       | PE <sub>r</sub>               | ریولیت                         | ۲۲۵/۹۷     |
| کل حوضه ۳۶۹۶۳/۰۳ |            |                  |          |       |                               |                                |            |

در پژوهش حاضر، تعداد ۱۸ پارامتر ژئومورفولوژی شامل مساحت، مجموع طول آبراهه، تراکم زهکشی، نسبت انشعاب، نسبت طولی آبراهه، زمان تمرکز، طول آبراهه‌ی اصلی، ضریب فرم، فشردگی، گردی و کشیدگی، شیب،

ارتفاع، طول حوضه، فراوانی آبراهه، تعداد آبراهه، فرسایش پذیری واحدهای زمین شناسی و مساحت فرسایش پذیر این واحدها محاسبه و بررسی شد (جدول ۳).

جدول ۳: شاخص های ژئومورفولوژیک حوضه ی عقدا

| منابع                   | شاخص      | نحوه ی محاسبه                                            | ویژگی ژئومورفولوژیک                                                                                               |
|-------------------------|-----------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Horton, 1932            | Dd        | $Dd = \sum Li/A$                                         | Dd تراکم زهکشی، Li طول آبراهه ها، A مساحت حوضه                                                                    |
| Schumms, 1956           | RB        | $RB = \sum Ni/N_{i+1}$                                   | RB نسبت انشعاب، Ni تعداد آبراهه رتبه i                                                                            |
| Horton, 1945            | RI        | $RI = \sum Li/L_{i+1}$                                   | RI نسبت طولی آبراهه، Li طول آبراهه رتبه i                                                                         |
| Wang, 2005              | TC        | $TC = \frac{L}{1.5D} \left( \frac{A^r}{F} \right)^{0.2}$ | TC زمان تمرکز به روش برانسبی- ویلیامز، L طول آبراهه اصلی، F شیب آبراهه اصلی، D قطر دایره معادل هم سطح با حوضه     |
| Sharma and Tiwari, 2009 | FF        | $FF = A/L_w^r$                                           | F.F ضریب فرم، L <sub>w</sub> طول حوضه                                                                             |
| Schumm, 1956            | CC        | $CC = 0.282P/\sqrt{A}$                                   | CC ضریب فشردگی، P محیط حوضه                                                                                       |
| Miller, 1953            | RC        | $RC = 12.566A/P^2$                                       | RC ضریب گردی                                                                                                      |
| Schumm, 1956            | E         | $E = r\sqrt{A/\pi}/L_w$                                  | E ضریب کشیدگی                                                                                                     |
| Horton, 1932            | S         | $S = H_{max} - H_{min}/\sqrt{A}$                         | شیب                                                                                                               |
| Horton, 1932            | $\bar{H}$ | $\bar{H} = \sum_{i=1}^n H_i A_i / A$                     | $\bar{H}$ ارتفاع متوسط وزنی حوضه، A <sub>i</sub> مساحت بین دو خط تراز، H <sub>i</sub> متوسط ارتفاع بین دو خط تراز |
| Horton, 1932            | Fs        | $Fs = \sum N/A$                                          | Fs فراوانی آبراهه، N تعداد کل آبراهه های هر بخش مشتمل بر همه رتبه ها                                              |

## ۲-۳- بعد فراکتال

مرحله ی دوم پژوهش، محاسبه ی بعد فراکتال شبکه زهکشی و حوضه ی عقدا به روش شمارش جعبه است. روش شمارش جعبه ای معروف ترین روش محاسبه ی بعد فراکتال است؛ چرا که از این روش می توان برای محاسبه ی بعد فراکتالی تمامی عناصر، ابعاد و اشکال مختلف استفاده کرد و سرعت محاسبات آن بیش از سایر روش ها است. علاوه بر این، الگوریتم آن از قابلیت استخراج نتایجی با اطمینان بالا برخوردار است (علمی زاده و همکاران، ۲۰۱۳). در این روش، شبکه ای از خانه های مربع شکل بر تصویر مورد نظر قرار داده می شود. اندازه ی شبکه با (ε) مشخص می شود که معیاری از مقیاس است. تعداد مربع هایی که هر قسمت از منحنی مورد نظر را پوشش می دهد، محاسبه می شود. این کار برای مربع های با اضلاع مختلف نیز تکرار می شود (به صورت مجازی ضخامت خطوط شبکه صفر در نظر گرفته می شود). حد نهایی این قسمت، زمانی است که ε به صفر میل می کند. شمارش و حاصل این شمارش Nε تعداد مربع ها خواهد بود.

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log(N\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)} \quad \text{رابطه ی (۱)}$$

مرحله ی بعد، ترسیم مقادیر log(Nε) در مقابل log(1/ε) است. شیب خط مستقیم که اطلاعات را به بهترین وجه به نمایش می گذارد، تقریباً برابر با بعد فراکتال است؛ بنابراین برای محاسبه ی بعد فراکتال، لازم است نمودار غیرخطی آن

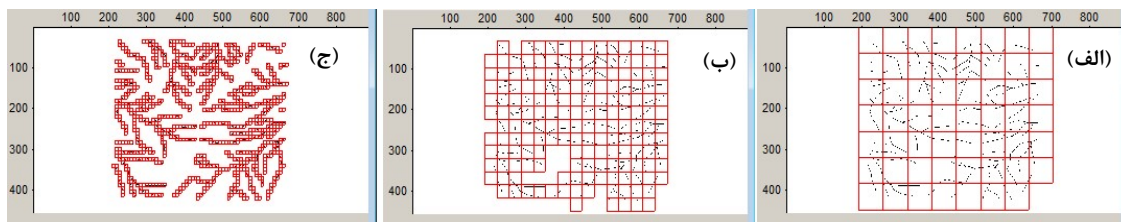
ترسیم شود. در این نمودار، محور  $x$  ها اندازه‌ی شبکه و محور  $y$  ها بیانگر نقاط موجود در هر مربع است. سپس این نمودار، با منحنی نظریه‌ی فراکتال برازش داده می‌شود تا همبستگی میان دو نمودار حاصل شود. طی این کار، همبستگی بین تعداد و اندازه‌ی شبکه نشان داده می‌شود.

$$N = \varepsilon D + c \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

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

### ۳-۳- تحلیل همبستگی

در بخش پایانی پژوهش، ضریب همبستگی بین مقادیر بعد فرکتال حوضه و شبکه‌زهکشی با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه محاسبه شد و مقایسه بین این عوامل در هر یک از زیرحوضه‌های حوضه عقدا صورت گرفت.



شکل ۳: نحوه‌ی محاسبه‌ی بعد فرکتال شبکه‌زهکشی بر روی سازند کهر با تغییر مقیاس،

(الف) اندازه جعبه ۸، (ب) اندازه جعبه ۱۶ و (ج) اندازه جعبه ۳۲

### ۴- یافته‌ها (نتایج)

#### ۴-۱- ویژگی‌های ژئومورفولوژیک

به منظور استخراج ۱۸ پارامتر ژئومورفولوژیک، ابتدا محدوده‌ی حوضه‌ی عقدا و زیرحوضه‌های آن تعیین و پارامترهای مساحت  $A$ ، طول حوضه  $L_w$ ، ضریب فرم  $F.F$ ، ضریب گردی  $RC$ ، ضریب فشردگی  $CC$  و ضریب کشیدگی  $E$  محاسبه شد. سپس با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، پارامترهایی نظیر ارتفاع  $H$  و شیب  $S$  به دست آمد. در نهایت، نقشه‌ی شبکه‌زهکشی حوضه استخراج شد و رتبه‌بندی به روش استرالر صورت گرفت. با استفاده از نقشه‌ی شبکه‌زهکشی استخراجی، پارامترهای طول آبراهه اصلی  $L$ ، مجموع طول آبراهه  $\sum L$ ، تراکم زهکشی  $Dd$ ، نسبت انشعاب  $RB$ ، نسبت طولی رودخانه  $RI$ ، زمان تمرکز  $TC$ ، تعداد آبراهه  $N_i$  و فراوانی آبراهه  $FS$  برآورد شد (جدول ۴). تمام محاسبات مربوط به برآورد پارامترهای ژئومورفولوژیک در محیط ArcGIS 10.3 انجام شده‌است. بر اساس نتایج به دست آمده از بررسی پارامترهای ژئومورفولوژیک حوضه‌ی مورد مطالعه، بیشترین مساحت مربوط به زیرحوضه‌ی  $T8$  و  $TO3$  است. مساحت حوضه آبخیز، مهم‌ترین پارامتر فیزیکی حوضه است که دبی حداکثر و شکل حوضه به آن بستگی دارد. طول حوضه عبارت است از طول خطی که نقطه خروجی حوضه را با خطی مستقیم به دورترین نقطه‌ی مرکز حوضه وصل می‌کند. بیشترین طول حوضه در زیرحوضه‌ی  $T8$  و  $TO3$  و کمترین مقدار در

زیرحوضه‌ی T7 دیده می‌شود. شیب حوضه در زیرحوضه‌های حوضه‌ی عقدا، بین ۸ تا ۵۰ درصد متغیر است و کمترین آن در زیرحوضه‌ی T1 و TO4 و بیشترین مقدار شیب در زیرحوضه‌ی T5 مشاهده می‌شود. ارتفاع زیرحوضه‌های مورد مطالعه از ۱۳۱۷/۱ تا ۲۱۷۶/۴ متفاوت است.

جدول ۴: پارامترهای ژئومورفولوژیک حوضه‌آبخیز عقدا

| sub | A     | $\sum L$ | $\sum N$ | Dd  | RB  | RI  | TC   | L    | FF  | CC  | RC  | E   | S    | H      | Lw   | Fs   |
|-----|-------|----------|----------|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|------|--------|------|------|
| T1  | ۲۱    | ۱۰۶/۱    | ۲۷۱      | ۵/۱ | ۳/۸ | ۲   | ۴/۷  | ۱۲/۳ | ۰/۲ | ۱/۵ | ۰/۵ | ۰/۵ | ۱۳/۴ | ۱۶۳۸/۷ | ۱۰/۱ | ۱۲/۹ |
| T2  | ۱۰/۷  | ۶۹/۸     | ۱۹۲      | ۶/۵ | ۵/۷ | ۲/۱ | ۲/۷  | ۷/۴  | ۰/۳ | ۱/۴ | ۰/۵ | ۰/۶ | ۲۷/۶ | ۱۹۷۴/۳ | ۶/۴  | ۱۸   |
| T3  | ۹/۹   | ۶۶/۸     | ۱۷۶      | ۶/۸ | ۵/۳ | ۳/۱ | ۲/۷  | ۷/۹  | ۰/۲ | ۱/۷ | ۰/۴ | ۰/۵ | ۳۷/۱ | ۲۱۳۰   | ۷/۷  | ۱۷/۸ |
| T4  | ۱۴/۴  | ۱۲۱      | ۳۷۲      | ۸/۴ | ۴/۳ | ۲/۳ | ۳/۳  | ۹/۷  | ۰/۴ | ۱/۳ | ۰/۶ | ۰/۷ | ۳۵/۸ | ۱۸۳۶/۵ | ۶    | ۲۵/۸ |
| T5  | ۲۷/۳  | ۲۰۴/۴    | ۶۰۶      | ۷/۵ | ۳   | ۲/۶ | ۲/۶  | ۸/۵  | ۰/۴ | ۱/۳ | ۰/۶ | ۰/۸ | ۴۹/۹ | ۲۱۷۶/۴ | ۷/۹  | ۲۲/۲ |
| T6  | ۲۵/۶  | ۲۰۳/۷    | ۵۷۱      | ۸   | ۳/۴ | ۶/۵ | ۴/۳  | ۱۳   | ۰/۳ | ۱/۴ | ۰/۵ | ۰/۶ | ۳۳/۴ | ۱۵۶۶/۶ | ۹    | ۲۲/۳ |
| T7  | ۶/۷   | ۵۰/۴     | ۱۲۶      | ۷/۶ | ۳/۲ | ۲/۴ | ۲/۱  | ۵/۶  | ۰/۳ | ۱/۳ | ۰/۶ | ۰/۶ | ۲۱/۵ | ۱۴۳۵/۲ | ۵/۲  | ۱۸/۹ |
| T8  | ۶۷    | ۴۷۲/۷    | ۸۱۲      | ۷/۱ | ۳/۷ | ۴/۴ | ۴/۷  | ۱۴/۳ | ۰/۴ | ۱/۳ | ۰/۶ | ۰/۷ | ۱۷/۳ | ۱۳۷۴/۸ | ۱۲/۹ | ۱۲/۱ |
| T9  | ۱۲    | ۷۹/۷     | ۱۳۰      | ۶/۶ | ۵   | ۲/۳ | ۲/۴  | ۶/۶  | ۰/۳ | ۱/۲ | ۰/۷ | ۰/۶ | ۱۷/۲ | ۱۴۰۱/۲ | ۶/۱  | ۱۰/۸ |
| TO1 | ۳۳/۷  | ۲۳۰/۸    | ۵۹۰      | ۶/۹ | ۵/۴ | ۲/۳ | ۴/۳  | ۱۳/۲ | ۰/۳ | ۱/۵ | ۰/۵ | ۰/۶ | ۳۱/۱ | ۱۹۸۸   | ۱۱/۲ | ۱۷/۵ |
| TO2 | ۱۹۶/۳ | ۱۲۹۴/۳   | ۳۲۷۱     | ۶/۶ | ۴   | ۲/۷ | ۹/۹  | ۳۲/۷ | ۰/۴ | ۱/۶ | ۰/۴ | ۰/۷ | ۲۲/۸ | ۱۸۲۱/۷ | ۲۲/۸ | ۱۶/۷ |
| TO3 | ۲۵۷/۷ | ۱۷۶۴/۸   | ۴۰۶۹     | ۶/۴ | ۳/۵ | ۲/۲ | ۱۱/۶ | ۳۹/۲ | ۰/۳ | ۱/۶ | ۰/۴ | ۰/۶ | ۲۵   | ۱۶۹۳/۳ | ۲۹/۲ | ۱۴/۸ |
| TO4 | ۲۷    | ۱۷۲/۸    | ۲۱۳      | ۶/۴ | ۳/۸ | ۲/۴ | ۵/۱  | ۱۳/۳ | ۰/۲ | ۱/۸ | ۰/۳ | ۰/۵ | ۸/۲  | ۱۳۱۷/۱ | ۱۲/۲ | ۷/۹  |

برای بیان شکل حوضه و مقایسه بین حوضه‌های آبخیز مختلف از شاخص‌هایی مانند ضریب فرم حوضه، گردی، کشیدگی و فشردگی استفاده شد. ضرایب شکل معمولاً بین صفر تا یک متغیر است؛ هر چه ضرایب شکل به یک نزدیک‌تر باشد، حوضه گردتر است و هر چه به صفر متمایل شود، حوضه کشیده‌تر. هر چه حوضه گردتر باشد، زمان تمرکز در آن کمتر و در نتیجه شدت رواناب حاصل شده بیشتر خواهد بود. با توجه به نتایج به دست آمده، زیرحوضه‌های T1، T3 و TO4 بیشترین کشیدگی را دارند و سایر زیرحوضه‌ها نسبتاً کشیده هستند. زمان تمرکز، مدت زمانی است که آب لازم دارد تا از دورترین نقطه‌ی حوضه به نقطه‌ی خروجی آن برسد. مقدار زمان تمرکز، به طول آبراهه‌ی اصلی و شرایط هیدرولیکی مسیر جریان مانند ضریب زبری و شعاع هیدرولیکی بستگی دارد. روابط زیادی برای محاسبه‌ی زمان تمرکز ارائه شده که بیشتر آنها بر اساس دو عامل طول آبراهه‌ی اصلی و شیب است. با توجه به شکل حوضه در بررسی‌های انجام شده، از زمان تمرکز برانسی و ویلیامز استفاده شد. زمان تمرکز در حوضه عقدا از ۲/۱ تا ۱۱/۵۹ متغیر است؛ به طوری که بیشترین مقدار زمان تمرکز در زیرحوضه T8 و TO3 و کمترین زمان تمرکز در زیرحوضه‌ی T7 به دست آمد. طول آبراهه، یکی از ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه‌آبخیز محسوب می‌شود. بیشترین طول آبراهه اصلی، تعداد آبراهه و مجموع طول آبراهه مربوط به زیرحوضه‌ی T8 و TO3 و کمترین آن متعلق به زیرحوضه‌ی T7 است. افزایش تعداد آبراهه و طول آن در حوضه‌آبخیز، بیانگر افزایش فرسایش است. مقادیر فراوانی آبراهه Fs، ارتباط بین آبراهه‌ها و وضعیت زمین‌شناسی منطقه را نشان می‌دهد. مقدار فراوانی آبراهه در حوضه عقدا، از ۲۵/۸ تا ۷/۹ تفاوت دارد. طول و تعداد آبراهه‌ها با رتبه‌های متفاوت در جدول ۵ نشان داده شده‌است.

جدول ۵: تعداد و طول رتبه‌های مختلف آبراهه در حوضه آبخیز عقدا

| واحد هیدرولوژیک | مشخصات   | درجه آبراهه |        |        |        |       |       |       |
|-----------------|----------|-------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
|                 |          | ۱           | ۲      | ۳      | ۴      | ۵     | ۶     | ۷     |
| T1              | تعداد    | ۱۹۸         | ۵۲     | ۱۶     | ۴      | ۱     | ۰     | ۰     |
|                 | طول (km) | ۵۴/۵۳       | ۲۵/۴   | ۱۰/۳۱  | ۱۱/۳۳  | ۴/۵۶  | ۰     | ۰     |
| T2              | تعداد    | ۱۴۲         | ۲۷     | ۲۱     | ۲      | ۰     | ۰     | ۰     |
|                 | طول (km) | ۳۹/۸۹       | ۱۵/۹۵  | ۹/۶    | ۴/۴    | ۰     | ۰     | ۰     |
| T3              | تعداد    | ۱۳۵         | ۳۳     | ۷      | ۱      | ۰     | ۰     | ۰     |
|                 | طول (km) | ۴۴/۶        | ۱۳/۰۵  | ۲/۳۱   | ۶/۸۲   | ۰     | ۰     | ۰     |
| T4              | تعداد    | ۲۷۸         | ۶۳     | ۲۴     | ۶      | ۱     | ۰     | ۰     |
|                 | طول (km) | ۷۵/۷۲       | ۲۳/۰۴  | ۱۳/۸۱  | ۴/۰۲   | ۴/۴۴  | ۰     | ۰     |
| T5              | تعداد    | ۴۵۱         | ۱۱۳    | ۲۸     | ۸      | ۳     | ۳     | ۰     |
|                 | طول (km) | ۱۳۲/۰۸      | ۳۵/۳۱  | ۲۲/۴۹  | ۹/۱۶   | ۳/۸۷  | ۱/۴۴  | ۰     |
| T6              | تعداد    | ۴۲۵         | ۱۰۹    | ۲۶     | ۷      | ۳     | ۱     | ۰     |
|                 | طول (km) | ۱۲۶/۲۳      | ۳۳/۹۴  | ۲۰/۶۹  | ۹/۶۴   | ۱۲/۶۲ | ۰/۵۲  | ۰     |
| T7              | تعداد    | ۹۴          | ۲۳     | ۶      | ۲      | ۱     | ۰     | ۰     |
|                 | طول (km) | ۳۱/۱۹       | ۱۱/۱۲  | ۲/۷۹   | ۳/۴۹   | ۱/۸۴  | ۰     | ۰     |
| T8              | تعداد    | ۶۲۷         | ۱۳۵    | ۳۷     | ۹      | ۳     | ۱     | ۰     |
|                 | طول (km) | ۲۸۳/۳۵      | ۷۰/۹   | ۵۷/۱۸  | ۳۸/۷۲  | ۲۰/۹۹ | ۱/۵۴  | ۰     |
| T9              | تعداد    | ۹۷          | ۲۴     | ۸      | ۱      | ۰     | ۰     | ۰     |
|                 | طول (km) | ۴۹/۳۷       | ۱۳/۸۹  | ۱۱/۲۴  | ۵/۱۵   | ۰     | ۰     | ۰     |
| TO1             | تعداد    | ۴۳۶         | ۱۰۰    | ۴۲     | ۱۱     | ۱     | ۰     | ۰     |
|                 | طول (km) | ۱۳۳/۵۷      | ۵۲/۷۱  | ۲۲/۶۸  | ۱۶/۵۵  | ۵/۲۸  | ۰     | ۰     |
| TO2             | تعداد    | ۲۴۳۰        | ۵۹۱    | ۱۸۱    | ۴۸     | ۱۳    | ۷     | ۱     |
|                 | طول (km) | ۷۷۱/۳۶      | ۲۵۴/۸  | ۱۳۰/۴۷ | ۷۴/۷۵  | ۲۵/۵۸ | ۳۱/۵  | ۵/۷۸  |
| TO3             | تعداد    | ۳۰۲۲        | ۷۳۹    | ۲۲۱    | ۵۸     | ۱۸    | ۹     | ۲     |
|                 | طول (km) | ۱۰۷۰/۸۵     | ۳۴۰/۷۶ | ۱۶۷/۱۸ | ۹۰/۱۴  | ۴۷/۱۴ | ۳۶/۴۸ | ۱۲/۲۶ |
| TO4             | تعداد    | ۱۶۲         | ۳۸     | ۱۰     | ۳      | ۰     | ۰     | ۰     |
|                 | طول (km) | ۱۱۶/۱۳      | ۳۱/۷۴  | ۱۳/۰۷  | ۱۱/۸۱  | ۰     | ۰     | ۰     |
| Ttotal          | تعداد    | ۳۸۱۱        | ۹۱۲    | ۲۶۸    | ۷۰     | ۲۱    | ۱۰    | ۲     |
|                 | طول (km) | ۱۴۷۰/۳۳     | ۴۴۳/۴  | ۲۳۷/۴۳ | ۱۴۰/۶۷ | ۶۸/۱۳ | ۳۸/۰۲ | ۱۲/۲۶ |

با توجه به نتایج مشخص می‌شود که آبراهه‌های رتبه اول نسبت به سایر رتبه‌ها، در مجموع طول بیشتری از حوضه را در برمی‌گیرند. رتبه‌ی ۷، آخرین رتبه آبراهه‌ی مشاهده شده در منطقه‌ی مورد مطالعه است (زیرحوضه‌های ترکیبی

TO2 و TO3) از زیرحوضه‌های منطقه‌ی عقدا، تعداد ۳ زیرحوضه تا رتبه ۶ را دارا هستند (T8، T6، T5)، ۴ زیرحوضه تا رتبه‌ی ۵ (TO1، T7، T1 و T4) و در زیرحوضه‌های T2، T3، T9 و زیرحوضه ترکیبی TO4، آخرین رتبه آبراهه، ۴ مشاهده می‌شود. این نتایج به دست آمده می‌تواند از تغییرات شیب، توپوگرافی و زمین‌شناسی منطقه سرچشمه گرفته باشد. میزان نسبت انشعاب براه RB در منطقه‌ی مورد مطالعه، بین ۳/۰۴ تا ۵/۶۸ به دست آمد که نسبت آن در هر رتبه از آبراهه نسبت به رتبه‌ی بعدی بیشتر است. درباره‌ی وضعیت پارامتر نسبت طولی آبراهه RI، بیشترین و کمترین مقدار آن به ترتیب ۶/۵۱ و ۲ در زیرحوضه‌های T6 و T1 است. از تراکم زهکشی به عنوان شاخصی برای بیان وضعیت آبراهه‌ها حوضه، بارندگی، رواناب، ظرفیت نفوذپذیری، تکامل توپوگرافی و فرسایش حوضه استفاده می‌شود. اعداد بالای تراکم زهکشی، مقاومت ضعیف و نفوذپذیری اندک حوضه را نشان می‌دهد و در مقابل، مقدار کم تراکم بیانگر مقاومت به فرسایش و نفوذپذیری خوب حوضه آبخیز است (محمدی، ۲۰۱۶ & Shi et al, 2014). مقادیر تراکم زهکشی در حوضه عقدا بین ۵/۰۶ تا ۸/۳۸ متغیر است. ویژگی‌های سنگ‌شناسی در حوضه‌های آبخیز، از عوامل کنترل‌کننده‌ی فرسایش به شمار می‌رود. با تعیین مقاومت سنگ‌ها و سازندها می‌توان منطقه‌های مختلف را از نظر حساسیت به فرسایش به گونه‌ای مناسب طبقه‌بندی کرد. به منظور برآورد پتانسیل فرسایش‌پذیری واحدهای زمین‌شناسی حوضه‌ی عقدا به روش پسیاک، ابتدا سازندهای زمین‌شناسی حوضه‌ی مورد مطالعه از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ استخراج شد که این نقشه با بازدیدهای میدانی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google earth، به صورت دقیق‌تر و واقعی‌تر تهیه شد (جدول ۲). در حوضه‌ی مورد مطالعه، بخش‌های مرتفع حوضه بیشتر منطبق بر آهک عقدا، دولومیت سلطانیه، همچنین ماسه‌سنگ سازند لالون و برخی واحدهای آذرین است که باتوجه به این نوع سازندها، فرسایش‌های متنوع با شدت‌های مختلف در حوضه قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به امتیازدهی روش پسیاک، مقادیر فرسایش‌پذیری واحدها در زیرحوضه‌های حوضه عقدا حاصل شد (جدول ۶).

جدول ۶: اولویت‌بندی حوضه و زیرحوضه‌های عقدا از نظر حساسیت واحدهای زمین‌شناسی به فرسایش

| اولویت‌بندی | فرسایش‌پذیری واحدها | مساحت (Km <sup>2</sup> ) | نمره پسیاک | زیرحوضه‌ها |
|-------------|---------------------|--------------------------|------------|------------|
| ۲           | ۱۵۶/۳               | ۲۰/۹۶                    | ۷/۵        | T1         |
| ۷           | ۶۵/۲                | ۱۰/۶۸                    | ۶/۱        | T2         |
| ۸           | ۵۴/۸                | ۹/۸۶                     | ۵/۶        | T3         |
| ۶           | ۸۳/۵                | ۱۴/۴۴                    | ۵/۸        | T4         |
| ۴           | ۱۲۱/۵               | ۲۷/۲۵                    | ۴/۵        | T5         |
| ۳           | ۱۴۵/۱۱              | ۲۵/۵۸                    | ۵/۷        | T6         |
| ۹           | ۴۹/۵                | ۶/۶۶                     | ۷/۴        | T7         |
| ۱           | ۵۲۶/۹               | ۶۶/۹۵                    | ۷/۹        | T8         |
| ۵           | ۹۷/۶۲               | ۱۲/۰۱                    | ۸/۱        | T9         |
| ۴           | ۲۱۳/۳               | ۳۳/۷۱                    | ۶/۳        | TO1        |
| ۲           | ۱۲۵۶/۵              | ۱۹۶/۳۲                   | ۶/۴        | TO2        |
| ۱           | ۱۸۹۲/۸۱             | ۲۷۵/۶۶                   | ۶/۹        | TO3        |
| ۳           | ۲۳۳/۷               | ۲۷/۰۲                    | ۸/۶        | TO4        |

مقدار عددی پسیاک به دست آمده در حوضه عقدا، از ۴/۵ در زیرحوضه T5 تا ۸/۶ در حوضه ترکیبی TO4 متفاوت است. با در نظر گرفتن مساحت هر زیرحوضه، مساحت فرسایش‌پذیر در حوضه‌ی مورد مطالعه برآورد شد.

بیشترین میزان فرسایش در واحدهای مستقل مربوط به واحدهای T1، T8 و T6 و در واحدهای ترکیبی مربوط به زیر حوضه ی TO3 است. بالا بودن پارامترهای ژئومورفولوژیکی مانند مساحت، طول حوضه، تعداد و طول آبراهه‌ها و نمره فرسایش‌پذیری پسیاک، گویای بالا بودن میزان فرسایش در این زیرحوضه‌ها است. در واقع، این زیرحوضه‌ها اولویت بالاتری دارند و نسبت به سایر زیرحوضه‌ها، نیازمند مدیریت بیشتر هستند.

## ۲-۴- بعد فراکتال شبکه‌زهکشی و شکل حوضه

هندسه فراکتال با چهارچوبی متمایز از هندسه اقلیدسی و با مدلی برگرفته از طبیعت با استفاده از توابع تکرارپذیر و دور پذیر، برای توجیه روندهای طبیعی از جمله حوضه آبخیز به کار گرفته می‌شود. با توجه به ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و توپوگرافی منطقه، حوضه‌ها خواص فراکتالی از خود نشان می‌دهند که این خواص در خصوصیات آنها کدگذاری شده‌است. بعد فراکتال حوضه و شبکه‌زهکشی، با روش شمارش جعبه در حوضه آبخیز عقدا محاسبه شد. نتایج نشان داد که در بین زیرحوضه‌های مستقل، زیرحوضه ی T8 با بعد فراکتال ۱/۴۷ و در میان زیرحوضه‌های تجمعی، زیرحوضه ی TO3 با بعد فراکتال ۱/۶ دارای بیشترین بعد فراکتال شبکه زهکشی هستند و بیشترین بعد فراکتال شکل حوضه را نیز به ترتیب با مقادیر ۱/۰۵ و ۱/۰۸ به خود اختصاص می‌دهند.

جدول ۷: مقادیر بعد فراکتال شبکه‌زهکشی و حوضه در حوضه عقدا

| زیرحوضه                | T1   | T2   | T3   | T4   | T5   | T6   | T7   | T8   | T9   | TO1  | TO2  | TO3  | TO4  |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| بعد فراکتال شبکه‌زهکشی | ۱/۲۲ | ۱/۲۱ | ۱/۱۵ | ۱/۲۷ | ۱/۳۳ | ۱/۳۲ | ۱/۱۲ | ۱/۴۷ | ۱/۲۴ | ۱/۳۳ | ۱/۵۳ | ۱/۶  | ۱/۲۹ |
| بعد فراکتال شکل حوضه   | ۰/۹۵ | ۰/۹۵ | ۰/۹۷ | ۰/۹۵ | ۱/۰۳ | ۱    | ۰/۹  | ۱/۰۸ | ۰/۹  | ۱    | ۱/۰۳ | ۱/۰۵ | ۰/۹۱ |

دلیل بالا بودن میزان بعد فراکتال در زیرحوضه‌های T8 و TO3، فرسایش‌پذیری بالای این دو زیرحوضه و بالاترین مقادیر طول آبراهه اصلی، مجموع طول و تعداد آبراهه، مساحت و طول حوضه در این زیرحوضه‌ها است که به تشکیل شبکه آبراهه‌ی متراکم با شاخه‌های متعدد منجر شده‌است. در مقابل، کمترین مقدار بعد فراکتال در زیرحوضه‌های T7 مشاهده می‌شود. مقدار پایین بعد فراکتال در این زیرحوضه، از مقاومت به فرسایش و پایین بودن مقادیر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی چون مجموع طول آبراهه، تعداد آبراهه، مساحت، طول حوضه نسبت به سایر زیرحوضه‌های حوضه عقدا سرچشمه می‌گیرد. با اولویت‌بندی مقادیر بعد فراکتال و مقایسه‌ی آن با اولویت‌های به دست آمده از مقادیر مساحت فرسایش‌پذیر منطقه‌ی عقدا، بیشترین بعد فراکتال به دو زیرحوضه ی T8 و TO3 بازمی‌گردد و مقادیر بعد فراکتال شبکه‌زهکشی با اولویت‌بندی تمام زیرحوضه‌ها منطبق است به جز سه زیرحوضه ی T5، T4 و T1. فقدان انطباق زیرحوضه‌های مورد نظر را نیز می‌توان با تأثیر عامل زمین‌شناسی بر بعد فراکتال شبکه‌زهکشی توضیح داد؛ در زیرحوضه‌های T4 و T5 برخلاف سایر زیرحوضه‌ها، سهم سازندهای زمین‌شناسی دوران پالئوزوئیک (سازند لالون و سنگ آهک عقدا) نسبت به دوران سنوزوئیک (رسوبات آبرفتی عهد حاضر) بیشتر است؛ به همین دلیل شبکه آبراهه‌ی به وجود آمده نسبت به سایر زیرحوضه‌ها - که بخش عمده‌ی آنها در رسوبات آبرفتی عهد حاضر

قرار دارد - ناهمگن است و این ناهمگنی به خوبی در مقادیر بعد فراکتال مشاهده می‌شود. فقدان انطباق مقدار بعد فراکتال با اولویت‌بندی زیرحوضه در زیرحوضه T1 را نیز می‌توان به اثر متقابل پارامترهای ژئومورفولوژیکی چون شکل حوضه، زمان تمرکز و شیب نسبت داد. با توجه به اثر متقابل این عوامل و بازدهی‌های میدانی، زیرحوضه T1 از نظر مدیریتی و اقدامات آبخیزداری در رتبه دوم از نظر وضعیت فرسایشی قرار دارد؛ بنابراین، مقادیر بعد فراکتال شبکه زهکشی و حوضه به ترتیب با احتمال ۷۰ و ۳۰ درصد می‌تواند برآورد سریع و دقیقی را از وضعیت فرسایشی منطقه ارائه دهد.

### ۳-۴- نتایج تحلیل همبستگی

در ادامه، ماتریس همبستگی پارامترهای ژئومورفولوژیکی حوضه عقدا به دست آمد که در آن، ارتباط بین پارامترها و بعد فراکتال شبکه زهکشی و حوضه بررسی شد. با توجه به این ماتریس به ترتیب پارامترهای مجموع طول آبراهه (۰/۹۸)، مساحت (۰/۹۷)، مساحت فرسایش‌پذیر حوضه (۰/۹۵)، مجموع تعداد آبراهه (۰/۹۴)، طول آبراهه اصلی (۰/۹)، طول حوضه (۰/۸۸) و زمان تمرکز (۰/۸۶) با بعد فراکتال شبکه زهکشی در سطح اعتماد ۰/۹۹ همبستگی دارد که تأثیرپذیری بعد فراکتال را از این ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی منطقه نشان می‌دهد.

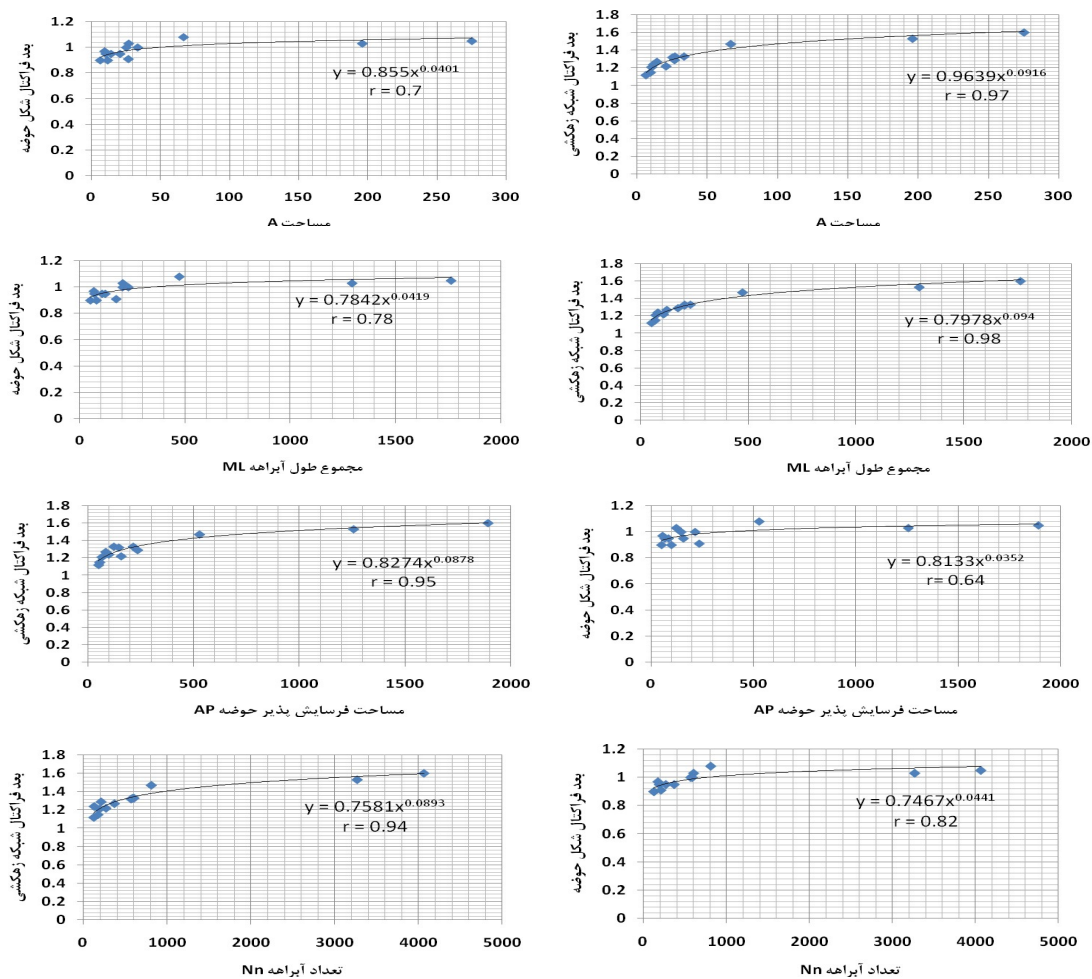
جدول ۸: مقادیر ماتریس همبستگی بعد فراکتال و پارامترهای ژئومورفولوژیک حوضه‌ی عقدا

|    | A | ΣL   | TC   | LS   | FF  | CC          | RC         | E           | S           | H          | LW          | FS         | P           | AP          | NN          | NL          | DS   | DW   |      |
|----|---|------|------|------|-----|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|------|------|
| A  | ۱ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۰/۹  | ۰/۳ | ۰/۳         | ۰/۳        | -۰/۴        | ۰/۳         | -۰/۵       | ۰/۱         | ۰/۹۹       | -۰/۲        | ۰/۱         | ۰/۹۹        | ۰/۹۹        | ۰/۹۹ | ۰/۹  | ۰/۷  |
| ΣL |   | ۱    | ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۰/۳ | ۰/۳         | ۰/۳        | -۰/۴        | ۰/۳         | -۰/۵       | ۰/۱         | ۰/۹۹       | -۰/۱        | ۰/۰         | ۰/۹۹        | ۰/۹۹        | ۰/۹۹ | ۰/۹  | ۰/۸  |
| TC |   |      | ۱    | ۰/۹۹ | ۰/۲ | ۰/۵         | -۰/۵       | ۰/۲         | -۰/۶        | -۰/۱       | ۰/۹۹        | -۰/۲       | ۰/۱         | ۰/۹۹        | ۰/۹۹        | ۰/۹۹        | ۰/۹۹ | ۰/۹  | ۰/۶  |
| LS |   |      |      | ۱    | ۰/۲ | ۰/۴         | -۰/۵       | ۰/۲         | <u>-۰/۶</u> | ۰/۰        | ۰/۹۹        | -۰/۲       | ۰/۱         | ۰/۹۹        | ۰/۹۹        | ۰/۹۹        | ۰/۹۹ | ۰/۹  | ۰/۶  |
| FF |   |      |      |      | ۱   | <u>-۰/۶</u> | <u>۰/۶</u> | ۰/۹۹        | -۰/۱        | ۰/۱        | ۰/۲         | ۰/۴        | -۰/۴        | ۰/۳         | ۰/۳         | ۰/۳         | ۰/۳  | ۰/۵  | ۰/۶  |
| CC |   |      |      |      |     | ۱           | -۰/۱       | <u>-۰/۶</u> | ۰/۰         | ۰/۱        | ۰/۵         | -۰/۳       | ۰/۱         | ۰/۴         | ۰/۳         | ۰/۳         | ۰/۳  | ۰/۲  | ۰/۱  |
| RC |   |      |      |      |     |             | ۱          | ۰/۶         | ۰/۱         | -۰/۲       | -۰/۵        | ۰/۲        | ۰/۰         | -۰/۴        | -۰/۴        | -۰/۴        | -    | ۰/۲  | -۰/۱ |
| E  |   |      |      |      |     |             |            | ۱           | -۰/۲        | ۰/۱        | ۰/۲         | ۰/۴        | -۰/۳        | ۰/۳         | ۰/۳         | ۰/۳         | ۰/۳  | ۰/۵  | ۰/۶  |
| S  |   |      |      |      |     |             |            |             | ۱           | <u>۰/۶</u> | <u>-۰/۶</u> | <u>۰/۶</u> | <u>-۰/۶</u> | <u>-۰/۶</u> | <u>-۰/۵</u> | <u>-۰/۶</u> | -    | ۰/۶  | -۰/۳ |
| H  |   |      |      |      |     |             |            |             |             | ۱          | -۰/۱        | <u>۰/۶</u> | -۰/۹        | -۰/۱        | -۰/۱        | ۰/۱         | -    | ۰/۱  | ۰/۳  |
| LW |   |      |      |      |     |             |            |             |             |            | ۱           | -۰/۳       | ۰/۱         | ۰/۹۹        | ۰/۹۹        | ۰/۹۹        | ۰/۹۹ | ۰/۹  | ۰/۶  |
| FS |   |      |      |      |     |             |            |             |             |            |             | ۱          | -۰/۹        | -۰/۲        | ۰/۰         | -           | -    | ۰/۲  | ۰/۲  |
| P  |   |      |      |      |     |             |            |             |             |            |             |            | ۱           | ۰/۱         | ۰/۱         | ۰/۰         | ۰/۱  | -۰/۴ | -۰/۴ |
| AP |   |      |      |      |     |             |            |             |             |            |             |            |             | ۱           | ۰/۹۹        | ۰/۹۹        | ۰/۹۹ | ۰/۹  | ۰/۸  |
| NN |   |      |      |      |     |             |            |             |             |            |             |            |             |             | ۱           | ۰/۹۹        | ۰/۹  | ۰/۶  | ۰/۶  |
| NL |   |      |      |      |     |             |            |             |             |            |             |            |             |             |             | ۱           | ۰/۹  | ۰/۶  | ۰/۶  |
| DS |   |      |      |      |     |             |            |             |             |            |             |            |             |             |             |             | ۱    | ۰/۸  | ۰/۸  |
| DW |   |      |      |      |     |             |            |             |             |            |             |            |             |             |             |             |      | ۱    | ۱    |

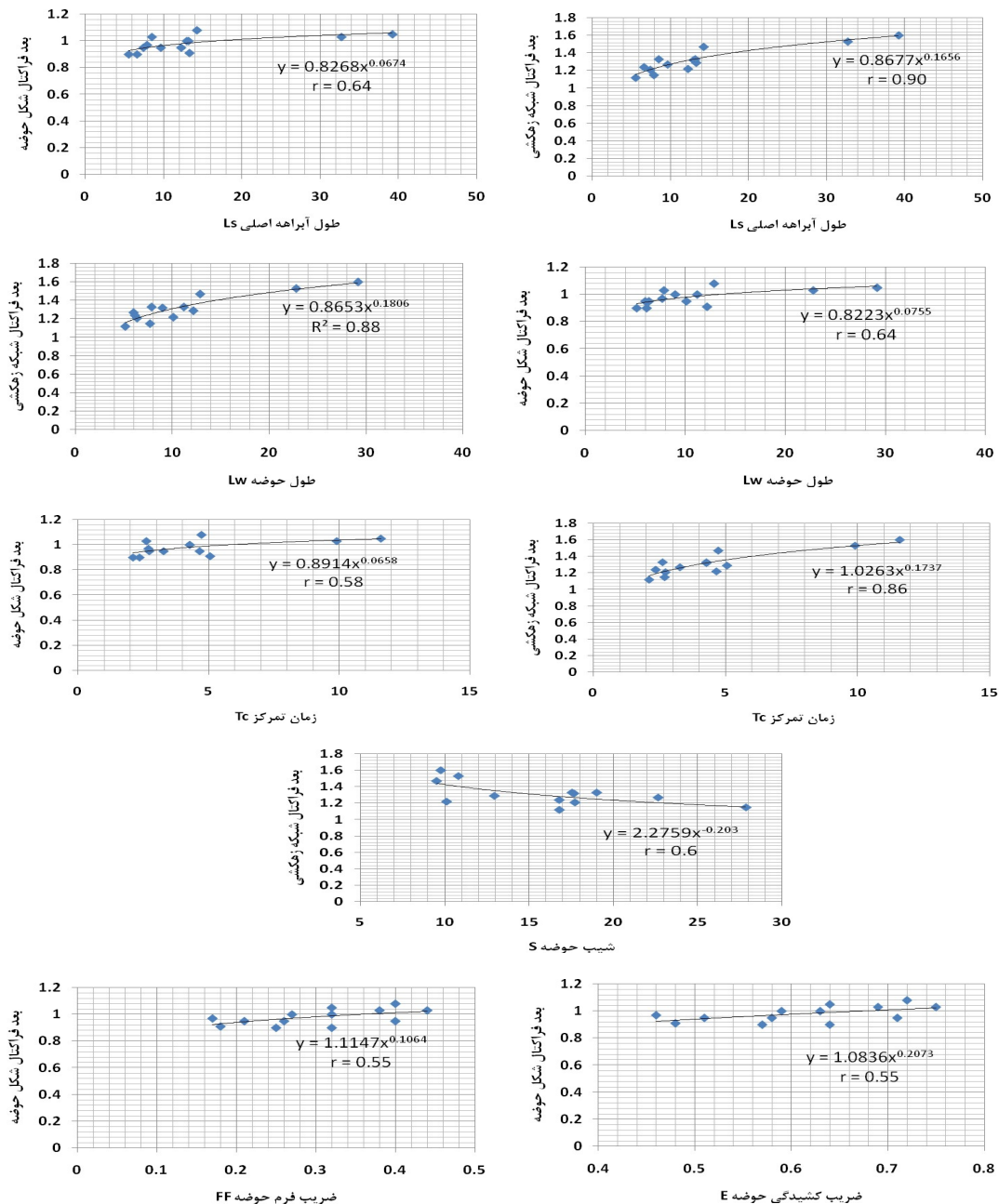
اعداد بولدشده، مقادیر همبستگی در سطح اعتماد ۰/۹۹ است و اعداد زیرخط دار، مقادیر همبستگی در سطح اعتماد ۰/۹۵

تنها پارامتر شیب حوضه با بعد فراکتال شبکه‌زهکشی، همبستگی منفی با مقدار ۰/۶ در سطح اعتماد ۰/۹۵ دارد؛ این امر به این معنی است که مقادیر کم شیب در حوضه‌ی عقدا دارای مقادیر بالای بعد فراکتال است. همین روابط درباره‌ی بعد فراکتال شکل حوضه نیز برقرار است؛ با این تفاوت که ضرایب همبستگی مقادیر کمتری دارد و به جز سه پارامتر مجموع طول آبراهه، مساحت و مساحت فرسایش‌پذیر حوضه، ضرایب همبستگی در سطح اعتماد ۰/۹۵ حاصل شد و به جای عامل شیب، پارامتر ضریب فرم و کشیدگی با مقادیر بعد فراکتال شکل حوضه دارای روابط معنی‌دار هستند. همچنین همبستگی بین بعد فراکتال شبکه‌زهکشی و شکل حوضه در سطح اعتماد ۰/۹۹، به مقدار ۰/۸ برآورد شد. با دانستن رابطه‌ی دقیق بین ویژگی‌های ژئومورفولوژیک حوضه‌آبخیز با بعد فراکتال شبکه‌زهکشی، می‌توان سایر ویژگی‌های حوضه را با در اختیار داشتن بعد فراکتال پیش‌بینی کرد. نتایج حاصل از این بررسی، روابط معنی‌داری را بین ابعاد فراکتال شبکه‌زهکشی و شکل حوضه با ویژگی‌های ژئومورفولوژیک نشان می‌دهد (شکل ۴). بالاترین ضریب همبستگی متعلق به روابط رگرسیونی بین مجموع طول آبراهه، مساحت فرسایش‌پذیر و مساحت حوضه با بعد فراکتال شبکه‌زهکشی است و بعد فراکتال شکل حوضه بالاترین همبستگی را با تعداد آبراهه، مجموع طول آبراهه و مساحت

نشان داد (در سطح ۰/۹۹). با توجه به نتایج به دست آمده می توان چنین استنباط کرد که بعد فراکتال شبکه زهکشی نسبت به بعد فراکتال شکل حوضه، توانایی بیشتری در پیش بینی پارامترهای ژئومورفولوژیک حوضه آبخیز دارد.



شکل ۴: روابط رگرسیونی بین بعد فراکتال شبکه زهکشی و حوضه با پارامترهای ژئومورفولوژیک



شکل ۴: روابط رگرسیونی بین بعد فراکتال شبکه زهکشی و حوضه با پارامترهای ژئومورفولوژیک

## ۵- بحث و نتیجه گیری

مدیریت جامع و صحیح حوضه‌های آبخیز و اولویت‌بندی آنها برای عملیات آبخیزداری، نیازمند بررسی و مطالعه‌ی ویژگی‌های ژئومورفولوژی حوضه آبخیز است. هر چند استفاده از تحلیل‌های GIS ابزاری مهم در تجزیه و تحلیل‌های حوضه‌های آبخیز به شمار می‌رود، اما استخراج این ویژگی‌ها و برآورد شرایط فرسایشی حوضه، مستلزم صرف وقت و هزینه‌ی بالاست. این مسئله در کنار نبود داده‌ی مناسب برای استفاده از مدل‌های فیزیکی و فقدان ایستگاه آب‌سنجی کافی برای اعتبارسنجی مدل‌ها، مشکل را چندین برابر کرده‌است؛ از این رو، استفاده از شاخصی که برآوردی مناسب از

وضعیت فرسایش پذیری منطقه داشته باشد، بسیار ضروری است. در سایر پژوهش های انجام شده در این زمینه طول حوضه، مساحت، طول آبراهه، نسبت انشعاب و فاکتور فرم حوضه، از شاخص های کلیدی در هیدرولوژی و فرسایش و رسوب به عنوان نمونه در حوضه های کوتاه نیجریه عنوان شد (Paulinus et al, 2016)؛ اما در پژوهش حاضر شاخص نسبت انشعاب، نسبت طولی رودخانه و تراکم زهکشی، رابطه معنی داری را با شرایط فرسایشی حوضه آبخیز عقدا نشان داد و سایر پارامترهای ژئومورفولوژیک چون مساحت، مجموع طول و تعداد آبراهه، مساحت فرسایش پذیر، زمان تمرکز و شیب حوضه به عنوان پارامترهای تأثیرگذار مشخص شد (Shabani et al, 2007 & Shi et al, 2014). بررسی های انجام شده بر پارامترهای ژئومورفولوژیک نشان داد که به کمک این پارامترها می توان میزان حساسیت حوضه ها به فرسایش را تعیین کرد (مکرمی و درویش بلورانی، ۲۰۱۴؛ معتمدی و آذری، ۲۰۱۸). همچنین نتایج پژوهش های انجام شده در زمینه ی تحلیل فراکتالی حوضه آبخیز نشان داد که بین بعد فراکتال و عواملی مانند فرم حوضه، مساحت، نسبت انشعاب، تراکم زهکشی و نسبت طول آبراهه در حوضه ها، رابطه ی معنی داری وجود دارد (Khanbabaie et al, 2013؛ خسروی و همکاران، ۲۰۱۷؛ علمی زاده و همکاران، ۲۰۱۳؛ کرم و صابری، ۲۰۱۵). اما در میان پارامترهای ژئومورفولوژیک مورد بررسی، دو پارامتر نسبت انشعاب و نسبت طولی آبراهه با هیچ یک از پارامترها و بعدهای فراکتال، رابطه ی معنی داری نداشت و پارامتر تراکم زهکشی تنها با پارامتر فراوانی آبراهه، همبستگی نشان داد. می توان گفت فقدان معنی داری سه پارامتر نسبت انشعاب، نسبت طولی رودخانه و تراکم زهکشی با بعد فراکتال از رفتار شبکه زهکشی در منطقه ی مورد مطالعه سرچشمه می گیرد؛ علاوه بر این، این مسئله را باید در نظر داشت که لزوماً فرسایش پذیری بالا به تراکم زهکشی بالا منجر نمی شود؛ چون پارامترهای سنگ شناسی به همراه عوامل پوشش گیاهی، تکتونیک و پستی و بلندی در فرسایش نقش دارد. به عنوان مثال، در آبرفت های عهد حاضر اگر چه فرسایش پذیری بالاست، تراکم زهکشی در آنها بسیار زیاد نیست (زیرحوضه T4). به همین دلیل بهتر است در مطالعات بعدی، آبراهه های تکتونیکی و زمین ساخت از آبراهه های ناشی از فرسایش تفکیک شود؛ زیرا ممکن است در بعضی سازندهای مقاوم، تراکم زهکشی نسبتاً بالایی وجود داشته باشد، ولی این تراکم به فرسایش و حساسیت فرسایش پذیری مرتبط نباشد (جعفرزاده خطیبیانی و همکاران، ۲۰۱۶). با توجه به گسترش سنگ های آذرین و رسوبی (آهکی و آذرین) با چین خوردگی و تکتونیک فراوان و گسل های متعدد در حوضه ی عقدا، بررسی این مسئله ضرورت می یابد. از انواع چین ها در منطقه ی مورد مطالعه می توان تنها به وجود ناودیس واقع در کوه های شمال دقاژدها اشاره کرد که در سازند میلا قابل مشاهده است. از مهم ترین گسل های معکوس مشاهده شده در منطقه نیز می توان به رانده شدن دولومیت سلطانیه بر سنگ آهک عقدا در جنوب شرق حوضه و در مجاورت کوه مرغ زرد اشاره کرد. همچنین گسل های اصلی و فرعی نیز به وفور دیده می شود؛ از جمله گسل های موجود در زیر کوه و گسل های موجود بین واحدهای سازند لالون با آهک زبر کوه و گسل های موود در سازند سلطانیه که هر یک ساز و کار متفاوت دارند. در نهایت، نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر می تواند یافته های پژوهشی سایر محققان را تأیید کند که بعد فراکتال شبکه زهکشی، پیچیدگی های شکل حوضه را به خوبی منعکس می سازد و می تواند شاخصی کمی برای تحلیل حوضه و مراحل تحول حوضه آبخیز باشد (علیمردی و همکاران، ۲۰۱۸ & Guo et al, 2015 & Bass, 2002 & Hui and Changxing, 2017). در واقع، بعد فراکتال شاخصی است که می تواند حوضه های حساس و با اولویت بالا را با مدیریت زمان و هزینه در اختیار قرار دهد؛ به طوری که در مطالعات

بعدی بدون اندازه‌گیری ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی از طریق بعد فراکتال، مناطق حساس به فرسایش و دارای اولویت بالا را مشخص کند تا راهکارهای لازم برای مدیریت صحیح منطقه اجرا شود. با پی بردن به رابطه‌ی دقیق میان ویژگی‌های ژئومورفولوژیک حوضه آبخیز با بعد فراکتال شبکه‌زهکشی، می‌توان سایر ویژگی‌های حوضه را با در اختیار داشتن بعد فراکتال پیش‌بینی کرد. نتایج حاصل از این بررسی، روابط معنی‌داری را بین ابعاد فراکتال حوضه و شبکه‌زهکشی با ویژگی‌های ژئومورفولوژیک نشان می‌دهد. بالاترین ضریب همبستگی متعلق به روابط رگرسیونی بین مجموع طول آبراهه، مساحت فرسایش‌پذیر و مساحت حوضه با بعد فراکتال شبکه‌زهکشی است و بعد فراکتال شکل حوضه نیز بالاترین همبستگی را با مجموع طول و تعداد آبراهه و مساحت حوضه نشان داد (در سطح ۰/۹۹). با بررسی ویژگی‌های ژئومورفولوژیک و مقایسه‌ی آن با بعد فراکتال شکل حوضه و شبکه‌زهکشی منطقه، وضعیت فرسایشی منطقه‌ی مورد مطالعه مشخص شد. با توجه به نتایج مشخص شد که واحدهای مستقل مربوط به واحدهای T1، T6 و T8 و در واحد ترکیبی TO3 دارای بیشترین فرسایش‌پذیری هستند. این نتایج می‌تواند در برنامه‌های کنترل رسوب و آبخیزداری استفاده شود و بر مبنای آن، راهکارهای لازم برای مدیریت منطقه ارائه شود. در واقع، پژوهش حاضر نشان داد که تحلیل ابعاد فراکتال می‌تواند به بررسی سریع و دقیقی از ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه و شبکه‌زهکشی منجر شود. همچنین به دلیل شکننده بودن اکوسیستم در مناطق خشک، درک مناسب از وضعیت فرسایشی و ژئومورفولوژیکی حوضه آبخیز ابزاری مفید و کارآمد در مدیریت این مناطق است. به منظور بالا بردن کارایی بعد فراکتال در تعیین وضعیت فرسایشی و مدیریت حوضه، پیشنهاد می‌شود که در مطالعات بعدی آبراهه‌های تکتونیک و زمین‌ساخت از آبراهه‌های ناشی از فرسایش تفکیک شود. همچنین برای بررسی وضعیت فرسایشی سازندها در حوضه‌هایی مثل منطقه‌ی مورد مطالعه با چین‌خوردگی و تکتونیک فراوان و گسل‌های متعدد، پیشنهاد می‌شود بعد فراکتال خطواره‌ها در کنار بعد فراکتال شبکه‌زهکشی نیز بررسی شود.

### سپاس‌گزاری

مقاله‌ی حاضر بخشی از طرح پژوهشی دوره‌ی پسادکتری مصوب دانشگاه یزد است که نویسندگان از معاون پژوهشی این دانشگاه به سبب حمایت‌های فراوانش سپاس‌گزاری می‌کنند.

### منابع

1. Alimoradi, M.; Ekhtesasi, M. R.; Tazeh, M.; & H. Karimi, 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 Persion).
2. BAAS, A. C. W., 2002. Chaos, fractals and self-organization in coastal geomorphology: simulating dune landscapes in vegetated environments, *Geomorphology*, 48, 309 - 328.
3. Ben-Zion, Y., & C. G. Sammis., (2003). Characterization of fault zones. *Pure and Applied Geophysics*. 160 (3 - 4), 677 - 715 .
4. Dutta, S.; Ghosh, D.; & S. Chatterjee, 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.

5. ElmiZade, H.; Mahpeikar, O.; & M. Sadatmand, 2013. Investigate the theory of fractals in fluvial geomorphology: A Case Study Zarrinehroud, *Research of quantitative geomorphology*, 3 (2), 130 - 141. (in Persion).
6. Fac-Beneda, J., 2013. Fractal structure of the Kashubian hydrographic system, *Journal of Hydrology*, 488, 48 – 54.
7. Fattahi, M. H., & Z. Talebzadeh., (2017). The relationship between watershed compactness coefficient and the fractal characteristics. *Iran Water Resources Research*. 13 (1), 191 - 203. (in Persion).
8. Gloaguen, R.; Marpu, P.; & I. Niemyer, 2007. Automatic extraction of faults and fractal analysis from remote sensing data, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 14 (2), 131 – 138.
9. Gloaguen, R.; Kabner, A.; Wobbe, F.; Shahzad, F.; & A. Mahmood, 2008. Remote sensing analysis of crustal deformation using river networks, Paper presented at the Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International.
10. Guo, Y.; Zhang, S.; & Z. Wang, 2015. Correlation between flood frequency and geomorphologic complexity of river network-A case study of Hangzhou China.
11. Horton, R. E., 1932. Drainage-basin characteristics, *Eos, transactions american geophysical union*, 13 (1), 350 - 361.
12. Horton, R. E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology, *Geological society of America bulletin*, 56 (3), 275 - 370.
13. Hui, Y., & S. Changxing., (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.; & C. Riccomini, 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. Jafarzadeh khatibani, k.; moeini, A.; & H. Ahmadi, 2016. Survey of relationship between soil and geology characteristics with drainage density (Case study: four watersheds in Ardebil province), *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 6 (1), 99 - 108. (in Persion).
16. Karam, A., & M. Saberi., (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 Persion).
17. Khanbabaee, Z.; Karam, A.; & G. Rostamizad, 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.; & Z. Abdollahzadeh, 2017. Fractal Behavior and Its Relationship with Hydromorphometric Characteristics over Catchments of Binaloud Northern Hillslopes, *Scientific Journal Management System*, 3 (9), 1 - 20. (in Persion).
19. Kusák, M., 2014. IN THE STUDY OF COMPLEX GEOMORPHIC NETWORKS.
20. Mandelbrot, B. B., 1967. How long is the coast of Britain, *science*, 156 (3775), 636 - 638.
21. Mandelbrot, B. B., 1983. The fractal geometry of nature/Revised and enlarged edition, New York, WH Freeman and Co., 1983, 495 p., 1 .
22. Miller, V. C., 1953. Quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee, Technical report (Columbia University. Department of Geology), 3.
23. 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.

24. 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.
25. Mokarram, M.; Darvishi, A.; & S. Negahban, 2017. The Relation between Morphometric Characteristics of Watersheds and Erodibility at different altitude levels using Topographic Position Index (TPI) Case Study: Nazloochaeh Watershed, *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 26 (101). (in Persion).
26. Motamedi, R., & M. Azari., (2018). The Relationship between Geomorphic Characteristics and Watershed Sediment Yield: A Case of Selected Subwatersheds of Khorasan Razavi. *Quarterly Journal of Environmental Erosion Research*. 7 (4), 82 - 101. (in Persion).
27. Nikooyi, E.; Heydari, M.; Talebbeydokhti, N.; & A. A. Hekmatzadeh, 2008. Fractal geometry in river engineering: ideas, concepts and achievements, National Congress on Civil Engineering, 14-15 May, University of Tehran. (in Persion).
28. Paulinus, U. U.; Ifedilichukwu, N. G.; Ahamefula, A. C.; Iheanyichukwu, O. A.; Theophilus, E. T.; & I. G. Edet, 2016. Morphometric Analysis of Sub-watersheds in Oguta and Environs, Southeastern Nigeria Using GIS and Remote Sensing Data, *Journal of Geosciences*, 4 (2), 21- 28.
29. Schumm, S. A., 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey, *Geological society of America bulletin*, 67 (5), 597 - 646.
30. Shabani, M.; Feiznia, s.; Ahmadi, H.; & J. Ghodosi, 2007. Investigation and determination of effective factors on sediment production and yield of drainage basins (Case Study: Taleghan Drainage Basin), *Journal of the Iranian Natural Resources*, 60 (3), 759 - 771. (in Persian).
31. Shahzad, F.; Mahmood, S.; & R. Gloaguen, 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. Sharma, S. K., & K. N. Tiwari., (2009). Bootstrap based artificial neural network (BANN) analysis for hierarchical prediction of monthly runoff in Upper Damodar Valley Catchment. *Journal of hydrology*. 374 (3), 209 - 222.
33. Shi, Z. H.; Huang, X. D.; Ai, L.; Fang, N. F.; & G. L. Wu, 2014. Quantitative analysis of factors controlling sediment yield in mountainous watersheds, *Geomorphology*, 226, 193 - 201.
34. Wong, T. S. W., (2005). Assessment of time of concentration formulas for overland flow, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131 (4), 383 - 387.

# Comparison of fractal dimension and geomorphologic characteristics in the management of Aqda Basin

**Mojdeh Mohammadi<sup>1</sup>:** *Postdoctoral Researcher in Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Yazd University, Yazd*

**Mohammad Reza Ekhtesasi:** *Prof., Faculty of Natural Resources, Yazd University, Yazd*

Article History (Received: 2019/05/05 Accepted: 2019/07/02)

## Extended abstract

### 1- Introduction

Different natural phenomena have many variables that make it difficult to find relations among 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 procedure of scrutinizing and explaining. In this way, we can use the fractal geometry with the theory that the order of many natural phenomena is chaotic. Fractal geometry is a quantitative tool for studying the geomorphology of drainage networks and modeling many complex natural phenomena. In fact, geophysical phenomena such as basins are fractal phenomena with fractal behavior. An understanding of geomorphologic characteristics and their performance over basins is very important in the watershed management. This paper focuses on the relationship between fractal dimensions of basin shape and drainage network with the geomorphologic characteristics of basin. Therefore, through an analysis of fractal dimensions and its comparison with geomorphologic characteristics, the fractal behavior of this basin is investigated.

### 2- Methodology

The present study consists of four main sections. The first section is the collection of maps and data. In this section, topographic maps at scale of 1:50000 and geological map at scale of 1:100000 from area were provided. Then, the required layers were extracted from them such as drainage networks and geological units. Sensitivity to erosion of formations was studied in this basin using PSIAC method. In order to investigate more precisely, the Aqda was divided into nine hydrological sub-basins (independent), five non-hydrological sub-basins (dependent) and four hybrid sub-basins. The second section, 18 geomorphologic characteristics were calculated for each sub-basin. In the third section of this study, fractal dimension of drainage networks and basin shape was calculated by box counting method using Fractalyse software in each sub-basin. The focus of the final section is on the relationship between fractal dimensions of basin shape and drainage network with the geomorphologic characteristics of basin.

### 3- Results

The results showed that the T8 and To3 sub-basins, respectively, with values of 1.47 and 1.60 have the highest fractal dimensions of the drainage network. Also, the highest fractal dimensions of the basin shape were obtained with values of 1.05 and 1.08, respectively, in the same sub-basins (T8 and To3). The results also indicated that there were significant relations among the fractal dimensions of the basin shape and the drainage network with geomorphologic characteristics. The highest correlation belongs to the regression relations between the total length of stream, basin area and erodible area with the fractal dimension of the drainage network (0.98, 0.97 and 0.95 respectively). Fractal dimension of the basin shape showed the highest correlation of 0.82 and 0.8 respectively with the number of networks and the total length of stream (significant at 99 percent level). Then, the erodible status in Aqda Basin was determined by studying the geomorphologic characteristics and comparing it with the fractal dimensions of the basin shape and the drainage network. The highest erodible status

<sup>1</sup> Corresponding Author: [m.mohammadi@stu.yazd.ac.ir](mailto:m.mohammadi@stu.yazd.ac.ir)

is in T8, T1, T6 and TO3 sub-basins which should be considered in strategies to manage Aqda basin. In fact, this study showed that fractal dimensions allow a quick and accurate analysis of the geomorphologic characteristics of the basin and the drainage network.

#### 4- Discussion & Conclusions

Identification, evaluation and prioritization of different areas can produce valuable information for the watershed comprehensive plans, soil conservation and mitigation of the erosion types based on amount of erosion and sedimentation. For this purpose, the geomorphologic characteristics should be investigated in basins. But extraction of these characteristics and estimation of the erodible status in basins are time-consuming and costly. Therefore, it is very necessary to use an index that has an appropriate estimation of the erodible status in basins. Fractal dimension, with time and cost management, can determine sensitive and high priority basins. With knowledge about the relationship between geomorphologic characteristics basins with fractal dimension, we can predict the other characteristics of basin. The results of this study indicated that there were significant relation between the geomorphic characteristics of sub-basins study and fractal dimension of the basin shape and the drainage network. Other researches on fractal dimension analysis have shown that there is a significant relation between fractal dimension and characteristics such as basin shape, area, branching ratio, drainage density and length ratio of drainage network. But in this study, two characteristics of branching ratio and length ratio of drainage network were not significantly correlated with any of the characteristics and fractal dimensions, and the drainage density was correlated only with frequency rank. Therefore, basins with high erosion will not always have high drainage density. For example, quaternary alluvial deposits have high erosion, but their drainage density is not very high (T4 sub-basin). For this reason, in the future studies, it is better to separate the tectonic streams from the erosion streams. Finally, the results of this study can confirm the findings of other researchers that fractal dimension of drainage network reflects the complexity of the basin shape and can be used as a quantitative index for basin analysis and evolution of the basin.

**Key Words:** Box Counting, Fractal Dimension, Geomorphologic characteristics, Watershed management.