



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



Raoof Mostafazadeh^{1*}, Fariba Esfandyari Darabad¹, Ahmad Naseri³, Ahmad Abyat⁴, and Maryam Adhami⁵



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, Raoof; 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.

A B S T R A C T

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.

Receive Date: 2023/07/08

Accept Date: 2023/10/31

Available: 2024/01/20

* Corresponding Author: Raoof Mostafazadeh

E-mail: Raoofmostafazadeh@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, Omidiyeh Branch, Omidiyeh, 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.
- Fattah, 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^{*}، فربنا اسفندیاری‌درآباد^۲، احمد ناصری^۳، احمد عبیات^۴، مریم ادھمی^۵

این مقاله به صورت دسترسی باز و با لاینس CC BY NC کریتیو کامنز قابل استفاده است.



ارجاع به این مقاله:

مصطفی‌زاده، رئوف؛ اسفندیاری‌درآباد، فربنا؛ ناصری، احمد؛ عبیات، احمد؛ ادھمی، مریم. (۱۴۰۲). تعیین الگوی فرکتالی در بازه‌ای از رودخانه قره‌سو استان اردبیل. هیدرورژئومورفولوژی، ۱۰ (۳۷): ۹۳-۸۳.

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 پیچان روی رودخانه قره‌سوی 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 حداقل در دسته هشتم قرار دارد. بر اساس رابطه معنی‌داری ضریب تعیین میان تعداد و مساحت دایره‌های مماس بر پیچان رود با مقادیر ۰/۷۱ تا ۰/۸۴ می‌توان گفت که پیچان رودهای مورد مطالعه در بازه مورد مطالعه از رودخانه قره‌سو از الگوی فرکتالی و خودتشابهی پیروی می‌کند. مقادیر بعد فرکتالی بازه روتاستای انزاب- روتاستای طالب‌قلاقی 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 روتاستای طالب‌قلاقی- 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 مثاندر 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 مثاندرها شده است.

کلیدواژه‌ها

بعد فرکتال، شمارش جعبه‌ای، مورفولوژی رودخانه، رودخانه، قره‌سو، شمال‌غرب ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰

* نویسنده مسئول: رئوف مصطفی‌زاده

رایانامه: raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

۱- دانشیار گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب دانشگاه حقوق اردبیل، اردبیل، ایران

۲- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه حقوق اردبیل، اردبیل، ایران

۳- کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه حقوق اردبیل، 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^۱ 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 (اسفندياری 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 به عنوان یک ابزار مناسب جهت مدل‌سازی هندسه، تغییرات رودخانه‌ها و نیز بررسی فرایندهای فیزیکی درون رودخانه مطرح شده است (تاداکی^۲ و همکاران، ۲۰۱۴: ۳۵۰). هندسه فرکتال یکی از مهم‌ترین روش‌های ساختاری است که با تعیین بعد فرکتال ساختارهای خطی مانند گسل‌ها، آبراهه‌ها و مسیر پرپیچ و خرم رودخانه‌ها امکان تخمین خصوصیاتی مانند میزان جابجایی و شناسایی میزان تغییرات را فراهم می‌کند (شو^۳ و همکاران، ۱۹۹۳: ۲۴۷). اشیاء فرکتالی عموماً خود متشابه (تشابه تصادفی یا آماری) می‌باشند، به عبارت دیگر الگوی مشابه در اجزاء مختلف این اشیاء به چشم می‌خورد (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶؛ پکهام^۴، ۱۰۲۴: ۱۹۸۹). تمامی منحنی‌های پیچیده در طبیعت نیز ایده تکرار الگو را دارند، با این تفاوت عمدکه در بعضی از منحنی‌های طبیعی همانند رودخانه‌ها، الگوی تکرارشونده در سراسر رودخانه یکی نیست و در بخش‌های مختلف الگوی متفاوتی تکرار شده است (نیکورا^۵، ۱۹۹۱: ۳۵۶۳). علی‌رغم پیچیدگی و بی‌نظمی ظاهری برخی پدیده‌های طبیعی، هندسه درختان فرکتالی آن‌ها را می‌توان با استفاده از روابط منظم و بر اساس الگوی مشخصی تعریف نمود (آریزا ویلاورده^۶ 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 بُعد آن‌ها به صورت کسری بیان می‌شود.^۳ این اجسام حاصل یک فرآیند تکراری هستند و می‌توان برای آن‌ها یکتابع بازگشتی با n بار تکرار متصور شد (باس^۷، ۲۰۰۲؛ به نقل از فتاحی و طالب‌زاده، ۱۳۹۶).

هندسه فرکتال به عنوان 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 یتوب و رینالدو^۸، 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 برهمنکش‌های 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 به عنوان ابزاری درزمینه ریاضیات، جهت مطالعه سیستم‌های ژئومورفیک و به ویژه ژئومورفولوژی رودخانه‌ها کاربرد دارد.

پس از مطرح شدن مفهوم هندسه فرکتال توسط مندلبروت^۹ در سال ۱۹۸۲، بسیاری از محققان تحلیل فرکتال را در جهت بررسی توزیع شبکه‌های رودخانه‌ای بکار برندند. بررسی بعد فرکتالی خطوط سواحل غرب بریتانیا توسط آندرل^{۱۰} (۱۹۹۶) نشان داد مقایسه ابعاد فرکتال‌ها که از روش‌های مختلف به دست آمده می‌تواند به صورت 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- Andrle

زده شوند. قابلیت هندسه فرکتالی را در توجیه رفتار فیزیکی و پویایی رودخانه توسط شن^۱ و همکاران (۲۰۰۲) مورد آزمون قرار دادند و ماهیت فرکتالی این فرایندها را نیز اثبات کردند. یک شبیه سلولی فرکتالی برای تعیین بعد فرکتالی شبکه‌های رودخانه‌ای توسط بی^۲ 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^۳ و همکاران (۲۰۱۴) مقایسه شد. نتایج آن‌ها نشان داد که بعد فرکتالی الگوی زهکشی رودخانه‌ها، محدوده‌های بین ۱/۵ تا ۱/۰۸ 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^۴ (۲۰۱۵) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که امکان تعیین 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 دوچانبه را در مورد خواص فرکتالی شبکه رودخانه و گروه زمانی جریان در رودخانه توسط فتاحی و جهانگیری (۱۳۹۳) انجام شد، نتایج به دست 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 زرینه‌رود 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 هیدرولوگراف 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 مثاندرها 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 به عنوان 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 تأمین کننده آب شرب شهر اردبیل بوده و در دشت‌های اطراف اردبیل برای مصارف کشاورزی مورد استفاده 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 مثاندری رودخانه با تئوری فرکتال کمی شده و مورد تحلیل قرار گیرد.

مواد و روش

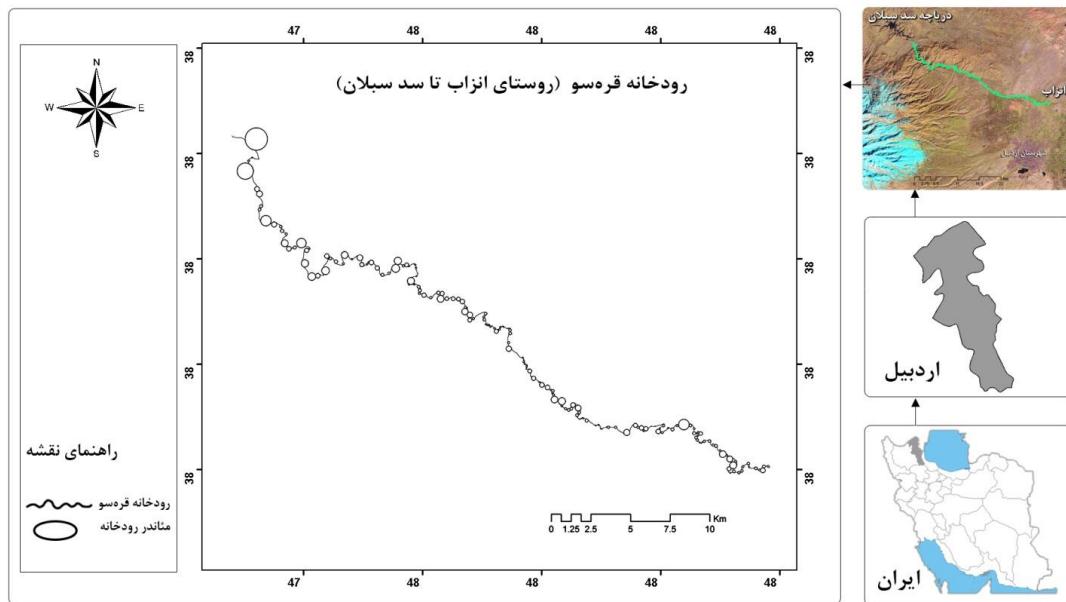
منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه قره‌سو مساحتی حدود ۴۱۰۰ کیلومترمربع را در بر می‌گیرد. این محدوده، از شرق با استان گیلان و از طرف شمال‌غرب 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، به منظور 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 میاندرهای 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

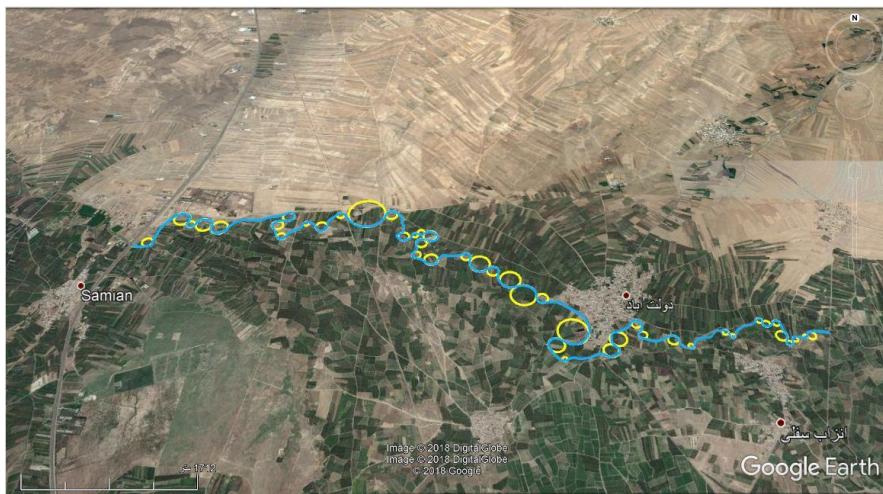
به منظور بررسی وضعیت پیچان‌رودی رودخانه قره‌سو از شاخص‌های ضریب خمیدگی به روش لئوپولد و زاویه مرکزی به روش کورنایس، استفاده شد. تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق، باندهای ۲، ۳ و ۵ مربوط به سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ در سال ۲۰۱۸ باند ۲، ۳ و ۵، است. در این پژوهش ابتدا تصحیح اتمسفری با روش FLAASH 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 ۸ Landsat - OLI - TIRS. سنجنده					
نام منطقه تصویر	مسیر	گذر	تاریخ اخذ	زاویه آزمیوت خورشید	زاویه ارتفاع خورشید
اردبیل	۱۶۷	۳۳	۲۰۱۸/۱/۰۶	۱۵۷/۸۱۳	۲۵/۳۳۷

در ادامه، به منظور استخراج پارامترهای هندسی رودخانه، به صورت گرافیکی روی هر یک از میاندرهای 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 انحنای به دست آمد. پارامترهای فوق الذکر جهت محاسبه ضریب خمیدگی و زاویه مرکزی مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل (۲): نمایی از موقعیت رودخانه مورد مطالعه و مئاندرها 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 پیچان‌رودی رودخانه استفاده می‌شود. برای محاسبه آن ابتدا دایره‌هایی مماس بر مئاندر 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 (اسفندياري و همكاران، ۱۴۰۰):

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

که در آن، A زاویه مرکزی، L طول قوس، R شعاع انحنای، π عدد پی است (مقصودی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۸۴). زاویه مرکزی پیچان‌رود به ۶ طبقه، مستقیم، شبیه پیچان‌رود (۴۱-۸۵)، پیچان‌رود توسعه نیافته (۴۱-۸۵)، پیچان‌رود توسعه یافته (۲۹۶-۱۵۸) و نعل اسبی (۱۵۸-۲۹۶) 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 پاره خط 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

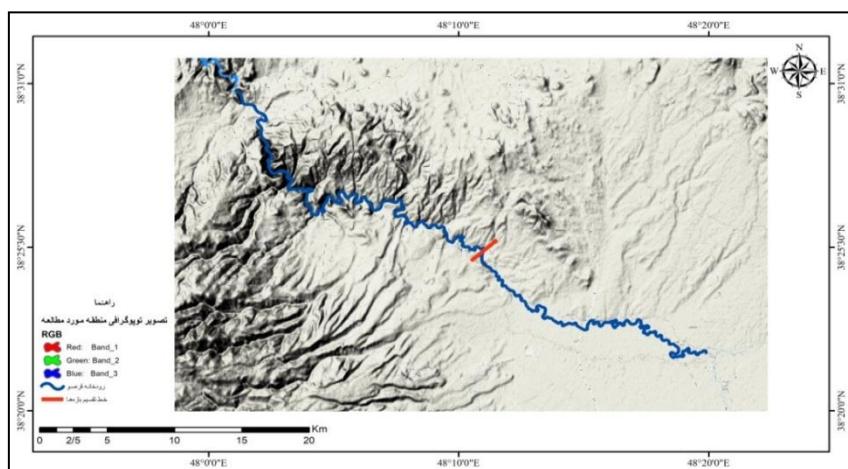
شاخص ضریب خمیدگی یکی از معیارهای کمی است که در تقسیم‌بندی شکل رودخانه استفاده شد. این عامل نشان‌دهنده نسبت طول خط محور رودخانه به طول دره یا طول مئاندری رودخانه است و میزان تکامل مئاندر را نشان می‌دهد. ضریب خمیدگی اولین بار توسط لئوپولد و همکاران (۱۹۶۴)، برای طبقه‌بندی رودخانه‌ها تعریف شده است. رودخانه‌ها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

ضریب خمیدگی رودخانه با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد (اسفندياري و همکاران، ۱۴۰۱):

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

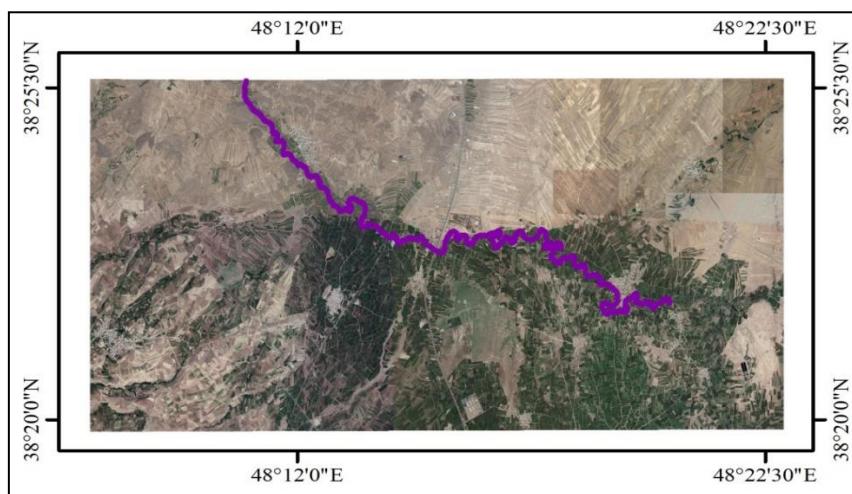
که در آن، S ضریب خمیدگی، L طول قوس، λ طول موج است،

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



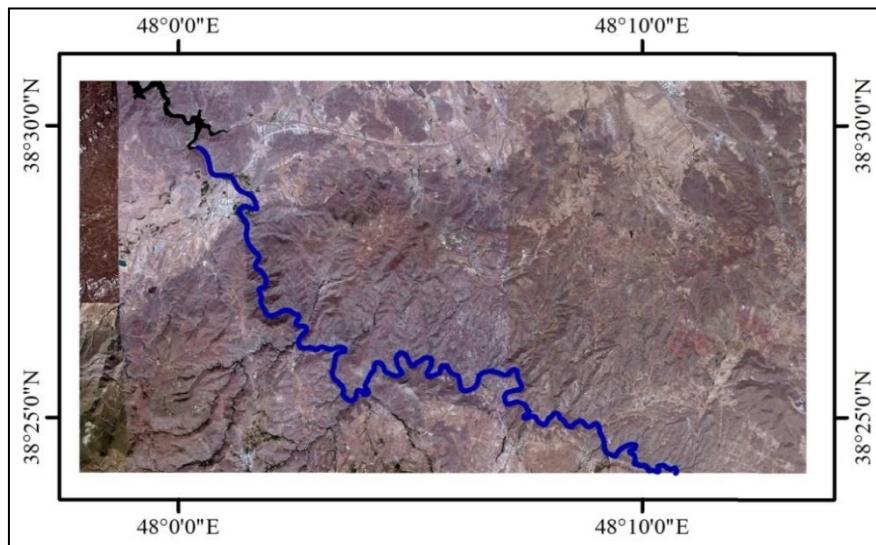
شکل (۳): تقسیم‌بندی مسیر رودخانه براساس توپوگرافی منطقه
Figure (3): Classification of the river path based on topography

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، روستاهای 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 سبلان)

Figure (5): The second section of the Qareh-Sou River (Taleb Qeshlaghi village to Sabalan dam)

محاسبه مؤلفه‌های فرکتال در مثاندرهای رودخانه

در ادامه، بعد فرکتالی هر یک از بازه‌ها با استفاده از روش شمارش جعبه‌ای، محاسبه شد. روش‌های مختلفی جهت محاسبه بعد فرکتال (کلینکنبرگ^۱، 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^۲، ۱۹۸۳) اشاره نمود. یکی از پرکاربردترین روش‌ها، روش شمارش جعبه‌ای است (خسروی و همکاران، ۱۳۹۵؛ باسزوسکی^۳ و همکاران، ۱۹۹۸؛ نگوین^۴ و همکاران، ۲۰۲۲). محاسبه بعد فرکتالی از طریق شمارش امکان‌پذیر است، به صورتی که شبکه‌ای از خانه‌های مربع یا دایره‌ای شکل روی تصویر موردنظر قرار داده می‌شود، سپس اندازه شبکه با (s) مشخص می‌شود که بیان گر مقیاس است. در این پژوهش، دایره‌های مماس بر پیچان‌رودها که دارای اندازه‌های مختلف در طول بازه مورد مطالعه بودند به عنوان 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 به ترتیب 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 (s) N تکرار می‌شود. در مرحله بعد با ترسیم (s) Log در مقابل (1/s) Log، شبی خط مستقیم به بهترین وجه رابطه میان تعداد دایره‌ها و مساحت آن‌ها را به نمایش می‌گذارد که برابر بعد شمارش دایره (Db) است. بعد فرکتال از طریق رابطه (۳)، حاصل می‌شود (بسیری و همکاران، ۱۳۹۷؛ استروگاتز^۵، ۲۰۱۸).

$$D = \frac{\log[N(s)]}{\log(\frac{1}{s})} \quad (3)$$

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

$$D_b = \frac{[\log(N(s_2)) - \log(N(s_1))]}{\log(\frac{1}{s_2}) - \log(\frac{1}{s_1})} \quad (4)$$

1- Klinkenberg
2- Grassberger
3- Buczkowski

4- Nguyen
5 - Strogatz

در رابطه (۴) $\frac{1}{\delta}$ 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 a انحراف‌های رودخانه مورد بررسی بر اساس مساحت‌های مختلف دایره‌ها از قانون فراکتال را نشان می‌دهد. α ویژگی انواع مختلف انحراف‌های رودخانه موردنظر بررسی از قانون فراکتال را بیان می‌کند (توماس^۱ و همکاران، ۲۰۰۷)؛ که بر اساس قوانین ریاضی فراکتال‌ها باید تقریباً برابر با ۱ باشد (معاوی و علمی‌زاده، ۱۴۰۱؛ فرانکوزر^۲، ۲۰۰۴؛ توماس و همکاران، ۲۰۰۷). c بیان‌گر میزان انطباق منحنی تخمین زده شده با منحنی واقعی بر روی محور Z است. جهت تخمین درست و قابل اطمینان بعد فراکتال محاسبه پارامتر c ضروری است. معادلات رگرسیون غیرخطی استفاده شده جهت برازش منحنی تخمین‌زده شده با منحنی واقعی شامل معادلات زیر است:

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

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

$$y = ax^d \quad (9)$$

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

بهترین برازش با منحنی تجربی برای محاسبه a ، 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

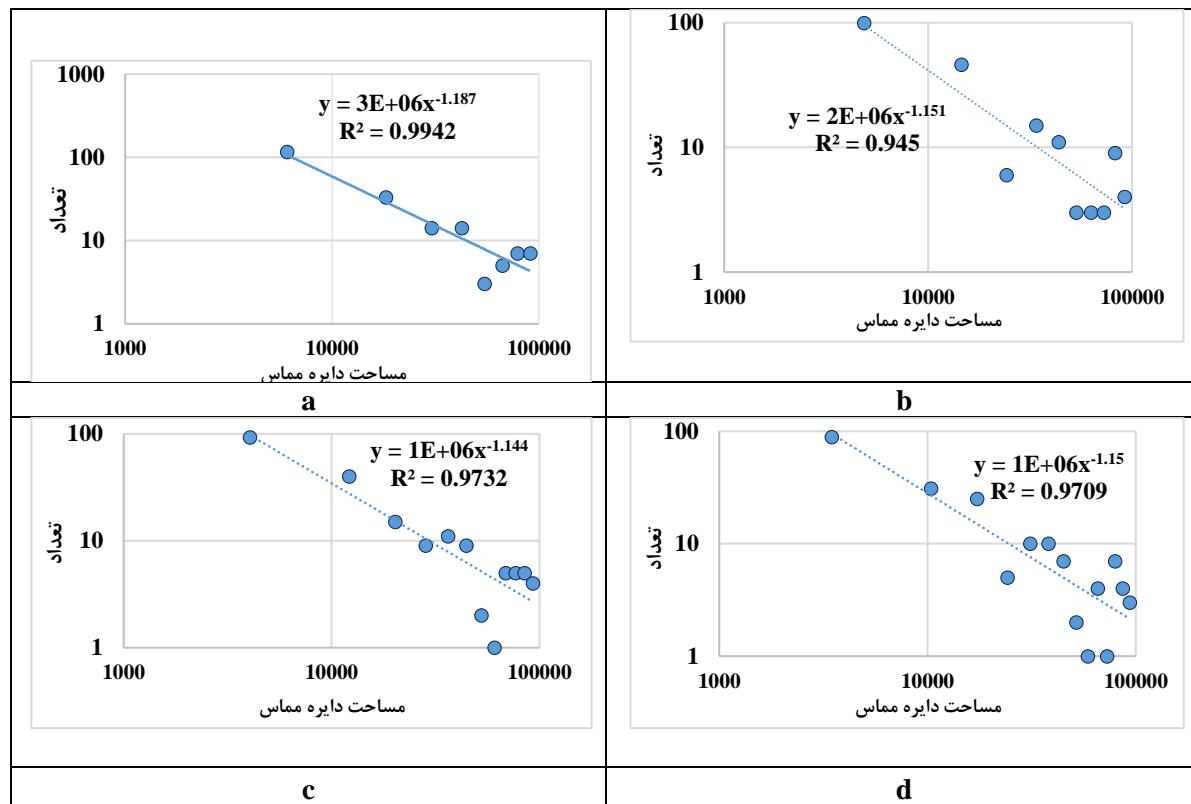
نتایج پژوهش حاضر در بخش‌های مربوط به محاسبه بعد فرکتالی، محاسبه زاویه مرکزی و محاسبه ضریب خمیدگی ارائه شده است.

نتایج بعد فرکتالی

نتایج مربوط محاسبه بعد فرکتالی به صورت نمودار لگاریتمی تعداد مربعات در مقابل اندازه مربعات در دسته‌های مختلف در شکل‌های ۶۰ 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.

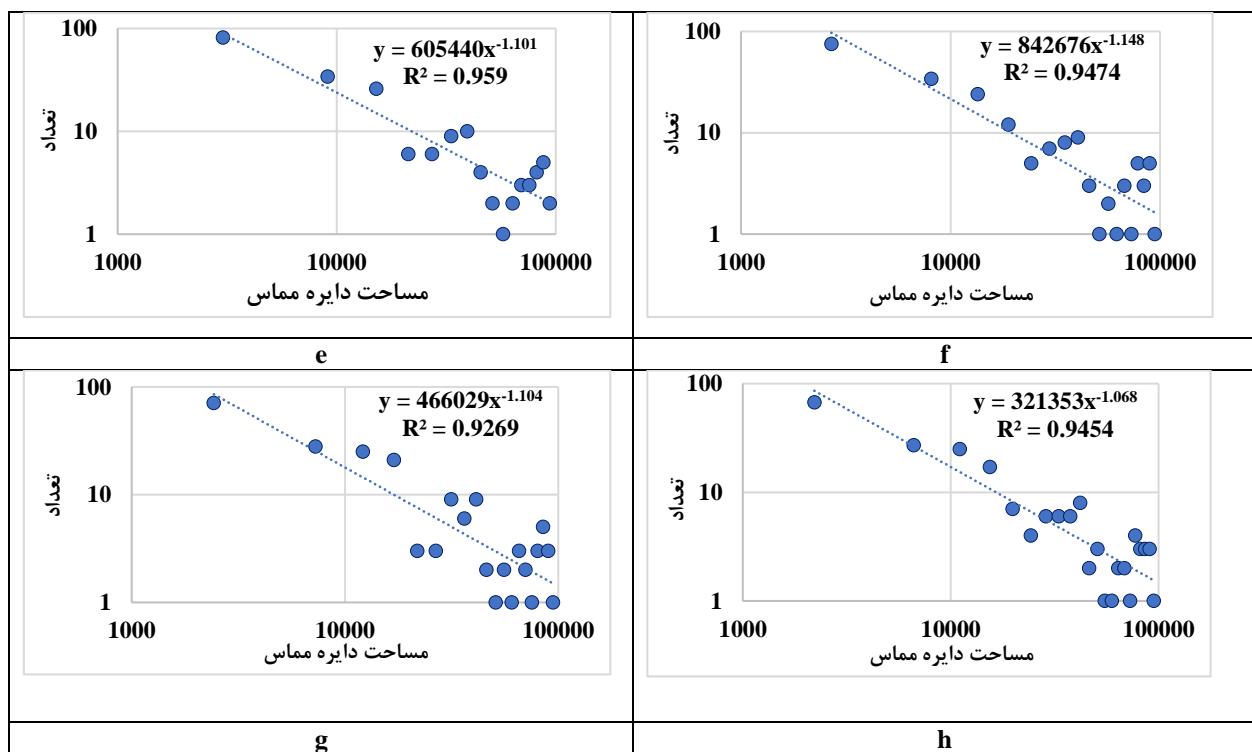
بر اساس اطلاعات ارائه شده در شکل‌های ۶۰ و ۷، می‌توان گفت که رابطه معنی‌داری میان تعداد دایره‌ها و مساحت دایره‌های مماس بر پیچان‌رود وجود دارد. به عبارتی پدیده پیچان‌رودی رودخانه مورد مطالعه بر اساس تعداد و اندازه مساحت دایره‌های مماس از الگوی فرکتالی پیروی می‌کند. قابل ذکر است که معنی‌داری روابط ارائه شده در سطح ۹۵ درصد ($\alpha < 0.05$) نیز از نظر آماری مورد تائید 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 و Intercept 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 (7): نمودار لگاریتمی تعداد مربعات در مقابل اندازه مربعات در دسته پنجم با ۱۶ دامنه (e)، دسته ششم با ۱۸ دامنه (f)، دسته هشتم 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 ²	dimension fractal	Slope	Intercept	تعداد دامنه	دسته
۰/۸۴	۲/۱۸۶	-۱/۱۸۶	۶/۵۱۸	۸	اول
۰/۷۶	۲/۱۵۱	-۱/۱۵۱	۶/۲۲۱	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 ۲/۱۸ تا ۲/۰۶ متغیر است که نشان‌دهنده ویژگی الگوی فرکتالی پیچان رودهای مورد مطالعه است. از نظر تجربی، اگر پدیده فرکتال در یک فضای دوبعدی در نظر گرفته شود، مقدار بعد فرکتالی محاسبه شده با روش شمارش جعبه مبنای تخمین مقادیر ابعاد فرکتالی است (فنگ ئو چن، ۲۰۱۰؛ چن، ۲۰۱۸). مقادیر ضریب تعیین بالا نیز که از نظر آماری در سطح ۹۵ درصد ارائه شده‌اند تائیدکننده ارتباط و خودتشابهی میان تعداد و مساحت دایره‌های مماس در منطقه مورد مطالعه است.

نتایج مربوط به دسته‌بندی مساحت دایره‌های برازش 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

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

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 مورداستفاده در بررسی فرکتال رودخانه قره‌سو است. همچنین دامنه اول در هر دسته نمایش گر 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 بهوضوح 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 قره سو (رابطه میان تعداد و مساحت دایره مماس بر پیچان رودها در دامنه های مختلف مساحتی) رابطه معنی داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P=0.05$) وجود دارد.

زاویه مرکزی

نتایج محاسبه زاویه مرکزی کورنایس در پیچان رودهای بازه مورد مطالعه از رودخانه قره سو از روستای انزاب تا پل سامیان نشان داد که این پیچان رودها در طبقه پیچان رودی توسعه یافته و خیلی توسعه یافته قرار دارند. بر اساس نتایج محاسبه زاویه مرکزی، $51/11$ درصد از پیچان رودها دارای زاویه مرکزی $85-158$ درجه هستند که در دسته پیچان رود توسعه یافته قرار می گیرند. بقیه پیچان رودهای بازه مورد مطالعه (معادل $49/89$ درصد) از نوع خیلی توسعه یافته به شمار می روند.

ضریب خمیدگی

بر اساس میانگین سینوسیته در مقاطع مورد مطالعه در رودخانه قره سو $1/17$ است. بر اساس طبقه بندی مقدار ضریب خمیدگی رودخانه بازه مورد مطالعه (روستای انزاب تا پل سامیان) در طبقه رودخانه هایی با ضریب خمیدگی کم قرار دارد. اما مقدار حداکثر ضریب خمیدگی بازه مورد مطالعه ($1/78$)، وجود مئاندرهایی با ضریب خمیدگی بزرگ و توسعه یافته را نشان می دهد. مقدار حداقل، میانگین و حداکثر ضریب خمیدگی پیچان رودها در منطقه مورد مطالعه برابر $0/98$, $1/17$ و $1/78$ محاسبه شد. بر اساس نتایج، 95 درصد پیچان رودها دارای ضریب خمیدگی $1-1/5$ و 5 درصد بقیه دارای ضریب خمیدگی $1/5-2$ است. کناره ها و بستر رودخانه قره سو در بازه روستای انزاب تا پل سامیان دچار تغییراتی مانند تثبیت دیواره های رودخانه در اثر احداث پل، ایجاد دیواره با مصالح، تغییر عرض رودخانه به منظور 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. یافته های پژوهش حاضر در راستای نتایج مطالعه مقصودی و همکاران (1389) و آزتورک و سسلی (2015) است که به تاثیر دخالت انسانی به ویژه تغییر کاربری اراضی بر تغییرات پلان رودخانه اشاره نموده اند. دخالت انسان در عمق و متعاقباً در تغییرات دبی جریان، باعث به هم خوردن تکامل طبیعی رودخانه شده و قوانین حاکم بر موورفولوژی آن را دستخوش تغییر می کند. در ادامه برای درک بهتر تغییرات حاکم بر بازه مورد مطالعه از رودخانه قره سو، مقادیر بعد فرکتالی در دو بازه روستای انزاب - روستای طالب قشلاقی و روستای طالب قشلاقی - سد سبلان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مقایسه شاخص های ژئومورفولوژی این دو بازه در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول (۱۰): مقایسه مقادیر بعد فرکتالی و شاخص های ژئومورفولوژی رودخانه قره سو 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

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

مقادیر بعد فرکتالی بازه روستای انزاب - روستای طالب قشلاقی برابر $2/23$ محاسبه شد که نشان می دهد این بازه دارای خاصیت خودتشابهی بیشتری است و می تواند 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 طالب قشلاقی - سد سبلان مقدار بعد

فرکتالی برابر ۱/۸۵ به دست آمد که می‌تواند به عبور رودخانه از مسیرهایی با شیب بیشتر مرتبه 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 پیچونخم 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 رفتارستنجی مئاندرها در منطقه شده و امکان تحلیل مورفولوژی آن‌ها را فراهم می‌کند. در پژوهش حاضر محاسبه بعد فرکتالی مئاندرها و همچنین تفسیر تغییرات مکانی پیچونخم 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 حداقل آن در دسته هشتم، مشاهده شد. نتایج محاسبه میزان ضریب تعیین بین پارامترها، عدم وجود رابطه معنی‌دار بین تعداد و مساحت دایره‌های مماس بر پیچان رودهای منطقه مورد مطالعه است. به علاوه، 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.
- Buczkowski, 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 Volturino (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 Hamzehkhanloo 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)
- Esfandyari 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)
- Esfandyari-darabad F, Mostafazadeh R, Abyat A, Naseri A. (2021) Determination of meander pattern in Gharehsou river using Sinuosity Coefficients and Central Angle in Anzab-Samian Bridge reach. *Jouran of Heographical Sciences*, 21 (61): 119-131. (In Persian)
- Fattah, M. H., Talebzadeh, Z., (2017). Synthetic Unit Hydrograph Based on Fractal characteristics of Watersheds, *Water Engineering*, 10(32), 87-97. (In Persian)
- Fattah, 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.