



## Determining the fractal pattern in a reach of Qharesou river, Ardabil province



Raof Mostafazadeh<sup>\*</sup>, Fariba Esfandyari Darabad<sup>1</sup>, Ahmad Naseri<sup>3</sup>, Ahmad Abyat<sup>4</sup>, and Maryam Adhami<sup>5</sup>



This paper is an open access and licenced under the CC BY NC licence.



DOI:10.22034/hyd.2023.57428.1700

### Reference to this article:

Mostafazadeh, Raof; Esfandyari Darabad, Fariba; Naseri, Ahmad; Abyat, Ahmad, Adhami, Maryam. (2023). Determining the fractal pattern in a reach of Qharesou river, Ardabil province. *Hydrogeomorphology*, 10(37): 81– 97.

### Keywords

Box-counting, Fractal dimension, River morphology, Qareh-Sou River, Northwest Iran.

Receive Date: 2023/07/08

Accept Date: 2023/10/31

Available: 2024/01/20

### ABSTRACT

Fractal dimension is a powerful and important index that reflects the physical and morphological characteristics of rivers and has a close relationship with geometric features of rivers. The fractal pattern was used to investigate the sinuosity of the Gharehsou River in Ardabil Province, using the box-counting method. The results show that the fractal dimension of the Gharehsou River varies between 2.068 and 2.186. The minimum fractal dimension is in the first category of meanders with lower areas of tangent circle, and the maximum number of circles falls into the eighth category (having high areas of tangent circle). Based on the correlation between the number and area of tangent circles (0.71 to 0.84), it can be said that the river reaches studied follow a fractal and self-similar pattern. The fractal dimension values in the Anzab village-Taleb Qeshlaqi village reach were calculated to be 2.23, indicating a higher level of self-similarity, which is related with the naturalness of this river reach, which is located within a plain area, and the river has undergone more evolution. On the other hand, in the Taleb Qeshlaqi village-Sabalān Dam reach, the fractal dimension value was found to be 1.85, which may be related to the river traversing steeper paths, limiting its meander development and making the fractal pattern less observable. Human interventions in the river's course, as well as the river's passage through agricultural lands in some cases, have led to changes in the width and depth of the river and restrictions on meander expansion.

\* Corresponding Author: Raof Mostafazadeh

E-mail: Raofmostafazadeh@uma.ac.ir

1. Associate Professor, Department of Watershed Management and Member of Water Management Research Institute, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2. Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Social Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3. M.Sc. in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

4. Assistant Professor, Department of Geology, Islamic Azad University, Omidyeh Branch, Omidyeh, Iran

5. Ph.D in Watershed Management Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

## Extended Abstract

### Introduction

Quantifying the unique patterns in geomorphic, geological, and hydrological studies is considered crucial. Fractal geometry is a beneficial tool in examining changes in linear structures such as faults, waterways, and meandering rivers. Fractals are objects or processes that exhibit identical appearance or behavior in multiple spatial or temporal scales. Fractal geometry is a novel branch of geometry that mathematically simulates and quantifies natural phenomena and complex, irregular objects. The fractal dimension is computed using various techniques, with box-counting being one of the most widely used. This method is a mathematical tool employed to investigate geomorphic systems, particularly the geomorphology of rivers. The present study aims to investigate the fractal pattern of the Qareh-Sou River using the box-counting method and analyze the river's meandering characteristics. This river is an essential source of drinking and agricultural water in Ardabil province. The Qareh-Sou River has not yet attained geomorphic evolution and displays irregularities in its course that may affect activities in the vicinity of the river.

### Methodology

The box-counting method was employed in the present study to investigate the meandering condition of the Qareh-Sou River in Ardabil province. Landsat 8 satellite OLI sensor image from 2018, bands 2, 3, and 5, was utilized. ENVI5 and ArcGIS10.3 software were used to delineate the river paths. Subsequently, several parameters, including central angle, meander length and valley length, curvature coefficient, and fractal components, were computed. In the present study, the fractal pattern was used to investigate the sinuosity of the Gharehsou River in Ardabil Province, using the box-counting method. Then, the correlation method was used to examine the relationship between the morphological parameters.

### Results and Discussion

The results of the research show that the fractal dimension of the Gharehsou River varies between 2.068 and 2.186. The minimum fractal dimension is in the first category of meanders with lower areas of tangent circle, and the maximum number of circles falls into the eighth category (having high areas of tangent circle). Based on the significant correlation between the number and area of tangent circles ranging from 0.71 to 0.84, it can be said that the river reaches studied in the Gharehsou River follow a fractal and self-similar pattern within the study area. The fractal dimension values in the Anzab village-Taleb Qeshlaqi village reach were calculated to be 2.23, indicating a higher level of self-similarity in this reach, which may be a reason for the naturalness of this river reach. Additionally, this reach is located within a plain area, where the river has undergone more evolution. On the other hand, in the Taleb Qeshlaqi village-Sabalān Dam reach, the fractal dimension value was found to be 1.85, which may be related to the river traversing steeper paths, limiting its meander development and making the fractal pattern less observable in this reach.

### Conclusions

The Gharehsou River exhibits a fractal dimension ranging as a significant correlation (0.71 to 0.84) was found between the number and area of tangent circles. The lower fractal dimension of 1.85, indicating limited meander development due to steeper paths, resulting in a less observable fractal pattern. It should be noted that human interventions in the river's course, as well as the river's passage through agricultural lands in some cases, have led to changes in the width and depth of the river and restrictions on meander expansion.

## References

- Baas, A. C. (2002). Chaos, fractals and self-organization in coastal geomorphology: simulating dune landscapes in vegetated environments. *Geomorphology*, 48(1-3), 309-328.
- Donadio, C., Magdaleno, F., Mazzarella, A., & Mathias Kondolf, G. (2015). Fractal dimension of the hydrographic pattern of three large rivers in the Mediterranean morphoclimatic system: Geomorphologic interpretation of Russian (USA), Ebro (Spain) and Volturno (Italy) fluvial geometry. *Pure and Applied Geophysics*, 172, 1975-1984.
- Elmizadeh, H., Mah Ojer, O, Saadatmand, M., (2014). Investigating the Fractal Theory in the Geomorphology of Rivers (case study: Zarrineroud). *Quantitative Geomorphological Researches*, 3 (2), 130-141.
- Elmizadeh, H., Mahpeykar, O., (2017). Fractal Analysis in Zarrineroud River Using Box-Counting Method. *Geographic Space*. 17(59), 255-270.
- Fattahi, M., & Jahangiri, H. (2014). Studying the relations between the fractal properties of the river networks and the flow time series. *Water Resources Engineering*, 7(20), 1-10.
- Rodriguez-Iturbe, I., & Rinaldo, A. (1997). *Fractal river basins: chance and self-organization*. Cambridge University Press.



## مقاله پژوهشی



## تعیین الگوی فرکتالی در بازه‌ای از رودخانه قره‌سو استان اردبیل



رئوف مصطفی‌زاده<sup>۱\*</sup>، فریبا اسفندیاری درآباد<sup>۲</sup>، احمد ناصری<sup>۳</sup>، احمد عبیات<sup>۴</sup>، مریم ادهمی<sup>۵</sup>



این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کپی‌رایت‌یو کامانز قابل استفاده است.



## ارجاع به این مقاله:

مصطفی‌زاده، رئوف؛ اسفندیاری درآباد، فریبا؛ ناصری، احمد؛ عبیات، احمد؛ ادهمی، مریم. (۱۴۰۲). تعیین الگوی فرکتالی در بازه‌ای از رودخانه قره‌سو استان اردبیل. هیدروژئومورفولوژی، ۱۰ (۳۷): ۸۳-۹۹

DOI: 10.22034/hyd.2023.57428.1700



## چکیده

بعد فرکتال نمایه‌ای قوی و مهم در انعکاس خصوصیات فیزیکی و مورفولوژی رودخانه بوده و ارتباط تنگاتنگی با سایر ویژگی‌های فیزیکی و هندسی رودخانه‌ها دارد. در تحقیق حاضر به منظور بررسی وضعیت پیچان‌رودی رودخانه قره‌سو استان اردبیل براساس الگوی فرکتال از روش شمارش جعبه‌ای استفاده شد، سپس با استفاده از روش همبستگی پیرسون، ارتباط میان پارامترهای مورفولوژیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان می‌دهد، بعد فرکتال رودخانه قره‌سو بین ۲/۰۶۸ تا ۲/۱۸۶ متغیر است. حداقل بعد فرکتال در دسته اول و حداکثر در دسته هشتم قرار دارد. بر اساس رابطه معنی‌داری ضریب تعیین میان تعداد و مساحت دایره‌های مماس بر پیچان‌رود با مقادیر ۰/۷۱ تا ۰/۸۴ می‌توان گفت که پیچان‌رودهای مورد مطالعه در بازه مورد مطالعه از رودخانه قره‌سو از الگوی فرکتالی و خودتشابهی پیروی می‌کند. مقادیر بعد فرکتالی بازه روستای انزاب- روستای طالب‌قشلاقی برابر ۲/۲۳ محاسبه شد که نشان می‌دهد این بازه دارای خاصیت خودتشابهی بیش‌تری است و می‌تواند دلیلی بر طبیعی بودن بازه مورد نظر باشد و نیز بازه مذکور در یک محدوده دشتی جریان دارد و رودخانه تکامل بیش‌تری پیدا کرده است. این در حالی است که در بازه روستای طالب‌قشلاقی-سد سبلان مقدار بعد فرکتالی برابر ۱/۸۵ به‌دست آمد که می‌تواند به عبور رودخانه از مسیرهایی با شیب بیش‌تر مرتبط باشد که توسعه مماندر را محدود نموده است. باید اشاره شود که برخی دخالت‌های انسانی در مسیر رودخانه و نیز عبور رودخانه از مجاورت اراضی کشاورزی در برخی موارد باعث تغییر در عرض و عمق رودخانه و محدودیت در گسترش مماندرها شده است.

## کلیدواژه‌ها

بعد فرکتال، شمارش جعبه‌ای، مورفولوژی رودخانه، رودخانه قره‌سو، شمال غرب ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰

\* نویسنده مسئول: رئوف مصطفی‌زاده

رایانامه: raooftmostafazadeh@uma.ac.ir

- ۱- دانشیار گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
- ۲- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
- ۳- کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
- ۴- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه نفت امیدیه، امیدیه، ایران
- ۵- دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

## مقدمه

یکی از ارکان اصلی در شناسایی ارتباط بین ساختار و عملکردهای موجود در بستر سیمای سرزمین و پیش‌بینی اثرات متعاقب آن، کمی‌سازی الگوهای مکانی است (ابجاز و سکوز<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۴: ۲۸۹). مورفولوژی رودخانه‌ها در حفاظت و مقابله با سیلاب به واسطه پیوند و ارتباط آن با زیستگاه‌های طبیعی و انتقال سیلاب از اهمیت خاصی برخوردار است (اسفندیاری و همکاران، ۱۳۹۹). تغییرات طبیعی و انسانی می‌تواند رژیم هیدرولوژی و مورفولوژی رودخانه را تحت تاثیر قرار دهد (امینی و همکاران، ۱۳۹۸). محققان علم ژئومورفولوژی و مهندسی رودخانه همواره نیازمند مدلی مناسب برای تبیین، توجیه و پیش‌بینی رفتار رودخانه‌ها در گذر زمان بوده‌اند. در همین راستا، هندسه فرکتال به‌عنوان یک ابزار مناسب جهت مدل‌سازی هندسه، تغییرات رودخانه‌ها و نیز بررسی فرایندهای فیزیکی درون رودخانه مطرح شده است (تاداکی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۴: ۳۵۰). هندسه فرکتال یکی از مهم‌ترین روش‌های ساختاری است که با تعیین بعد فرکتال ساختارهای خطی مانند گسل‌ها، آبراه‌ها و مسیر پریچ و خم رودخانه‌ها امکان تخمین خصوصیات ماند میزبان جابجایی و شناسایی میزان تغییرات را فراهم می‌کند (شو<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۳: ۲۴۷). اشیاء فرکتالی عموماً خود متشابه (تشابه تصادفی یا آماری) می‌باشند، به‌عبارت دیگر الگویی مشابه در اجزاء مختلف این اشیاء به چشم می‌خورد (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶: پکهام<sup>۴</sup>، ۱۹۸۹: ۱۰۲۴). تمامی منحنی‌های پیچیده در طبیعت نیز ایده تکرار الگو را دارند، با این تفاوت عمده که در بعضی از منحنی‌های طبیعی همانند رودخانه‌ها، الگوی تکرارشونده در سراسر رودخانه یکی نیست و در بخش‌های مختلف الگوی متفاوتی تکرار شده است (نیکورا<sup>۵</sup>، ۱۹۹۱: ۳۵۶۳). علی‌رغم پیچیدگی و بی‌نظمی ظاهری برخی پدیده‌های طبیعی، هندسه درختان فرکتالی آن‌ها را می‌توان با استفاده از روابطی منظم و بر اساس الگوی مشخصی تعریف نمود (آریزا ویلاورده<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۳: ۸۶). فرکتال‌ها اشیاء و یا فرآیندهایی هستند که در مقیاس‌های مکانی و یا زمانی متعددی، شکل ظاهری و یا رفتار یکسانی را از خود بروز می‌دهند و در پیچیدگی‌هایی در مقیاس‌های بسیار کوچک هندسه اقلیدسی قادر به تفسیر آن‌ها نیست. هر فرکتال می‌تواند به بخش‌هایی تقسیم شود که هر بخش شبیه جسم اصلی باشد (فتاحی و طالب‌زاده، ۱۳۹۶: ۸۸؛ قدم‌پور و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۵). فرکتال‌ها از نگاه ریاضیاتی اجسام یا پدیده‌هایی با ویژگی‌های زیر هستند: (۱) هر پدیده فرکتال از قطعاتی تشکیل یافته است که هر قطعه کاملاً نماینده شکل و ویژگی‌های کل جسم (خودتشابهی) است. (۲) فرکتال‌ها دارای ابعاد صحیح نبوده و بعد آن‌ها به‌صورت کسری بیان می‌شود. (۳) این اجسام حاصل یک فرآیند تکراری هستند و می‌توان برای آن‌ها یک تابع بازگشتی با  $n$  بار تکرار متصور شد (باس<sup>۷</sup>، ۲۰۰۲؛ به نقل از فتاحی و طالب‌زاده، ۱۳۹۶). هندسه فرکتال به‌عنوان شاخه‌ای جدید از علم هندسه، پدیده‌های طبیعی و اجسام پیچیده و نامنظم را مطالعه می‌کند و کمی‌سازی و شبیه‌سازی ریاضی آن‌ها را ارزیابی می‌کند (رودریگاز یتورب و رینالدو<sup>۸</sup>، ۱۹۹۷). هم‌چنین برخلاف هندسه اقلیدسی که اجسام و پدیده‌های طبیعی را منظم و دارای بعد صحیح در نظر می‌گیرد، کمی‌سازی در این روش بر مبنای بعد اعشاری است و علوم زمین گسترش یافته است (علمی‌زاده و ماه‌پیکر، ۱۳۹۶). سیستم‌های ژئومورفیک، سیستم‌های پیچیده و غیرخطی هستند که از متغیرهای متعدد و برهم‌کنش‌های متفاوت و هم‌چنین روابط غیرخطی تشکیل شده‌اند، و بسیاری از پدیده‌های طبیعی مانند الگوهای زهکشی، شبکه‌های رودخانه‌ای یا خطوط ساحلی الگوی فرکتالی دارند و شکل‌گیری و تحول آن‌ها را می‌توان با روابط ریاضی تبیین کرد (باس، ۲۰۰۲). بعد فرکتال با روش‌های مختلفی تعیین می‌شود؛ یکی از پرکاربردترین روش‌ها، روش شمارش جعبه‌ای است که به‌عنوان ابزاری در زمینه ریاضیات، جهت مطالعه سیستم‌های ژئومورفیک و به‌ویژه ژئومورفولوژی رودخانه‌ها کاربرد دارد.

پس از مطرح‌شدن مفهوم هندسه فرکتال توسط مندلبروت<sup>۹</sup> در سال ۱۹۸۲، بسیاری از محققان تحلیل فراکتال را در جهت بررسی توزیع شبکه‌های رودخانه‌ای بکار بردند. بررسی بعد فرکتالی خطوط سواحل غرب بریتانیا توسط آندرل<sup>۱۰</sup> (۱۹۹۶) نشان داد مقایسه ابعاد فرکتال‌ها که از روش‌های مختلف به‌دست آمده می‌تواند به‌صورت مسئله درآورده شود و خطاهایی که تعیین آن‌ها مشکل است، تخمین

1- Ijjasz-Vasquez  
2- Tadaki  
3- Xu  
4- Peckham  
2- Nikora

6- Ariza-Villaverde  
4- Baas  
6- Rodriguez and Rinaldo  
5- Mandelbrot  
10- Andrie



زده شوند. قابلیت هندسه فرکتالی را در توجیه رفتار فیزیکی و پویایی رودخانه توسط شن<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۲) مورد آزمون قرار دادند و ماهیت فرکتالی این فرایندها را نیز اثبات کرده‌اند. یک شبیه سلولی فرکتالی برای تعیین بعد فرکتالی شبکه‌های رودخانه‌ای توسط بی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۲) به کار گرفته شد و نتایج نشان داد که این روش می‌تواند تغییرات ویژه خواص فرکتالی پستی و بلندی‌ها را نشان دهد. بعد فرکتالی الگوی زهکشی سه رودخانه بزرگ توسط دونادیو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۴) مقایسه شد. نتایج آن‌ها نشان داد که بعد فرکتالی الگوی زهکشی رودخانه‌ها، محدوده‌های بین ۱/۰۸ تا ۱/۵ دارد. همچنین مطابق با وضعیت زمین‌شناختی و شاخص‌های ژئومورفیک هر حوضه، درجه فرکتالی پایین، غلبه تکتونیک فعال یا غیرفعال را بر سایر عوامل تأثیرگذار نشان می‌دهد، در حالی که درجه‌های فرکتالی بالاتر، نشانگر غلبه فرآیند فرسایشی در آن چشم‌انداز است. یک روش جدید جهت محاسبه ساختارهای فرکتالی از هر دو دیدگاه پیوستگی و گسستگی توسط فرناندز مارتینز و سانچز گرانرو<sup>۴</sup> (۲۰۱۵) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که امکان تعمیم این بعد در زمینه فضاهای اقلیدسی با ساختار طبیعی فرکتالی آن‌ها وجود دارد. ایشان تعاریفی از بعد فرکتالی برای یک ساختار فرکتالی در قالب روابط ریاضی ارائه دادند. یک تحقیق دوجانبه را در مورد خواص فرکتالی شبکه رودخانه و گروه زمانی جریان در رودخانه توسط فتاحی و جهانگیری (۱۳۹۳) انجام شد، نتایج به‌دست آمده نشان داد که این پدیده‌ها از الگوی یکسانی در رابطه با خواص فرکتال، پیروی می‌کنند، به طوری که بعد فرکتال برای هر دو پدیده به سمت مقادیر ثابت متمایل می‌گردند. با مطالعه ویژگی‌های زیرین رود با استفاده از نظریه هندسه فرکتال علمی‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) به این نتیجه رسیدند که بعد فرکتالی بالای رودخانه معرف تراکم زهکشی بیشتر و زمان کم‌تر برای رسیدن به جریان دائمی است. همچنین، هرچه بعد فرکتالی بیشتر باشد، اوج هیدروگراف رودخانه نیز به همان نسبت بیشتر خواهد بود. محاسبه بعد فرکتال با استفاده از روش شمارش جعبه‌ای در رودخانه مند در پژوهش قدم‌پور و همکاران (۱۳۹۹) در سه پیچانرود طویل و سیزده قوس از سیر رودخانه صورت گرفت و در ادامه بعد فرکتال با ضریب پیچشی مقایسه شد. نتایج همبستگی بالا (۰/۹۹-۰/۹۴) بین بعد فرکتال با ضریب پیچشی را نشان می‌دهد. بعد فرکتالی یا خودتشابهی رودخانه‌ها به ویژگی مربوط به مورفولوژی و شکل رودخانه اشاره دارد که در طول طبیعی رودخانه‌ها مشاهده می‌شود. به عبارتی بعد فرکتالی رودخانه‌ها نشان می‌دهد که ساختار و الگوهای مماندرها در رودخانه‌ها در مسیر رودخانه تکرار می‌شود و در واقع، بخش‌های کوچک‌تر رودخانه، از نظر ظاهری مشابه شکل بزرگ‌تر آن است. بر اساس مفهوم بعد فرکتالی می‌توان الگوهای تکراری در رتبه‌بندی آبراهه‌ها، پیچیدگی زاویه میان انشعابات، و تغییرات شکل مقطع رودخانه‌ها را به‌عنوان نمونه‌هایی از خودتشابهی دانست که توسط بعد فرکتالی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گیرد. تحلیل بعد فرکتالی در رودخانه‌ها می‌تواند در درک بهتر الگوهای هیدرولوژیکی و توسعه پیچان‌رودها کمک نماید. رودخانه قره‌سو یکی از رودخانه‌های مهم استان اردبیل است که از ارتفاعات سبلان و اطراف نیر سرچشمه گرفته و پس از زهکش نمودن دشت اردبیل، در نهایت به رودخانه مرزی ارس می‌پیوندد. رودخانه قره‌سو تأمین‌کننده آب شرب شهر اردبیل بوده و در دشت‌های اطراف اردبیل برای مصارف کشاورزی مورداستفاده قرار می‌گیرد. رودخانه مذکور هنوز به تکامل ژئومورفیک نرسیده و در مسیر خود دارای بی‌نظمی‌هایی است که فعالیت‌های اطراف رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پژوهش حاضر به منظور مطالعه الگوی فرکتالی رودخانه مذکور با روش شمارش جعبه‌ای انجام یافته و در این راستا سعی شده است خصوصیات مماندیری رودخانه با تئوری فرکتال کمی شده و مورد تحلیل قرار گیرد.

## مواد و روش

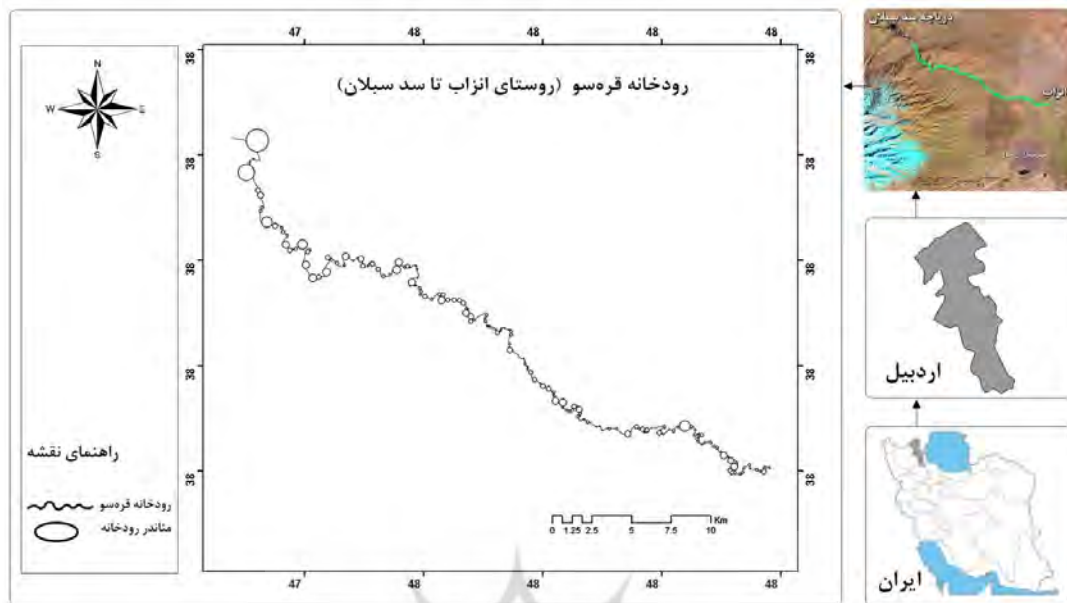
### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه قره‌سو مساحتی حدود ۴۱۰۰ کیلومترمربع را در بر می‌گیرد. این محدوده، از شرق با استان گیلان و از طرف شمال غرب و غرب با شهر مشکین‌شهر و از طرف جنوب نیز با محدوده خلخال و طارم مجاورت دارد. منطقه مورد مطالعه با مختصات جغرافیایی ۴۷ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی، در قسمت شمال غربی ایران واقع شده است. در شکل ۱، موقعیت حوضه آبریز رودخانه قره‌سو در نقشه استان اردبیل مشخص شده است.

1- Shen  
2- Bi

3- Donadio  
4- Fernández-Martínez and Sanchez- Granero

ارتفاع بلندترین نقطه قله کوه سبلان (نسبت به سطح دریا) برابر ۴۷۸۸ متر و ارتفاع پست‌ترین نقطه واقع در حوالی پل سامیان برابر ۱۲۰۰ متر است (افخمی و نصیری صالح، ۱۳۹۴). در این پژوهش، به‌منظور بررسی وضعیت پیچان‌رودی رودخانه قره‌سو، بازه‌ای به طول ۵۶/۳ کیلومتر انتخاب شد.



شکل ۱: موقعیت محدوده مورد مطالعه رودخانه قره‌سو در ایران و استان اردبیل و دایره‌های برازش شده بر منادره‌های رودخانه

Figure (1): Location map of the study area regarding Qareh-Sou River in Iran and Ardabil province and fitted circles on the meanders of the river

#### بررسی ویژگی‌های پیچان‌رودی

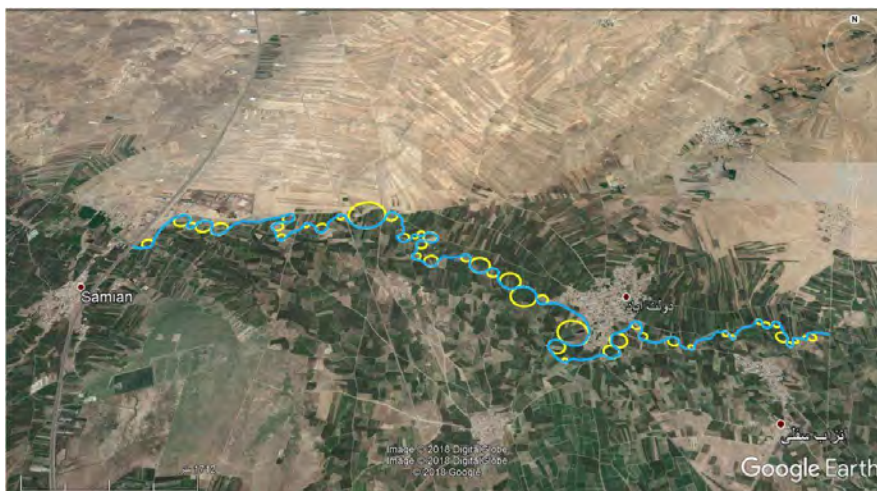
به‌منظور بررسی وضعیت پیچان‌رودی رودخانه قره‌سو از شاخص‌های ضریب‌خمیدگی به روش لئوپولد و زاویه مرکزی به روش کورنایس، استفاده شد. تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق، باندهای ۲، ۳ و ۵ مربوط به سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ در سال ۲۰۱۸ باندهای ۲، ۳ و ۵ است. در این پژوهش ابتدا تصحیح اتمسفری با روش FLAASH در نرم‌افزار ENVI5 صورت گرفت، سپس مسیر مورد نظر از منطقه مورد مطالعه (برابر با ۱۶/۷۰ کیلومتر) در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.3 ترسیم شد. مشخصات تصویر مورد استفاده در ارزیابی تغییرات رودخانه قره‌سو در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): مشخصات تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده در ارزیابی تغییرات رودخانه قره‌سو، اردبیل

Table (1): Characteristics of the used satellite image for evaluation of the changes in the Qareh-Sou River, Ardabil

ماهواره Landsat 8، سنجنده OLI - TIRS					
نام منطقه تصویر	مسیر	گذر	تاریخ اخذ	زاویه آزیموت خورشید	زاویه ارتفاع خورشید
اردبیل	۱۶۷	۳۳	۲۰۱۸/۰۱/۰۶	۱۵۷/۸۱۳	۲۵/۳۳۷

در ادامه، به‌منظور استخراج پارامترهای هندسی رودخانه، به‌صورت گرافیکی روی هر یک از منادره‌های رودخانه قره‌سو، دایره‌هایی مماس با پیچان‌رودها، ترسیم و اندازه‌گیری شد و مبنای محاسبات بعد فرکتالی قرار گرفت (شکل ۲). براساس دایره‌های مماس، اندازه طول قوس، طول موج و شعاع انحناء به‌دست آمد. پارامترهای فوق‌الذکر جهت محاسبه ضریب‌خمیدگی و زاویه مرکزی مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل (۲): نمایی از موقعیت رودخانه مورد مطالعه و مآندرها با استفاده از Google Earth  
Figure (2): A view of the study river and meanders' location using Google Earth

### زاویه مرکزی و شعاع پیچان رود

زاویه مرکزی به عنوان معیاری جهت تقسیم‌بندی و شناسایی میزان توسعه پیچان رودی رودخانه استفاده می‌شود. برای محاسبه آن ابتدا دایره‌هایی مماس بر مآندر رودخانه در نرم‌افزار ArcGIS ترسیم شد. سپس از مرکز هر یک از دایره‌های مماس بر قوس‌ها دو شعاع به نقاط عطف دایره‌ها با دره رودخانه رسم شد. زاویه ایجاد شده از محل اتصال دو شعاع، زاویه مرکزی و به شعاع مماس بر دایره قوس‌ها، شعاع دایره است که با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (اسفندیاری و همکاران، ۱۴۰۰):

$$A = \frac{180 \times L}{\pi \times R} \quad (1)$$

که در آن،  $A$  زاویه مرکزی،  $L$  طول قوس،  $R$  شعاع انحناء،  $\pi$  عدد پی است (مقصودی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۸۴).  
زاویه مرکزی پیچان رود به ۶ طبقه، مستقیم، شبه پیچان رود (۰-۴۱)، پیچان رود توسعه نیافته (۸۵-۴۱)، پیچان رود توسعه یافته (۱۵۸-۸۵)، پیچان رود زیاد توسعه یافته (۲۹۶-۱۵۸) و نعل اسبی (>۲۹۶)، طبقه‌بندی می‌شود.

### طول موج و طول دره

طول موج و طول دره رودخانه، دو پارامتر اصلی در تعیین ضریب خمیدگی رودخانه است. معمولاً بین این دو پارامتر همبستگی بالایی وجود دارد (مقصودی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۸۶). برای به دست آوردن طول موج روی نقشه محور مسیر رودخانه، ابتدا نقاط عطف یا نقاط تغییر انحنای محور رودخانه با دقت زیاد مشخص شد، سپس هر دو نقطه عطف مربوط به یک قوس به یکدیگر متصل و طول پاره‌خط به دست آمده (وتر مقابل به قوس محور رودخانه) با نرم‌افزار ArcGIS اندازه‌گیری شد. در ادامه طول دره نیز برای هر قوس با توجه به نقطه عطف یک قوس تا نقطه عطف قوس بعدی در روی مسیر رودخانه اندازه‌گیری شد.

### ضریب خمیدگی

شاخص ضریب خمیدگی یکی از معیارهای کمی است که در تقسیم‌بندی شکل رودخانه استفاده شد. این عامل نشان‌دهنده نسبت طول خط محور رودخانه به طول دره یا طول مآندری رودخانه است و میزان تکامل مآندر را نشان می‌دهد. ضریب خمیدگی اولین بار توسط لئوپولد و همکاران (۱۹۶۴)، برای طبقه‌بندی رودخانه‌ها تعریف شده است. رودخانه‌ها بر اساس مقدار ضریب سینوسیته به سه دسته ضریب خمیدگی کم (۱ تا ۱/۵)، متوسط (۲-۱/۵) و شدید (بیش‌تر از ۲) طبقه‌بندی شده است.  
ضریب خمیدگی رودخانه با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد (اسفندیاری و همکاران، ۱۴۰۱):

$$S = \frac{L}{\lambda/2} \quad (2)$$

که در آن،  $S$  ضریب خمیدگی،  $L$  طول قوس،  $\lambda$  طول موج است،



تقسیم‌بندی مسیر رودخانه قره‌سو براساس توپوگرافی و پوشش گیاهی

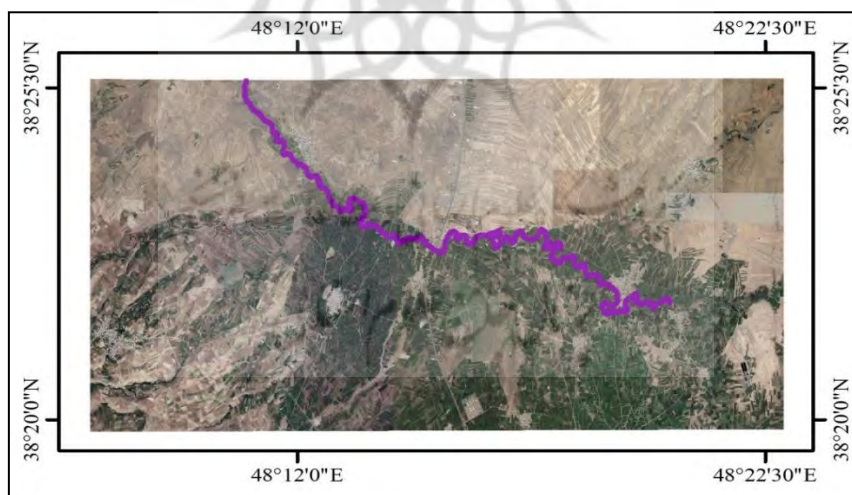
در پژوهش حاضر به منظور بررسی تأثیر دخالت انسان در مورفولوژی رودخانه قره‌سو، مسیر رودخانه به دو بازه تقسیم شد (شکل ۳).



شکل (۳): تقسیم‌بندی مسیر رودخانه براساس توپوگرافی منطقه

Figure (3): Classification of the river path based on topography

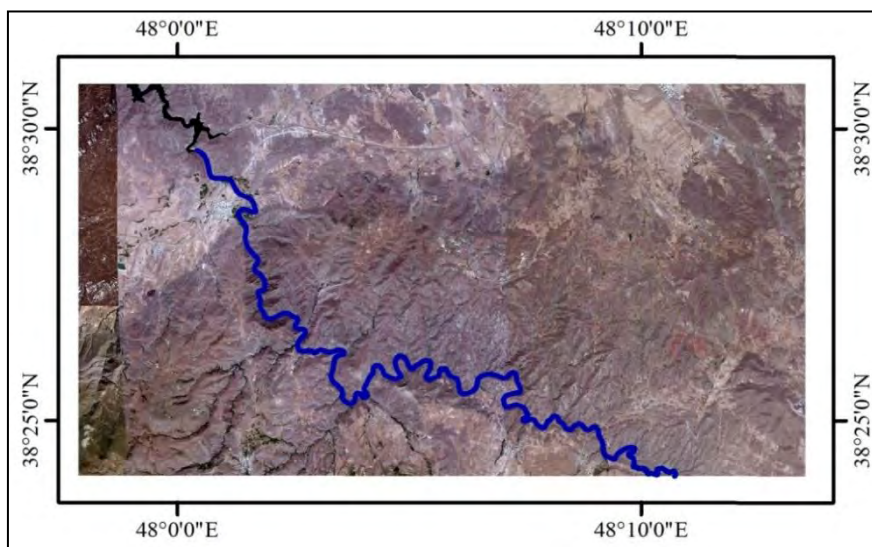
تقسیم بازه‌ها با توجه به توپوگرافی و کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه، انجام شد. بازه اول، محدوده روستای انزاب سفلی تا روستای طالب‌قشلاقی را شامل می‌شود. مسیر رودخانه در این بازه به وسیله زمین‌های کشاورزی، روستاها و مناطق مسکونی احاطه شده است (اسفندیاری درآباد و همکاران، ۱۳۹۹). دو پل بزرگ (پل دولت‌آباد و پل سامیان) و چند پل کوچک بتنی در بازه اول وجود دارد. عرض رودخانه در این بازه از ۲-۳۰ متر متغیر است و قسمت اعظم مسیر رودخانه دارای موتورهای پمپاژ آب به مزارع کشاورزی است (شکل ۴).



شکل (۴): بازه اول مسیر رودخانه قره‌سو (روستای انزاب تا روستای طالب‌قشلاقی)

Figure (4): The first section of the Qareh-Sou River (Anzab village to Taleb Qeshlaghi village)

بازه دوم، محدوده روستای طالب‌قشلاقی تا سد سبلان است. مسیر رودخانه بازه دوم در محدوده کوهستانی قرار دارد. کشاورزی و مناطق مسکونی در این بازه بسیار کم و پراکنده است و قسمت اعظم زمین‌های اطراف مسیر رودخانه را مناطق بکر و دست‌نخورده، تشکیل می‌دهند (شکل ۵).



شکل (۵): بازه دوم مسیر رودخانه قره‌سوی (روستای طالب‌قشلاقی تا سد سیلان)  
 Figure (5): The second section of the Qareh-Sou River (Taleb Qeshlaghi village to Sabalan dam)

#### محاسبه مؤلفه‌های فرکتال در مائدرهای رودخانه

در ادامه، بعد فرکتالی هر یک از بازه‌ها با استفاده از روش شمارش جعبه‌ای، محاسبه شد. روش‌های مختلفی جهت محاسبه بعد فراکتال (کلینکنبرگ<sup>۱</sup>، ۱۹۹۴) می‌توانند به کار گرفته شوند که از آن جمله می‌توان به بعد خود متشابهی (Ds)، بعد اندازه‌گیری شده (d) و بعد شمارش جعبه (Db) (گراسبرگر<sup>۲</sup>، ۱۹۸۳) اشاره نمود. یکی از پرکاربردترین روش‌ها، روش شمارش جعبه‌ای است (خسروی و همکاران، ۱۳۹۵؛ باسزوسکی<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۸؛ نگوین<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۲۲). محاسبه بعد فرکتالی از طریق شمارش امکان‌پذیر است، به‌صورتی که شبکه‌ای از خانه‌های مربع یا دایره شکل روی تصویر موردنظر قرار داده می‌شود، سپس اندازه شبکه با (s) مشخص می‌شود که بیان‌گر مقیاس است. در این پژوهش، دایره‌های مماس بر پیچان‌رودها که دارای اندازه‌های مختلف در طول بازه مورد مطالعه بودند به‌عنوان مبنای محاسبه فرکتال‌ها در نظر گرفته شدند و تعداد دایره‌هایی که در هر دامنه مساحتی قرار گرفته‌اند شمارش می‌شوند. قابل ذکر است که متوسط دامنه مساحت دایره‌های مماس از ۴۸۵۰ تا ۹۲۱۵۰ مترمربع بوده است. دامنه مساحتی بر اساس اختلاف حداکثر و حداقل مساحت دایره‌های مماس اندازه‌گیری شده تعیین شده و به‌ترتیب در ۸ تا ۲۲ دامنه دسته‌بندی شده است. حاصل این شمارش، (s) تعداد دایره‌ها در هر دامنه مساحتی با ابعاد مختلف خواهد بود، این روند با تغییر S به دایره‌هایی با ابعاد ریزتر (تا مساحت حداقل دایره مماس برابر ۴۸۵۰ مترمربع) و شمارش تعداد دایره‌های محاط بر پیچان‌رودها (N(s) تکرار می‌شود. در مرحله بعد با ترسیم N(s) در مقابل Log(1/s)، شیب خط مستقیم به بهترین وجه رابطه میان تعداد دایره‌ها و مساحت آن‌ها را به نمایش می‌گذارد که برابر بعد شمارش دایره (Db) است. بعد فراکتال از طریق رابطه (۳)، حاصل می‌شود (بشیری و همکاران، ۱۳۹۷؛ استروگاتز<sup>۵</sup>، ۲۰۱۸).

$$D = \frac{\text{Log}[N(s)]}{\text{Log}\left(\frac{1}{s}\right)} \quad (3)$$

شیب خط بعد مربوط به شمارش دایره (Db)، با استفاده از رابطه (۴)، استخراج می‌شود.

$$D_b = \frac{[\text{Log}(N(s_2)) - \text{Log}(N(s_1))]}{\text{Log}\left(\frac{1}{s_2}\right) - \text{Log}\left(\frac{1}{s_1}\right)} \quad (4)$$

1- Klinkenberg  
 2- Grassberger  
 3- Buczkowski

4- Nguyen  
 5 - Strogatz

در رابطه (۴)  $\frac{1}{S}$  برابر تعداد دایره‌ها در امتداد پایین شبکه است. در گام بعدی، منحنی آزمایشی (تجربی) با منحنی تئوری که مطابق با قانون فراکتال است، برازش داده می‌شود و میزان همبستگی بین تعداد دایره‌ها و اندازه مساحت دایره‌ها مشخص می‌شود.

$$N = sD \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $D$  بعد فراکتال و به عبارتی میزان همبستگی بین دو متغیر است. رابطه (۵) نمی‌تواند کلیه ویژگی‌های فرکتالی اشکال و پدیده‌ها را نشان دهد، بنابراین جهت تحلیل دقیق‌تر رابطه (۶)، مورد استفاده قرار گرفت.

$$N = \alpha sD + c \quad (6)$$

که در آن  $\alpha$  انحراف‌های رودخانه مورد بررسی بر اساس مساحت‌های مختلف دایره‌ها از قانون فراکتال را نشان می‌دهد.  $\alpha$  ویژگی انواع مختلف انحراف‌های رودخانه مورد بررسی از قانون فراکتال را بیان می‌کند (توماس<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۷)؛ که بر اساس قوانین ریاضی فراکتال‌ها باید تقریباً برابر با ۱ باشد (معاوی و علمی‌زاده، ۱۴۰۱؛ فرانکوزر<sup>۲</sup>، ۲۰۰۴؛ توماس و همکاران، ۲۰۰۷).  $c$  بیان‌گر میزان انطباق منحنی تخمین زده‌شده با منحنی واقعی بر روی محور  $Y$  است. جهت تخمین درست و قابل اطمینان بعد فراکتال محاسبه پارامتر  $c$  ضروری است. معادلات رگرسیون غیرخطی استفاده‌شده جهت برازش منحنی تخمین‌زده شده با منحنی واقعی شامل معادلات زیر است:

$$y = x^d \quad (7)$$

$$y = x^d + c \quad (8)$$

$$y = \alpha x^d \quad (9)$$

$$y = \alpha x^d + c \quad (10)$$

بهترین برازش با منحنی تجربی برای محاسبه  $\alpha$ ،  $d$  و  $c$  از رابطه (۱۰) به دست آمد. هم‌چنین دقت محاسبات فوق توسط ضریب تعیین در این تحقیق آزمون شد (رضایی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۱).

## نتایج

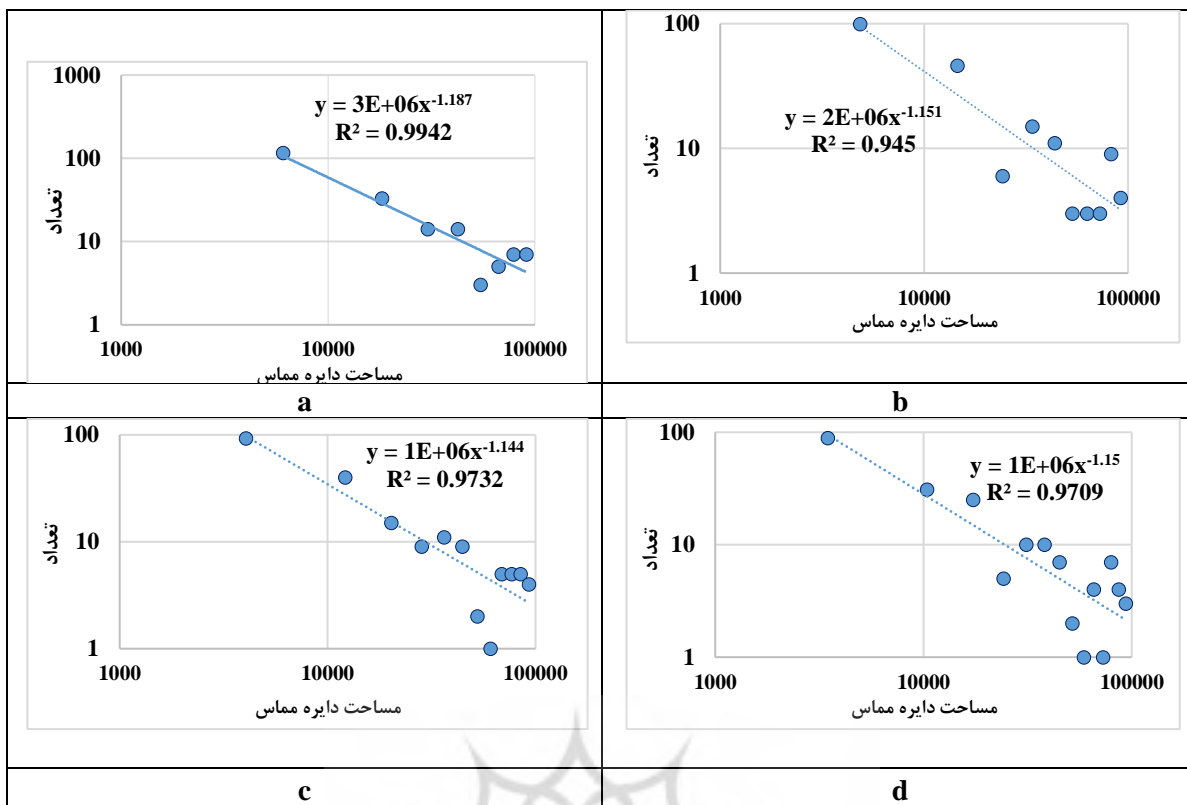
نتایج پژوهش حاضر در بخش‌های مربوط به محاسبه بعد فرکتالی، محاسبه زاویه مرکزی و محاسبه ضریب خمیدگی ارائه شده است.

### نتایج بعد فرکتالی

نتایج مربوط به محاسبه بعد فرکتالی به صورت نمودار لگاریتمی تعداد مربعات در مقابل اندازه مربعات در دسته‌های مختلف در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. در تعیین دسته‌ها ابتدا مساحت دایره‌های مماس بر پیچان‌رودها محاسبه شد و سپس مقادیر مساحت‌ها از ۴۸۵۰ تا ۹۲۱۵۰ مترمربع به هشت دسته مختلف تقسیم شدند. به عبارتی در هر دسته، مقادیر مساحت‌ها به دامنه‌های مختلف مساحتی تقسیم شدند. به عنوان مثال، در دسته اول، ۸ دامنه مساوی تعریف شد و در دسته دوم، ۱۲ دامنه مساوی تعیین شد (جدول ۲). در ادامه، تعداد دایره‌ها در هر دامنه شمارش شدند.

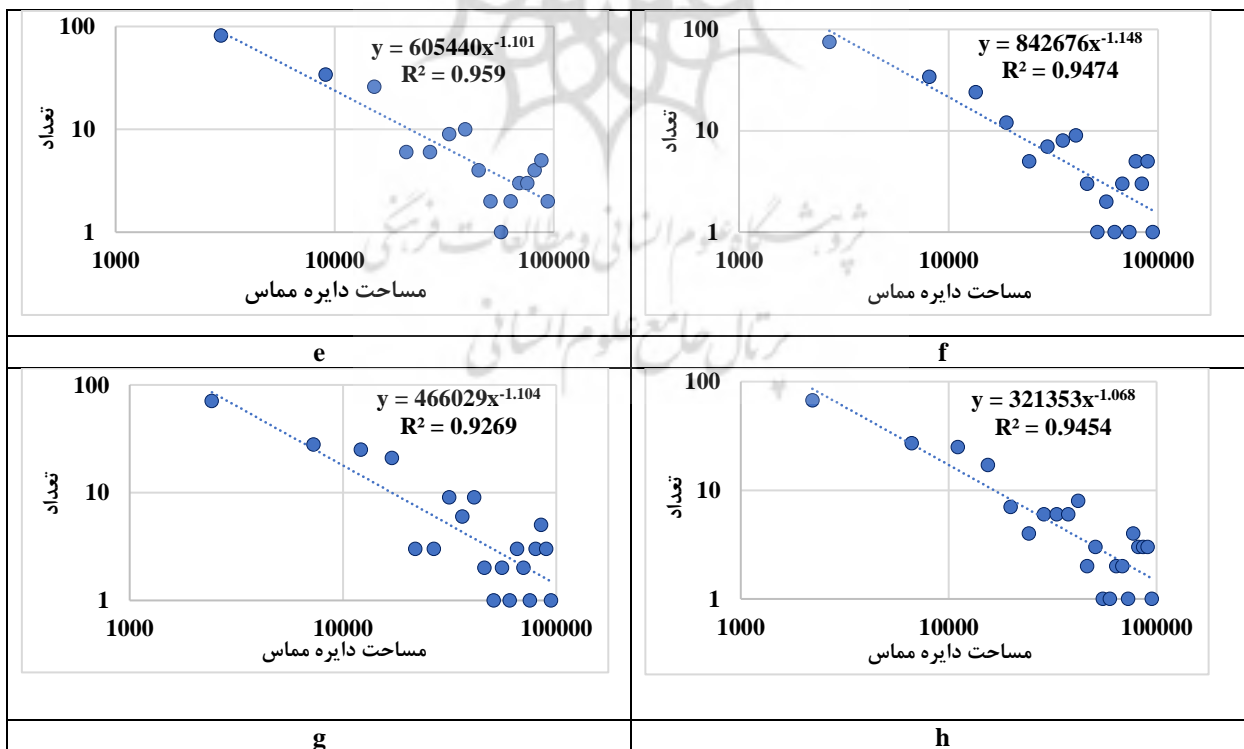
بر اساس اطلاعات ارائه شده در شکل‌های ۶ و ۷، می‌توان گفت که رابطه معنی‌داری میان تعداد دایره‌ها و مساحت دایره‌های مماس بر پیچان‌رود وجود دارد. به عبارتی پدیده پیچان‌رودی رودخانه مورد مطالعه بر اساس تعداد و اندازه مساحت دایره‌های مماس از الگوی فرکتالی پیروی می‌کند. قابل ذکر است که معنی‌داری روابط ارائه شده در سطح ۹۵ درصد ( $\alpha < 0.05$ ) نیز از نظر آماری مورد تأیید است. از طرف دیگر، محاسبات بعد فرکتال مربوط به دسته‌های مختلف بر اساس دامنه‌های مساحتی حاکی از وجود ماهیت فرکتالی پیچان‌رودهای منطقه مورد مطالعه است. در این راستا، محمود (۲۰۰۶) و چن (۲۰۲۰) بیان نموده است که اگر مقادیر عددی بعد فرکتال در خصوص پدیده‌های دوبعدی مکانی در محدوده بین ۲ تا ۳ قرار گیرند، می‌توان گفت که پدیده مورد مطالعه دارای ماهیت فرکتالی و خود تشابهی است.

هم‌چنین پارامترهای Slope، Intercept و dimension fractal محاسبه شده برای دسته‌های مذکور به همراه ضریب تعیین نمودار در جدول ۲ خلاصه شده است.



شکل (۶): نمودار لگاریتمی تعداد مربعات در مقابل اندازه مربعات در دسته اول با ۸ دامنه (a)، دسته دوم با ۱۰ دامنه (b)، دسته سوم با ۱۲ دامنه (c)، دسته چهارم با ۱۴ دامنه (d)

Figure (7): Logarithmic diagram regarding the number of squares and the size of squares in the first category with 8 domains (a), the second category with 10 domains (b), the third category with 12 domains (c), the fourth category with 14 domains (d)



شکل (۷): نمودار لگاریتمی تعداد مربعات در مقابل اندازه مربعات در دسته پنجم با ۱۶ دامنه (e)، دسته ششم با ۱۸ دامنه (f)، دسته هفتم با ۲۰ دامنه (g) و دسته هشتم با ۲۲ دامنه (h)

Figure (7) cont.: Logarithmic diagram regarding the number of squares and the size of squares in the fifth category with 16 domains (e), the sixth category with 18 domains (f), the seventh category with 20 domains (g) and the eighth category with 22 domains (h)



جدول (۲): پارامترهای محاسبه شده رابطه فرکتالی دسته اول تا هشتم دایره‌های مماس بر پیچان رودها

Table (4): Calculated parameters of the first to eighth categories

R <sup>2</sup>	dimension fractal	Slope	Intercept	تعداد دامنه	دسته
۰/۸۴	۲/۱۸۶	-۱/۱۸۶	۶/۵۱۸	۸	اول
۰/۷۶	۲/۱۵۱	-۱/۱۵۱	۶/۳۲۱	۱۰	دوم
۰/۷۴	۲/۱۴۴	-۱/۱۴۴	۶/۱۱۵	۱۲	سوم
۰/۷۱	۲/۱۴۹	-۱/۱۴۹	۶/۰۴۸	۱۴	چهارم
۰/۸۴	۲/۱۰۱	-۱/۱۰۱	۵/۷۸۲	۱۶	پنجم
۰/۷۴	۲/۱۴۸	-۱/۱۴۸	۵/۹۲۵	۱۸	ششم
۰/۷۱	۲/۱۰۳	-۱/۱۰۳	۵/۶۶۸	۲۰	هفتم
۰/۷۸	۲/۰۶۸	-۱/۰۶۸	۵/۵۰۶	۲۲	هشتم

بر اساس اطلاعات ارائه شده در جدول ۲، می‌توان گفت که دامنه مقادیر بعد فرکتالی از ۲/۰۶ تا ۲/۱۸ متغیر است که نشان‌دهنده ویژگی الگوی فرکتالی پیچان‌رودهای مورد مطالعه است. از نظر تجربی، اگر پدیده فراکتال در یک فضای دوبعدی در نظر گرفته شود، مقدار بعد فرکتالی محاسبه شده با روش شمارش جعبه مبنای تخمین مقادیر ابعاد فراکتالی است (فنگ و چن، ۲۰۱۰؛ چن، ۲۰۱۸). مقادیر ضریب تعیین بالا نیز که از نظر آماری در سطح ۹۵ درصد ارائه شده‌اند تأییدکننده ارتباط و خودتشابهی میان تعداد و مساحت دایره‌های مماس در منطقه مورد مطالعه است.

نتایج مربوط به دسته‌بندی مساحت دایره‌های برآزش شده و تعداد تکرار آن‌ها در هر دسته در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول (۳): دسته‌بندی مساحت دایره‌های مماس بر پیچان رودها و شمارش تعداد آن‌ها در هر دامنه از مساحت

Table (5): Classification of the fitted circles and calculation of the repetitions number

تعداد در دسته		دامنه														
اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم	
۱۱۶	۹۹	۹۳	۸۹	۸۲	۷۵	۷۱	۶۷	۱۲	۱۱۶	۹۹	۹۳	۸۹	۸۲	۷۵	۷۱	۶۷
۳۳	۴۶	۴۰	۳۱	۳۴	۳۴	۲۸	۲۷	۱۳	۳۳	۴۶	۴۰	۳۱	۳۴	۳۴	۲۸	۲۷
۱۴	۶	۱۵	۲۵	۲۶	۲۴	۲۵	۲۵	۱۴	۱۴	۶	۱۵	۲۵	۲۶	۲۴	۲۵	۲۵
۱۴	۱۵	۹	۵	۶	۱۲	۲۱	۱۷	۱۵	۱۴	۱۵	۹	۵	۶	۱۲	۲۱	۱۷
۳	۱۱	۱۱	۱۰	۶	۵	۳	۷	۱۶	۳	۱۱	۱۰	۶	۵	۳	۷	۱۶
۵	۳	۹	۱۰	۹	۷	۳	۴	۱۷	۵	۳	۹	۱۰	۹	۷	۳	۴
۷	۷	۳	۷	۲	۱۰	۸	۹	۱۸	۷	۷	۳	۷	۲	۱۰	۸	۹
۷	۳	۱	۲	۲	۴	۹	۶	۱۹	۷	۳	۱	۲	۲	۴	۹	۶
۹	۹	۵	۱	۱	۳	۲	۶	۲۰	۹	۵	۱	۱	۳	۲	۶	۲۰
۴	۴	۵	۴	۱	۱	۱	۸	۲۱	۴	۴	۵	۴	۱	۱	۱	۸
۷	۵	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲۲	۷	۵	۱	۱	۱	۲	۲	۲

با توجه به نتایج جدول ۳، کوچک‌ترین دامنه (دامنه اول در دسته اول) بیان‌گر بزرگ‌ترین مقیاس است و دامنه بیست و دوم در دسته هشتم، بیان‌گر کوچک‌ترین مقیاس مورد استفاده در بررسی فرکتال رودخانه قره‌سو است. هم‌چنین دامنه اول در هر دسته نمایش‌گر تعداد تکرار مئاندرهای کوچک است و آخرین دامنه در هر دسته نماد تعداد تکرار مئاندرهای بزرگ است. تعداد تکرار در دامنه‌های اول دسته‌ها نسبت به سایر دامنه‌ها به وضوح بیشتر است، با پیشروی دامنه‌ها، تعداد تکرار کاهش می‌یابد. لذا کاهش ضریب خمیدگی مئاندرها منجر به افزایش تعداد پیچ‌وخم‌هایی با ابعاد کوچک در رودخانه می‌شود.

بررسی و تحلیل پیچ‌وخم رودخانه در یک منطقه با توجه به وجود ویژگی خودتشابهی که دارند، منجر به پیش‌بینی خصوصیات و رفتارسنجی مئاندرها در منطقه خواهد شد که امکان تحلیل آن را فراهم خواهد نمود. بر اساس نتایج پژوهش، بعد فرکتال رودخانه قره‌سو از ۲/۱۸۶ تا ۲/۰۶۸ متغیر است. هم‌چنین نتایج محاسبه میزان ضریب تعیین بین پارامترها با دامنه مقادیر ۰/۷۱ تا ۰/۸۴ نشان می‌دهد

که بین ابعاد فرکتالی به دست آمده از رودخانه قره‌سو (رابطه میان تعداد و مساحت دایره مماس بر پیچان‌رودها در دامنه‌های مختلف مساحتی) رابطه معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد ( $P < 0.05$ ) وجود دارد.

#### زاویه مرکزی

نتایج محاسبه زاویه مرکزی کورنایس در پیچان‌رودهای بازه مورد مطالعه از رودخانه قره‌سو از روستای انزاب تا پل‌سامیان نشان داد که این پیچان‌رودها در طبقه پیچان‌رودی توسعه یافته و خیلی توسعه یافته قرار دارند. بر اساس نتایج محاسبه زاویه مرکزی، ۵۱/۱۱ درصد از پیچان‌رودها دارای زاویه مرکزی ۸۵-۱۵۸ درجه هستند که در دسته پیچان‌رود توسعه یافته قرار می‌گیرند. بقیه پیچان‌رودهای بازه مورد مطالعه (معادل ۴۹/۸۹ درصد) از نوع خیلی توسعه یافته به‌شمار می‌روند.

#### ضریب خمیدگی

بر اساس میانگین سینوسیته در مقاطع مورد مطالعه در رودخانه قره‌سو ۱/۱۷ است. بر اساس طبقه‌بندی مقدار ضریب خمیدگی رودخانه بازه مورد مطالعه (روستای انزاب تا پل‌سامیان) در طبقه رودخانه‌هایی با ضریب خمیدگی کم قرار دارد. اما مقدار حداکثر ضریب خمیدگی بازه مورد مطالعه (۱/۷۸)، وجود مئاندرهایی با ضریب خمیدگی بزرگ و توسعه یافته را نشان می‌دهد. مقدار حداقل، میانگین و حداکثر ضریب خمیدگی پیچان‌رودها در منطقه مورد مطالعه برابر ۰/۹۸، ۱/۱۷ و ۱/۷۸ محاسبه شد. بر اساس نتایج، ۹۵ درصد پیچان‌رودها دارای ضریب خمیدگی ۱-۱/۵ و ۵ درصد بقیه دارای ضریب خمیدگی ۲-۱/۵ است. کناره‌ها و بستر رودخانه قره‌سو در بازه روستای انزاب تا پل‌سامیان دچار تغییراتی مانند تثبیت دیواره‌های رودخانه در اثر احداث پل، ایجاد دیواره با مصالح، تغییر عرض رودخانه به‌منظور عبور دام و ادوات کشاورزی شده است که مانع گسترش مئاندرها شده است. هم‌چنین، در مواردی دخل و تصرف مسیر رودخانه باعث محدودیت گسترش مئاندرها شده است. یافته‌های پژوهش حاضر در راستای نتایج مطالعه مقصودی و همکاران (۱۳۸۹) و آرتورک و سسلی<sup>۱</sup> (۲۰۱۵) است که به تاثیر دخالت انسانی به‌ویژه تغییر کاربری اراضی بر تغییرات پلان رودخانه اشاره نموده‌اند. دخالت انسان در عمق و متعاقباً در تغییرات دبی جریان، باعث به‌هم خوردن تکامل طبیعی رودخانه شده و قوانین حاکم بر مورفولوژی آن را دستخوش تغییر می‌کند. در ادامه برای درک بهتر تغییرات حاکم بر بازه مورد مطالعه از رودخانه قره‌سو، مقادیر بعد فرکتالی در دو بازه روستای انزاب- روستای طالب‌قشلاقی و روستای طالب‌قشلاقی-سد سبلان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مقایسه شاخص‌های ژئومورفولوژی این دو بازه در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول (۴): مقایسه مقادیر بعد فرکتالی و شاخص‌های ژئومورفولوژی رودخانه قره‌سو در دو بازه اول و دوم

Table (10): Comparison of fractal dimension values and geomorphological indices of the first and second intervals in Qareh-Sou River

کاربری/وضعیت بازه‌ها	بعد فرکتالی	ضریب خمیدگی	زاویه مرکزی	آماره	تعداد مئاندر	بازه
مسکونی-کشاورزی	۲/۲۳	۱/۰۲	۵۰	حداقل	۱۳۵	اول
		۱/۱۷	۱۰۷/۱۵۱	میانگین		
		۱/۷۸	۱۹۸	حداکثر		
مرتعی/پوشش طبیعی کنار رودخانه‌ای	۱/۸۵	۰/۹۸	۳۲	حداقل	۶۵	دوم
		۱/۱۶	۱۰۲/۹۳	میانگین		
		۱/۶۶	۱۹۳	حداکثر		

مقادیر بعد فرکتالی بازه روستای انزاب- روستای طالب‌قشلاقی برابر ۲/۲۳ محاسبه شد که نشان می‌دهد این بازه دارای خاصیت خودتشابهی بیش‌تری است و می‌تواند دلیلی بر طبیعی بودن بازه مورد نظر باشد. قابل ذکر است که بازه مذکور در یک محدوده دشتی جریان دارد و رودخانه تکامل بیش‌تری پیدا کرده است. این در حالی است که در بازه روستای طالب‌قشلاقی-سد سبلان مقدار بعد

فرکتالی برابر ۱/۸۵ به دست آمد که می‌تواند به عبور رودخانه از مسیرهایی با شیب بیش‌تر مرتبط باشد که توسعه مئاندر را محدود نموده و باعث شده است که الگوی فرکتالی در بازه مذکور کم‌تر قابل مشاهده باشد.

### نتیجه‌گیری

بررسی و تحلیل پیچ‌وخم رودخانه در یک منطقه با توجه به وجود ویژگی خودتشابهی ذاتی آن‌ها، امکان استفاده از روش‌های نوین از جمله بعد فرکتالی را فراهم می‌نماید. این امر خود منجر به پیش‌بینی خصوصیات و رفتارسنجی مئاندرها در منطقه شده و امکان تحلیل مورفولوژی آن‌ها را فراهم می‌کند. در پژوهش حاضر محاسبه بعد فرکتالی مئاندرها و هم‌چنین تفسیر تغییرات مکانی پیچ‌وخم رودخانه قره‌سو در استان اردبیل مدنظر بوده است. بر اساس نتایج پژوهش، بعد فرکتال رودخانه قره‌سو از ۲/۰۶۸ تا ۲/۱۸۶ متغیر است. حداقل بعد فرکتال در دسته اول و حداکثر آن در دسته هشتم، مشاهده شد. نتایج محاسبه میزان ضریب تعیین بین پارامترها، عدم وجود رابطه معنی‌دار بین تعداد و مساحت دایره‌های مماس بر پیچان‌رودهای منطقه مورد مطالعه است. به‌علاوه، مقادیر کمی حاصل از محاسبه بعد فرکتالی رودخانه قره‌سو (روستای انزاب تا سد سبلان) مئاندرهای رودخانه مذکور را دارای ماهیت فرکتالی (خودتشابهی) معرفی نمود. یافته‌های حاصل از محاسبه بعد خودتشابهی نشان داد در دسته‌هایی که دارای دامنه‌های بیش‌تری باشد (مساحت کم‌تر دایره‌های مماس) نسبت به دسته‌های دارای دامنه‌های کم‌تر (مساحت بزرگ‌تر دایره‌های مماس)، میزان فرکتال بودن مئاندرها ملموس‌تر است و رودخانه دارای نظم هندسی بالاتری خواهد بود. باید اشاره شود که برخی دخالت‌های انسانی در مسیر رودخانه و نیز عبور رودخانه از مجاورت اراضی کشاورزی در برخی موارد باعث تغییر در عرض و عمق رودخانه و محدودیت در گسترش مئاندرها خواهد شد.

### منابع

- Amini, H., Esmali-Ouri, A., Mostafazadeh, R., Sharari, M., & Zabihi, M. (2019). Hydrological drought response of regulated river flow under the influence of dam reservoir in Ardabil Province. *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(2), 473-486. (In Persian)
- Andrle, R. (1996). The west coast of Britain: statistical self similarity vs. characteristic scales in the landscape. *Earth surface processes and landforms*, 21(10), 955-962.
- Ariza-Villaverde, A. B., Jiménez-Hornero, F. J., & de Ravé, E. G. (2013). Multifractal analysis applied to the study of the accuracy of DEM-based stream derivation. *Geomorphology*, 197, 85-95.
- Baas, A. C. (2002). Chaos, fractals and self-organization in coastal geomorphology: simulating dune landscapes in vegetated environments. *Geomorphology*, 48(1-3), 309-328.
- Bashiri, M., Kavousi Davoudi, S., & Afzali, A. (2018). The Study and Zonation of the Effect of Geologic and Geomorphic Characteristics on the Pattern of Sliding Zones using Fractal Geometry (Case Study: Tooye-Darvar watershed). *Hydrogeomorphology*, 5(14), 157-178. (In Persian)
- Bi, L., He, H., Wei, Z., & Shi, F. (2012). Fractal properties of landforms in the Ordos Block and surrounding areas, China. *Geomorphology*, 175, 151-162.
- Buczowski, S., Hildgen, P., & Cartilier L. (1998). Measurements of fractal dimension by box-counting: a critical analysis of data scatter. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 252(1-2), 23-34.
- Chen, Y. (2020). Fractal Modeling and Fractal Dimension Description of Urban Morphology. *Entropy*, 22(9), 961. <https://doi.org/10.3390/e22090961>
- Chen, Y. G. (2018). Logistic models of fractal dimension growth of urban morphology. *Fractals*, 26(03), 1850033.
- Donadio, C., Magdaleno, F., Mazzarella, A., & Mathias Kondolf, G. (2015). Fractal dimension of the hydrographic pattern of three large rivers in the Mediterranean morphoclimatic system: Geomorphologic interpretation of Russian (USA), Ebro (Spain) and Volturno (Italy) fluvial geometry. *Pure and Applied Geophysics*, 172, 1975-1984.
- Elmizadeh, H., Mah Ojer, O., Saadatmand, M., (2014). Investigating the Fractal Theory in the Geomorphology of Rivers (case study: Zarrineroud). *Quantitative Geomorphological Researches*, 3 (2), 130-141. (In Persian)
- Elmizadeh, H., Mahpeykar, O., (2017). Fractal Analysis in Zarrineroud River Using Box-Counting Method. *Geographic Space*. 17(59), 255-270. (In Persian)
- Esfandiyari Darabad, F., Bakhshandeh, R., Rahimi, M., Haji, K., & Mostafazadeh, R. (2021). Geomorphological classification and analysis of Hamzekhanloo River using the Rosgen classification model. *Hydrogeomorphology*, 7(25), 59-39. doi: 10.22034/hyd.2021.39301.1527 (In Persian)

- Esfandiyari darabad, F., Hamzeei, M., Alaei, N., & Mostafazadeh, R. (2021). Spatial Variations of Landscape Metrics in Riparian Area Vegetation of Gharesou River Reaches under the Effect of Different Land Uses, Ardabil Province. *Geographical Planning of Space*, 10(38), 219-234. (In Persian)
- Esfandiyari Darabad, F., Asghari Saraskanroud, S., Ghandai Asl, M., & Mostafazadeh, R. (2022). Analyzing the lateral changes of Aras River channel in Ardabil province using morphological indicators. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, doi: 10.30495/girs.2022.697516 (In Persian)
- Esfandiyari-darabad F, Mostafazadeh R, Abyat A, Naseri A. (2021) Determination of meanderPattern in Gharehsou river using Sinuosity Coefficients and Central Angle in Anzab-Samian Bridge reach. *Jouran of Heographical Sciences*, 21 (61): 119-131. (In Persian)
- Fattahi, M. H., Talebzadeh, Z., (2017). Synthetic Unit Hydrograph Based on Fractal characteristics of Watersheds, *Water Engineering*, 10(32), 87-97. (In Persian)
- Fattahi, M., & Jahangiri, H. (2014). Studying the relations between the fractal properties of the river networks and the flow time series. *Water Resources Engineering*, 7(20), 1-10. (In Persian)
- Feng, J., & Chen, Y. (2010). Spatiotemporal evolution of urban form and land-use structure in Hangzhou, China: evidence from fractals. *Environment and planning B: Planning and design*, 37(5), 838-856.
- Fernández-Martínez, M., & Sánchez-Granero, M. A. (2015). How to calculate the Hausdorff dimension using fractal structures. *Applied Mathematics and Computation*, 264, 116-131.
- Frankhauser, P. (2004). Comparing the morphology of urban patterns in Europe—a fractal approach. *European Cities—Insights on outskirts*, Report COST Action, 10, 79-105.
- Ghadampour, Z., Kashkooli pour, M., & Rafiee, M. R. (2020). Relation of Fractal Dimension and Sinuosity coefficient in Meandering River. *Journal of Hydraulics*, 15(1), 13-24.
- Grassberger, P. (1993). On efficient box counting algorithms. *International Journal of Modern Physics C*, 4(03), 515-523.
- Ijjasz-Vasquez, E. J., Bras, R. L., & Rodriguez-Iturbe, I. (1994). Self-affine scaling of fractal river courses and basin boundaries. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 209(3-4), 288-300.
- Khosravi, A., Sepehr, A., & Abdollahzadeh, Z. (2017). Fractal Behavior and Its Relationship with Hydromorphometric Characteristics over Catchments of Binaloud Northern Hillslopes. *Hydrogeomorphology*, 3(9), 1-20. (In Persian)
- Klinkenberg, B. (1994). A review of methods used to determine the fractal dimension of linear features. *Mathematical Geology*, 26, 23-46.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1964). 1964: *Fluvial processes in geomorphology*. San Francisco: Freeman. (522 pp.).
- Maghsoudi, M., Sharafi, S., Maghami, Y., (2010). The process of changes in the morphological pattern of Khorram Abad River using RS, GIS and Auto Cad. *The Journal of Spatial Planning*. 14 (3), 275-294. (In Persian)
- Mahmood, E. N. (2006). Applications of Fractal Dimension. *Iraqi Journal of Statistical Sciences*, 6(2), 54-73.
- Mandelbrot, B. B., & Mandelbrot, B. B. (1982). *The fractal geometry of nature* (Vol. 1). New York: WH freeman.
- Moavi, M., & Elmizadeh, H. (2023). Investigation of drainage network of Ramhormoz basin using Tokunaga model and fractal dimension correlation. *Hydrogeomorphology*, 9(33), 20-1. doi: 10.22034/hyd.2022.49711.1618 (In Persian)
- Mostafazadeh, R., Zabihi, M., & Adhami, M. (2017). Spatial and temporal analysis of monthly precipitation variations in Golestan Province using fractal dimension. *Watershed Engineering and Management*, 9(1), 34-45. doi: 10.22092/ijwmse.2017.108757. (In Persian)
- Nguyen, T. T., Hoffmann, E., & Buerkert, A. (2022). Spatial patterns of urbanizing landscapes in the North Indian Punjab show features predicted by fractal theory. *Scientific reports*, 12(1), 1819.
- Nikora, V. I. (1991). Fractal structures of river plan forms. *Water resources research*, 27(6), 1327-1333.
- Ozturk, D., & Sesli, F. A. (2015). Shoreline change analysis of the Kizilirmak Lagoon Series. *Ocean & Coastal Management*, 118, 290-308.
- Peckham, S. D. (1995). New results for self similar trees with applications to river networks. *Water Resources Research*, 31(4), 1023-1029.
- Rodriguez-Iturbe, I., & Rinaldo, A. (1997). *Fractal river basins: chance and self-organization*. Cambridge University Press.
- Shen, X. H., Zhou, L. J., Li, H. S., Shen, Z. Y., & Yang, S. F. (2002). A Successive shift box-counting method for calculating fractal dimensions and its application in identification of faults. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 76(2), 257-263.



- Strogatz, S. H. (2018). *Nonlinear dynamics and chaos with student solutions manual: With applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. CRC press.
- Tadaki, M., Brierley, G., & Cullum, C. (2014). River classification: theory, practice, politics. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 1(4), 349-367.
- Thomas, I., Frankhauser, P., & De Keersmaecker, M. L. (2007). Fractal dimension versus density of built up surfaces in the periphery of Brussels. *Papers in regional science*, 86(2), 287-308.
- Xu, T., Moore, I. D., & Gallant, J. C. (1993). Fractals, fractal dimensions and landscapes—a review. *Geomorphology*, 8(4), 245-262.
- Zhu, J., Yu, X., Li, J. & Zhang, Z., (2009). Improved method for computing fractal dimension of river networks based on image analysis and its application. *Geo -Information Science*, 11:610 -616.

