University of Sistan and Baluchestan

Geography and Development

Print ISSN: 1735 - 0735 Online ISSN: 2676-7791

Homepage: https://gdij.usb.ac.ir

Analysis of the Relationship Between Dominant Lithological Features and Sub-basins of Zagros Tectonic Unit and their Fractal Dimension

Gholam Hasan Jafari[1]✉, Kazhal Qafori[2]

1. Associate Professor of Geography, Faculty of Humanities, Zanjan University, Zanjan, Iran
✉ E-mail: jafarihas@znu.ac.ir
2. Master of Hydro of Geomorphology, Faculty of Humanities, Zanjan University, Zanjan, Iran
kazhal.qafoori@znu.ac.ir

How to Cite: Jafari, G; & Qafori, K. (2022). Analysis of the Relationship Between Dominant Lithological Features and Sub-basins of Zagros Tectonic Unit and their Fractal Dimension. *Geography and Development*, 20 (66), 161-176.

DOI: http://dx.doi.org/10.22111/J10.22111.2022.6692

Received:
7 February 2021
Received in revised form:
12 May 2021
Accepted:
23 October 2021
Published online:
15 January 2022

Keywords:
Fractal dimension, Morphotectonic Unit, Zagros, Horton-Strahler, Bifurcation ratio.

ABSTRACT

Fractal geometry is a suitable instrument for studying and understanding the complex behavior of a river. The most important feature of the fractal is its dimension. The purpose of this essay is to evaluate the fractal dimension on a large scale in the morphotectonic unit of Zagros and its analysis using fractal geometry theory and Horton-Strahler ranking.For this purpose the waterways were ranked by Horton and Strahler method. It seems that the fractal dimension less than 1 and more than 2 is due to the tectonics and lithology of the sub-basin, which has caused the sub-basins not to reach balance in terms of fractal dimension at the surface or line.Of course, this does not mean that the fractal dimension follows the basin lithology in an abstract way, but it indicates that the spatial distribution of lithology in a basin along with morphotectonic evidence such as faults can get the fractal dimension of the basin out of balance. An exact connection cannot be estimated between the fractal dimension and the physiographic characteristics of the sub-basins of the Zagros morphotectonic unit.

© the Author(s). **Publisher**: University of Sistan and Baluchestan

Extended Abstract

1. Introduction

Fractal geometry is a suitable instrument for studying and understanding the complex behavior of a river. The most important feature of the fractal is its dimension. Rivers are one of the best geomorphic landscapes of the earth, through which the connection between the system of powers and the forms of roughness can be clearly understood. Understanding river processes and river controlling factors is important from diverse perspectives *(Di Giulio et al., 2003: 145);* because these system of powers are exclusively involved in determining the dimensions and shapes of waterways *(Chorly et al., 2013: 163)*. The purpose of this essay is to evaluate the fractal dimension on a large scale in the morph tectonic unit of Zagros to determine whether the fractal laws that have been estimated so far in small sub-basins can be adapted and re-read with a wide range such as the Zagros.

2. Research Methodology

To study the fractal dimension of Zagros geomorphic unit, first the layer of main rivers and waterways was prepared from 30*30 DEM extracted from SRTM satellite. In Arc GIS10.3 software, the whole geomorphic unit was first divided into eleven water basins of Hillah, Jarahi and Zohreh, all of Mehran, Karkheh, Karun,

Tashtak-e Bakhtegan, West Frontier, Mand, Abarku-Sirjan, Bandar Abbas Sedich, Gavkhoni and Hamoon Jazmourian. These water basins were then divided into 272 sub-basins. In the next step, the waterways were ranked by Horton and Strahler method. One of the physical parameters of the drainage basin is the bifurcation ratio, which determines the amount of elongation or roundness of the drainage basin. In general, the bifurcation ratio of the drainage basin is calculated based on ranked waterway networks*(Tabatabaei etal.,2013: 13).* (Equation 1)

Equation 1:

$$BR= (\frac{n1}{n2}+\frac{n2}{n3}+\frac{n3}{n4}+...+\frac{ni-1}{ni})*\frac{1}{i-1}$$

"BR" is the Bifurcation Ratio of rivers in the basin and "i" is the category number of the main river of the basin *(Alizadeh, 2014: 491)*. Also, the longitudinal ratio of the river was obtained from Equation (2).

Equation 2:

$$Rr = \frac{r1}{ri+1}$$

"Rr" is the longitudinal ratio of a river; "ri" is the average length of waterways of rank "i". These amounts, regardless of rank, are almost constant for drainage networks *(Elmizadeh et al., 2014: 135).* The fractal dimension (D) for the drainage network is estimated from Equation (3) using the bifurcation ratio and the longitudinal ratio of the river *(Turcotte, 2007: 304).*

Equation 3:

$$D = \frac{\ln Br}{\ln Rr}$$

After calculating the fractal dimension in Excel, the calculations result in Arc GIS software was classified into three groups of less than 1, 1 to 2 and more than 2. Finally, the relevant map for Zagros morph tectonic unit was drawn and analyzed.

3. Research Findings

The value of the fractal dimension is variable between 1 and 2; this means that in these conditions, the fractal is neither in the line nor in the plane, but is a line that has expanded on the surface *(Elmizadeh et al., 2014: 138).* According to Equation (3), the fractal dimension of all sub-basins of Zagros morph tectonic unit was estimated. The estimated numbers are classified and interpreted in three categories: below one, one to two and more than two. In this morph tectonic unit, the predominant fractal dimension is 1-2 between, this fractal dimension indicates that the waterway network has reached balance. Basins those are different from other basins in terms of lithology, roughness and tectonics. The surfaces close to the main Zagros fault and in the southern part of the Zagros are folded, have a fractal dimension of more than 2 and their fractal is in line; this means that the waterways network has not reached balance in the line; The reason can be attributed to the lithology and tectonics of that region. In fact, where lime lithology is thicker and has a wider and more monolithic area, the sub-basin fractal is at the surface, meaning that the waterways has not reached balance in terms of surface dispersion. According to the findings of Jafari and Bakhtiari (2017), the asymmetry of waterways and the predominance of alluvial materials in the north of the river of the Lamerd sub-basins indicate the captivity or diversion of the river in the Quaternary. In the Maharlu Lake basin in Shiraz, the existence of a low slope along with the changes controller of the Quaternary base level inside the basin (Maharlu Lake) has caused fractals in the line and prevented the waterways from reaching balance in this basin.

4. Conclusion

The results show that the predominant fractal dimension of the sub-basins of this unit, with a final rank of seven, is 1-2 between. This morph tectonic unit has reached evolution in terms of basins and a lower percentage of sub-basins have fractals in line. It seems that the fractal dimension less than 1 and more than 2 is due to the tectonics and lithology of the sub-basin, which has caused the sub-basins not to reach balance in terms of fractal dimension at the surface or line. Of course, this does not mean that the fractal dimension follows the basin lithology in an abstract way, but it indicates that the spatial distribution of lithology in a basin along with morph tectonic evidence such as faults can get the fractal dimension of the basin out of balance. An

exact connection cannot be estimated between the fractal dimension and the physiographic characteristics of the sub-basins of the Zagros morph tectonic unit.

Keywords: Fractal dimension, Morph tectonic Unit, Zagros, Horton-Strahler, Bifurcation ratio.

5. Refrences

- Adel, I., Samad, M (2004). Fractal dimension and hydrological characteristics of watersheds, , First National Congress of Civil Engineering, PP.1-6. https://civilica.com/doc/326/
- Aghanabati, S. A (2004). Geology of Iran, Published: Geological Survey and Mineral Exploration Organization, P. 640. https://www.gisoom.com/book/11083834
- Alaei Taleghani, M., (2017), Geomorphology of Iran, Qoms Publications, P.360. https://www.adinehbook.com/gp/product/9645516625
- Alizadeh, A (2015), Principles of Applied Hydrology, Imam Reza University Press, Mashhad, P. 942. https://www.gisoom.com/book/11153333
- Alizadeh, H., Mahpaykar, O., Saadatmand, M (2014). Investigation of Fractal Theory in River Geomorphology (Case Study: Zarrinehrood), Quantitative Geomorphological Research, 3(2), PP.130-141. http://www.geomorphologyjournal.ir/article_77956.html
- Arian, M., Hashemi, S. A., (2008), Zagros tectonic seismic zoning, Basic Sciences (Islamic Azad University), 18(69), PP.63-76. https://www.sid.ir/Fa/Journal/ViewPaper.aspx?id=86124
- Baas‹ A. C. (2002). Chaos‹ fractals and self-organization in coastal geomorphology: simulating dune landscapes in vegetated environments. Geomorphology, 48(1-3), PP.309-328. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002Geomo..48..309B
- Bertoni, R. (2011). Limnology of rivers and lakes. Institute of Ecosystem Study/Encyclopedia of life support systems/UNESCO-EOLSS, 10, PP.1- 68. http://www.ise.cnr.it/crypta/ebooks/Limnology%20%28Bertoni%202011%29%20UNESCO%20-%20EOLSS.pdf
- Bez, N., & Bertrand, S. (2011). The duality of fractals: roughness and self-similarity. Theoretical Ecology, 4(3), PP. 371-383. https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1007/s12080-010-0084-y
- Chorley, Richard J., Schumm, Stanley A. and Sugden, David E (2013). Geomorphology (slope, waterway, coastal and wind processes), Translator Ahmad Motamed, Samt Publications, 3, P.456. https://bookroom.ir/book/54289
- Cleveringa, J., & Oost, A. P. (1999). The fractal geometry of tidal-channel systems in the Dutch Wadden Sea. Geologie en Mijnbouw, 78(1), PP. 21-30. https://link.springer.com/article/10.1023/A:1003779015372
- Di Giulio, A., Ceriani, A., Ghia, E., & Zucca, F. (2003). Composition of modern stream sands derived from sedimentary source rocks in a temperate climate (Northern Apennines, Italy). Sedimentary Geology, 158(1-2), PP. 145-161. https://www.researchgate.net/publication/223249539_Composition_of_modem_stream_sands_derived_from_sedimentary_source_rocks_in_a_temperate_climate_North_Apennines_Italy
- Fattahi, M. H., Talebzadeh, Z., (2017), Production of artificial unit watercolor based on fractal characteristics of the watershed, Journal of Water Resources Engineering, Islamic Azad University, Marvdasht Branch, 10, PP.87-97. http://wej.miau.ac.ir/article_2304.html
- Fattahi, M. H., Talibzadeh, Z (2017). Relationship between catchment compaction coefficient and its fractal properties, Iranian Water Resources Research, 13(1), PP.191-203. https://www.sid.ir/fa/Journal/ViewPaper.aspx?id=312333
- Ghasemifar, E., Naserpour, S (2014). Climate zoning of Zagros region. Sepehr Geographical Information Quarterly, 23(89), PP.54-60. http://ensani.ir/fa/article/346200
- Jafari, H., Fatemeh, B (2017). Geomorphological evidence of captivity and Quaternary diversion of rivers (Case study of Ghezel-Ozan basin), Quantitative Geomorphological Research,consecutive,23,PP.105-116. http://ensani.ir/fa/article/381229
- Jafari, H., Mohamadi, H (2019). Investigation of Zanjan Talkheh-Rud Chaotic Behavior in the Quaternary, Geographical space of Ahar Azad University, 66, PP.185-205. http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-2895-fa.html
- Jafari, H., Mohamadi, H (2019). Investigation of turbulent behavior of geomorphological processes in Ghezel-Ozan catchment, Geography and environmental hazards, Ferdowsi University of Mashhad, 8, PP.1-23. http://geoeh.um.ac.ir/article_32993.html

- Karam, A., (2010), Chaos theory, fractal and nonlinear system in geomorphology, Journal of Natural Geography, Number 8, PP.67-82. https://www.sid.ir/fa/Journal/ViewPaper.aspx?id=123336
- Khanbabaei, Z., Karam, A., & Rostamizad, G. (2013). Studying relationships between the fractal dimension of the drainage basins and some of their geomorphological characteristics. International Journal of Geosciences, 4(03), PP. 636- 642. https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=31782
- Mandelbrot, B. (1967). How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. Science, 156(3775), PP. 636-638. https://science.sciencemag.org/content/156/3775/636
- Mohammedi Khoshuei, M., Ekhtesasi, M. R., (2019), Comparison of fractal dimension and geomorphological features in the management of Aqda watershed. Journal of Environmental Erosion Research, Hormozgan University, 9, PP. 62-84. https://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-493-fa.html
- Phillips, J. D. (1993). Interpreting the fractal dimension of river networks. Fractals in geography, 7, PP.142-157. https://www.researchgate.net/publication/292415293_Interpreting_the_fractal_dimension_of_river_networks
- Rodriguez-Iturbe, I., & Rinaldo, A. (2001). Fractal river basins: chance and self-organization. Cambridge University Press. P.547. https://www.nhbs.com/fractal-river-basins-book
- Sivakumar, B., & Berndtsson, R. (2010). Advances in data-based approaches for hydrologic modeling and forecasting. World Scientific, P.441. https://www.amazon.com/Advances-Data-Based-Approaches-Hydrologic-Forecasting/dp/9814307971
- Tabatabaei, M., Solaimani, K., & Noroozi, A. A. (2013). Ordering Discontinuous Digital Stream Networks in a Watershed by Developing an Object-oriented Model in the GIS Environment. ENVIRONMENTAL SCIENCES, 10(1), PP. 13-28. http://envs.sbu.ac.ir/article/viewFile/2390/2386
- Turcotte, D. L. (2007). Self-organized complexity in geomorphology: Observations and models. Geomorphology, 91(3-4), PP.302-310. https://www.researchgate.net/publication/223363088_Selforganized_complexity_in_geomorphology_Observations_and_models
.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

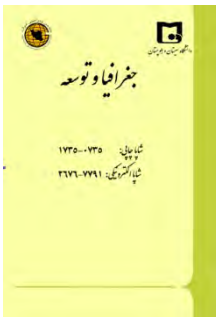
جغرافیا و توسعه
شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۰۷۳۵ شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۷۷۹۱
https://gdij.usb.ac.ir

تحلیل ارتباط ویژگی‌های لیتولوژی غالب و گسل‌های زیرحوضه‌های واحد زمین‌ساختی زاگرس و بُعد فراکتالی آن‌ها

مقاله پژوهشی

دکتر غلامحسن جعفری[1*]، کژال غفوری[2]

جغرافیا و توسعه، شمارهٔ ۶۶، بهار ۱۴۰۱
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹
تاریخ بازنگری داوری: ۱۴۰۰/۰۲/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱
صفحات : ۱۷۶-۱۶۱



واژه‌های کلیدی:
بُعد فرکتال، واحد زمین‌ساخت، زاگرس، هورتن- استرالر، نسبت انشعاب.

چکیده

هندسهٔ فرکتال ابزار مناسبی برای بررسی و شناخت رفتار پیچیدهٔ رودخانه است. مهم‌ترین ویژگی فرکتال، بُعد آن است. هدف این مقاله تعیین بُعد فرکتال و تحلیل آن با استفاده از تئوری هندسهٔ فرکتال در زیرحوضه‌های واحد زمین‌ساختی زاگرس در غرب و جنوب‌غربی ایران است. برای بررسی بُعد فرکتال واحد ژئومورفیک زاگرس، ابتدا لایهٔ رودخانه‌های اصلی و آبراهه‌ها از DEM ۳۰*۳۰ مستخرج از ماهوارهٔ SRTM تهیه شد. کل واحد ژئومورفیک ابتدا به یازده حوضهٔ آبی حله، جراحی و زهره، کل مهران، کرخه، کارون، طشک بختگان، مرزی غرب، مند، ابرقو- سیرجان، بندرعباس سدیج، گاوخونی و هامون جازموریان تقسیم شد. سپس این حوضه‌های آبی به ۲۷۲ زیرحوضه تقسیم شد. در گام بعدی رتبه‌بندی آبراهه‌ها به روش هورتن و استرالر انجام گرفت. به کمک طول شاخه‌ها و نسبت انشعاب، بُعد فرکتال تمامی زیرحوضه‌ها محاسبه شد. بُعد فرکتال ۳۰ زیرحوضه در این واحد مورفوتکتونیک ۱-۰ (۱۱/۰۲٪)، ۱۸۵ زیرحوضه ۲-۱ (۶۸/۰۱٪) و ۵۷ حوضه بیشتر از ۲ (۲۰/۹۵٪) برآورد شد. تجزیه‌وتحلیل بُعد فرکتال بین ۲-۱ زیرحوضه‌ها با رتبهٔ نهایی هفت، در غالب زیرحوضه‌ها، نشان می‌دهد که این واحد زمین‌ساخت ازنظر حوضه‌ای به تکامل رسیده است و درصد کمتری از زیرحوضه‌ها، بُعد فرکتال کمتر از یک و بیشتر از ۲ دارند. بُعد فرکتال کمتر از ۱ و بیش از ۲ می‌تواند انعکاسی از وضعیت تکتونیک و لیتولوژی زیرحوضه‌ها باشد که مانع از به‌تعادل‌رسیدن بُعد فرکتال زیرحوضه‌ها، در سطح یا خط شده‌اند. تجزیه‌وتحلیل نهایی زیرحوضه‌ها در واحد زمین‌ساختی زاگرس نشان می‌دهد که نمی‌توان رابطهٔ معنی‌داری بین بُعد فرکتالی و خصوصیات فیزیوگرافی زیرحوضه‌ها برآورد کرد.

مقدمه

اصولاً هر پدیده در جهان دارای نظمی است؛ یعنی در دل هر بی‌نظمی ظاهری، نظمی وجود دارد که با تغییر دیدگاه ما قابل‌دسترسی است *(کرم و صابری، ۱۳۹۴: ۱۵۴)*. فراکتال‌ها اشیاء یا فرایندهایی هستند که در مقیاس‌های مکانی یا زمانی متعدد، شکل ظاهری یا رفتار یکسانی از خود بروز می‌دهند. این چنین اشیاء یا فرایندهایی با چنان پیچیدگی‌هایی در مقیاس‌های بسیارکوچک هستند که هندسهٔ اقلیدسی قادر به تفسیر آن نیست *(فتاحی و طالب‌زاده، ۱۳۹۵: ۸۸)*. هندسهٔ فراکتال، زبان ریاضی است که می‌تواند به‌صورت ابزاری کمّی برای بررسی ژئومورفولوژی حوضهٔ آبخیز و مدل‌سازی بسیاری از پدیده‌های پیچیدهٔ طبیعی استفاده شود. درحقیقت پدیدهای ژئوفیزیکی مانند حوضه‌های آبخیز، پدیده‌هایی فراکتالی هستند که الگوی فراکتالی در رفتارهای آن‌ها قابل‌بررسی است. شناخت عوامل ژئومورفومولوژیکی و عملکرد آن‌ها، اهمیت بالایی در مدیریت حوضه دارد *(محمدی‌خشویی و اختصاصی، ۱۳۹۸: ۶۲)*.

شکل فیزیوگرافی زیرحوضه‌ها وضعیت فرسایش و تخلیه مواد را مشخص می‌سازد؛ به‌گونه‌ای‌که در حوضه‌های کشیده، تخلیهٔ مواد بیشتر در خط اتفاق می‌افتد تا در سطح و در حوضه‌های پهن برعکس *(جعفری و محمدی، ۱۳۹۸: ۹)*.

۱- دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران (نویسنده مسئول) jafarihas@znu.ac.ir
۲- کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی،گروه جغرافیا، دانشکدهٔ علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران kazhal.qafoori@znu.ac.ir

در حوضهٔ کشیده (تمرکز فرسایش در خط) نیروها متمرکز می‌شوند و حفر را بیشتر انجام می‌دهند؛ اما در شکل پهن تمرکز فرسایش در سطح اتفاق می‌افتد که به پخش انرژی در سطح و تخلیهٔ کم مواد در عمق منجر می‌شود. زمانی که از تکامل یا تعادل حوضه بحث به میان می‌آید و فرکتال بین ۱-۲ برای حوضه برآورد می‌شود. بیانی از شکل حوضه و به‌گونه‌ای ضریب ناهمواری آن است.

مهم‌ترین خصوصیات فراکتال‌ها، خودتشابهی[1] و بُعد غیرصحیح[2] آن‌هاست. در فرکتال‌های خود تشابه، می‌توان آن‌ها را بارها و بارها بزرگ‌نمایی کرد و بعد از هر مرحله، همان شکل را دید. هندسهٔ کلاسیک با اشیایی با ابعاد صحیح سروکار دارد: نقاط صفربُعدی، خطوط یک‌بُعدی، منحنی‌ها و شکل‌های صفحه دوبُعدی مانند مربع‌ها و دایره‌ها و اجسام سه‌بُعدی مانند مکعب‌ها و کره‌ها. بااین‌حال، بسیاری از پدیده‌های طبیعی را می‌توان با استفاده از ابعادی بین دو عدد حسابی بهتر توصیف کرد؛ بنابراین، درحالی‌که یک بُعد یک خط مستقیم یک است، بسته به اینکه فضا به همان اندازه پیچ خورده و منحنی بسته شود، یک منحنی فراکتال بُعدی بین یک تا دو خواهد داشت. هرچه فرکتال مسطح یک‌صفحه را پر کند، بعد آن به دو نزدیک می‌شود *(Bez and Bertrand, 2011: 347)*. به‌همین‌ترتیب، ابعاد فراکتال یک حوضهٔ ناهموار با شیب تند بین دو تا سه است. بُعدِ فراکتال یک حوضه با شیب متوسط و ملایم، به دو نزدیک می‌شود؛ اما اگر حوضه با شیب تند، شامل یک سطح ناهموار متشکل از تعداد زیادی برجستگی‌های متوسط، بُعدی نزدیک به سه خواهد داشت. رودخانه‌ها از بهترین مناظر ژئومورفیکی زمین هستند که از طریق آن‌ها پیوند بین سیستم نیروها و اشکال ناهمواری به‌وضوح قابل‌درک است. شناخت فرایندهای رودخانه‌ای و عوامل کنترل‌کنندهٔ رودخانه‌ها از دیدگاه‌های گوناگون‌اهمیت دارد(*Di Giulio, 2003:145*)؛

زیرا همین سیستم نیروها هستند که به‌طور انحصاری در تعیین ابعاد و اشکال آبراهه‌ها دخالت دارند *(چورلی[3] و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۶۳)*. در دیدگاه سیستمی، سیستم‌های ژئومورفیک (ژئوسیستم) سیستم‌هایی پویا با رفتار پیچیدهٔ غیرخطی هستند. پاسخ‌های غیرخطی این سیستم‌های باز در شرایط نامتعادل، ساختارها و الگوهای ناپایدار را در آستانه‌های تعادلی رقم می‌زند *(کرم، ۱۳۸۹: ۶۷ و ۷۳)*. واژهٔ فرکتال توسط مندلبورت[4] (۱۹۶۷) برای توصیف اشیاء هندسی پیچیده که درجه بالایی از خود تشابهی دارند، ابداع شد. یک فرکتال، شکل هندسی چندپاره یا ناهموار است که می‌تواند به بخش‌هایی تقسیم شود که هرکدام از آن‌ها (حداقل به‌طور تقریبی) یک کپی تعادلی ازلحاظ اندازه، از کل شکل است *(Baas, 2002: 311)*.

در فرکتال‌ها این بُعد فرکتال است که مهم است و نه مقیاس، زیرا در هراندازه‌ای، بُعد فرکتال، بیانگر خاصیت اصلی فرکتال است. همین امر کاربرد فرکتال‌ها را در علوم امروزی زیاد کرده‌است. تعیین بُعد فرکتالی اهمیت زیادی در شناخت رفتار و پیش‌بینی تغییرات مسیر رودخانه دارد. با اندازه‌گیری و محاسبهٔ بُعد فرکتالی می‌توان اطلاعات زیادی دربارهٔ طول انشعابات و سرچشمه‌های یک رود و همچنین شاخه‌هایی از رودخانه که امکان بررسی آن‌ها به هر دلیل وجود ندارد، به‌دست آورد *(Phillips, 1993:144)*.

با توجه به این مقدمه هدف این مقاله ارزیابی بُعد فرکتالی در یک سطح وسیع از واحد مورفوتکتونیک زاگرس است تا مشخص شود، قوانین فرکتالی که تاکنون در زیرحوضه‌های کوچک برآورد شده با یک محدودهٔ وسیع همانند زاگرس قابلیت انطباق و بازخوانی را دارد یا خیر.

1-Self-similarity
2-Non-integer Dimension
3-Chorly
4-Mandelbrot

پیشینهٔ تاریخی

کلیورینگا و اوست[1] (۱۹۹۹) شبکه‌های زهکشی و کانال‌های جزر و مدی را برمبنای هندسهٔ فرکتال برای مطالعهٔ خطوط ساحلی دریای وادن دسته‌بندی کردند و اهمیت مؤلفه‌های نامنظم، شامل روابط بین انتقال رسوب، شیب کلی و تکتونیک را برآورد کردند. رودریگز و رینالدو[2] (۲۰۰۱) کاربردهای فرکتال برای حوضه‌های رودخانه‌ای را براساس الگوهای زهکشی سیستم هورتن بررسی کردند؛ نتایج دلالت بر وجود یک ماهیت آشوبناک، در فرایندهای هیدرولوژیکی دارد. سیواکومار و برناردسون[3] (۲۰۱۰) روش پیش‌بینی غیرخطی را براساس نظریهٔ آشوب برای حوضهٔ رودخانهٔ کوآرسی واقع در شمال برزیل بررسی کردند؛ نتایج حاکی از نزدیکی مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر مشاهداتی است. خان بابایی و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی رابطهٔ بین ابعاد فرکتال حوضه‌های زهکشی و برخی از خصوصیات ژئومورفولوژیکی آن‌ها دریافتند که ابعاد فرکتالی حوضه‌های آبخیز روابط معنی‌داری با عواملی مانند شکل، مساحت، نسبت دوگانه و نسبت طول در حوضه‌های آبخیز دارد. عدل و مهروند (۱۳۸۳) روابط بین بُعد فرکتالی حوضه‌های آبخیز را با برخی از پارامترهای ژئومورفولوژیک و هیدرولوژیک مانند میزان انشعاب و شاخه‌بندی شبکهٔ رودخانه‌ها، زمان تمرکز حوضه، گستردگی و مقدار پیک جریان برآورد کردند. از دید ریاضی حوضه‌هایی که بُعد فرکتالی آن‌ها یکسان است، معادل متریک یکدیگر هستند و براساس این تحقیقات، تشابه زیادی بین مشخصات ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی حوضه‌ها وجود دارد. بُعد فرکتالی حوضه‌های آبخیز برخلاف بُعد هندسی نمایانگر خصوصیات ژئومورفولوژیکی آن‌ها بوده و جزئیات شکل و پیچیدگی‌های موجود در آن با محاسبهٔ این بُعد معلوم می‌شود.

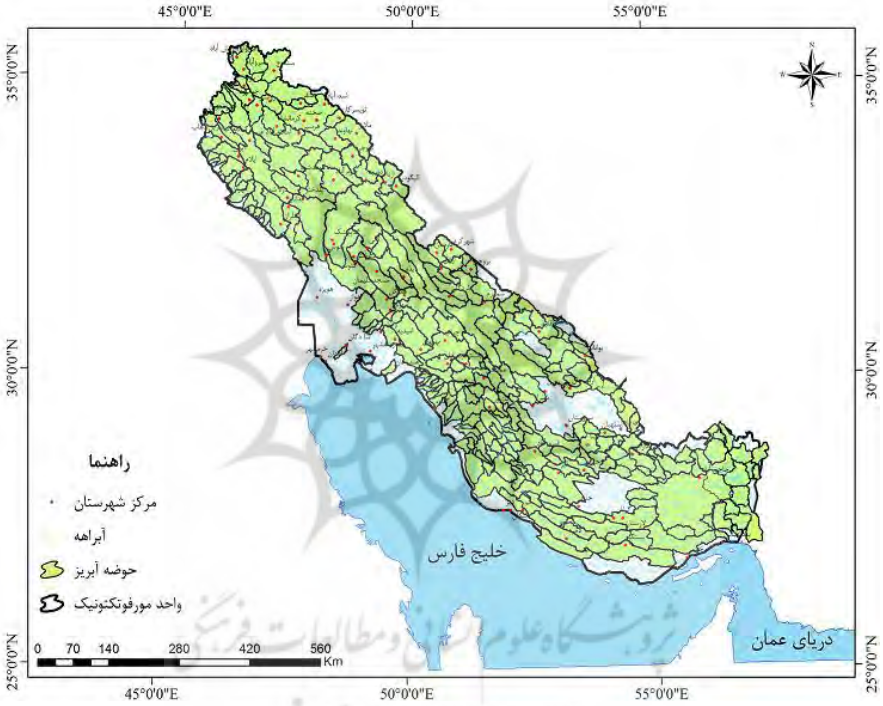
کرم (۱۳۸۹) به بررسی نظریهٔ آشوب، فرکتال و سیستم‌های غیرخطی در ژئومورفولوژی پرداخت و بیان کرد که رفتار آشوبناک در اغلب سیستم‌های دینامیکی پیچیدهٔ طبیعی و ژئومورفیک ازجمله جریان‌های سطحی، حرکات توده‌ای، سیستم خاک و... دیده می‌شود. علمی‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) در بررسی نظریهٔ فرکتال در ژئومورفولوژی رودخانهٔ زرینه‌رود به این نتیجه رسیدند که مقدار بُعد فرکتالی شاخهٔ اصلی این رودخانه با رتبهٔ چهار، برابر با ۱/۹۸ است. بُعد فرکتالی بالای رودخانهٔ معرف تراکم زهکشی بیشتر و زمان کمتر برای رسیدن به جریان دائمی است. فتاحی و طالب‌زاده (۱۳۹۶) به ارتباط بین ضریب فشردگی حوضه آبریز با ویژگی‌های فرکتال آن پرداختند؛ در این تحقیق برای ۱۲ زیرحوضه، ضریب فشردگی محاسبه، هیدروگراف واحد مثلثی (NRCS) و هیدروگراف واحد مثلثی فرکتالی رسم و با هم مقایسه شده‌است، نتایج حاکی از آن است که هرچه ضریب فشردگی به ۱/۵ نزدیک‌تر و شکل حوضه به دایره‌تر باشد، هیدروگراف‌ها تطابق بیشتری دارند؛ درواقع روش ابداعی هیدروگراف فرکتالی بهتر جواب می‌دهد. هدف این مقاله محاسبهٔ بُعد فرکتالی زیرحوضه‌های آبریز واحد زمین‌ساخت زاگرس و تحلیل ارتباط بین ابعاد فرکتالی و برخی خصوصیات ژئومورفیک زیرحوضه‌هاست.

منطقهٔ موردمطالعه

کوه‌های زاگرس به‌صورت نواری چین‌خوردهٔ قسمتی از رشته‌کوه آلپ- هیمالیاست که با وسعتی حدود ۲۰۰۰ کیلومترمربع درجهت شمال‌غربی- جنوب‌شرقی از شرق گسل آناتولی تا خطوارهٔ عمان در بخش جنوبی ایران گسترده شده‌است. این بخش محصول پیچیده‌ای از جدایی ایران از سرزمین گندواناست *(آرین و هاشمی، ۱۳۸۷: ۶۳)*. مجموعه ناهمواری‌هایی که فلات‌ایران را از

1-Cleveringa and Oost
2-Rodriguez and Rinaldo
3-Sivakumar and Berndtsson

سمت جنوب‌غربی و جنوبی محدود ساخته‌اند، زاگرس نامیده می‌شود *(علائی‌طالقانی، ۱۳۹۶: ۱۴۴)*. کمربند کوهزایی زاگرس از شمال‌شرق به خردقاره (ایران مرکزی) و از جنوب‌شرق به سپر عربستان محدود شده است و در بخش میانی کوهزایی آلپ قرار گرفته است *(آقانباتی، ۱۳۸۳: ۱۹)*. این واحد مورفوتکتونیک از ۴۴ تا ۵۸ درجه طول شرقی و ۲۶ تا ۳۷ درجه عرض شمالی امتداد دارد *(علائی‌طالقانی، ۱۳۹۶: ۱۴۴)* (شکل ۱). به‌دلیل عرض جغرافیایی متغیر در این تودهٔ کوهستانی، ناحیه‌های متفاوت دمایی و بارشی در آن به‌چشم‌می‌خورد. اقلیم این ناحیه به‌شدت متأثر از عامل ارتفاع است و افزایش ارتفاع، کاهش دما و تغییر در وضعیت بارش را به دنبال دارد *(قاسمی‌فر و ناصری‌پور، ۱۳۹۳: ۵۵)*.



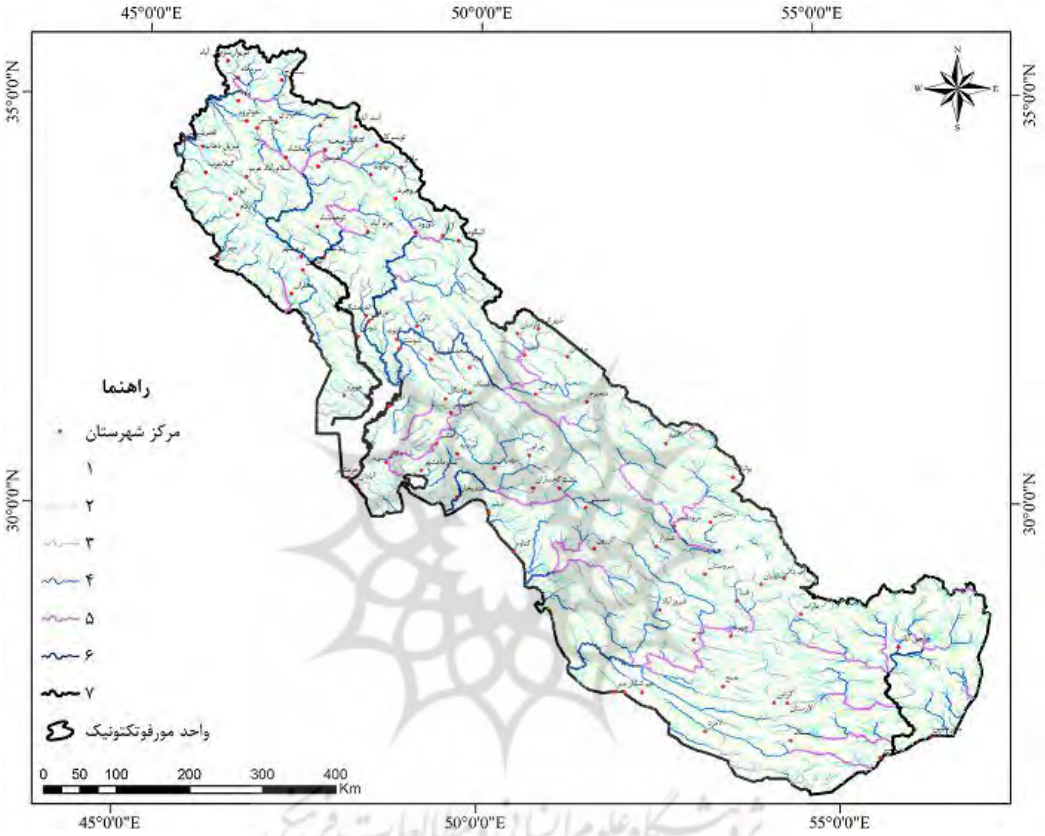
شکل ۱: موقعیت واحد مورفوتکتونیک زاگرس

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۹

روش و مواد تحقیق

برای بررسی بُعد فرکتال واحد ژئومورفیک زاگرس، ابتدا لایهٔ رودخانه‌های اصلی و آبراهه‌ها از ۳۰*۳۰ DEM مستخرج از ماهوارهٔ SRTM تهیه شد. در نرم‌افزار Arc GIS10.3 کل واحد ژئومورفیک ابتدا به یازدهٔ حوضهٔ آبی حله، جراحی و زهره، کل مهران، کرخه، کارون، طشک بختگان، مرزی غرب، مند، ابرقو-سیرجان،بندرعباس سدیج،گاوخونی و هامون‌جازموریان تقسیم شد. سپس این حوضه‌های آبی به۳۸۹ زیرحوضه تقسیم شد. البته از حوضه‌های آبی گاوخونی و هامون جازموریان هرکدام یک زیرحوضه در محدودهٔ زاگرس واقع‌شده‌است. با توجه به اینکه بررسی و تجزیه‌وتحلیل ویژگی‌های رودخانه نیازمند رتبه‌بندی آبراهه‌ها است، در گام بعدی رتبه‌بندی آبراهه‌ها به روش هورتن و استرالر انجام گرفت.در سیستم هورتن ابتدای هر آبراهه به‌عنوان شاخهٔ رتبهٔ اول تعیین می‌شود. در محل اتصال هر دو شاخهٔ رتبهٔ اول، آبراهه رتبهٔ دومی ایجاد و به سمت پایین تا نقطه‌ای توسعه می‌یابد که در آنجا به

آبراهه رتبهٔ دوم دیگری متصل شود و درنتیجه شاخهٔ رتبهٔ سوم و همین‌طور چهارم پدید می‌آید. درصورتی‌که یک شاخهٔ رتبهٔ اول به یک آبراههٔ رتبهٔ دوم وارد شود، هیچ تغییری در رتبه‌بندی شاخه‌های رتبهٔ دوم حاصل نمی‌شود. شاخهٔ اصلی هر سیستم آبراهه‌ای بالاترین رتبه را داراست *(علمی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۳۴)* (شکل ۲).



شکل ۲: رتبه‌بندی آبراهه‌های واحد مورفوتکتونیک زاگرس

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۹

یکی از پارامترهای فیزیکی حوضهٔ آبخیز نسبت انشعاب است که مقدار کشیدگی یا گردی حوضهٔ آبخیز را مشخص می‌سازد. به‌طورکلی، نسبت انشعاب حوضهٔ آبخیز براساس شبکهٔ آبراهه‌ای رتبه‌بندی‌شده محاسبه می‌گردد *(Tabatabaei et al, 2013: 13)*.

رابطهٔ ۱:
$$BR=(\frac{n1}{n2}+\frac{n2}{n3}+\frac{n3}{n4}+...+\frac{ni-1}{ni})*\frac{1}{i-1}$$

BR نسبت انشعاب رودخانه‌ها در حوضه و i شمارهٔ ردهٔ رودخانهٔ اصلی حوضه است *(علیزاده، ۱۳۹۴: ۴۹۱)*.

همچنین نسبت طولی رودخانه از رابطهٔ (۲) به‌دست آمد.

رابطه ۲ :
$$Rr = \frac{r1}{ri+1}$$

Rr نسبت طولی رودخانه، ri طول متوسط آبراهه‌های رتبه i ام است. این مقادیر مستقل از مرتبه، برای شبکه‌های زهکشی تقریباً ثابت هستند *(علمی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۳۵)*.

بُعد فرکتال (D) برای شبکهٔ زهکشی با استفاده از نسبت انشعاب و نسبت طولی رودخانه از رابطهٔ (۳) برآورد می‌شود *(Turcotte, 2007 : 304)*.

رابطهٔ ۳:

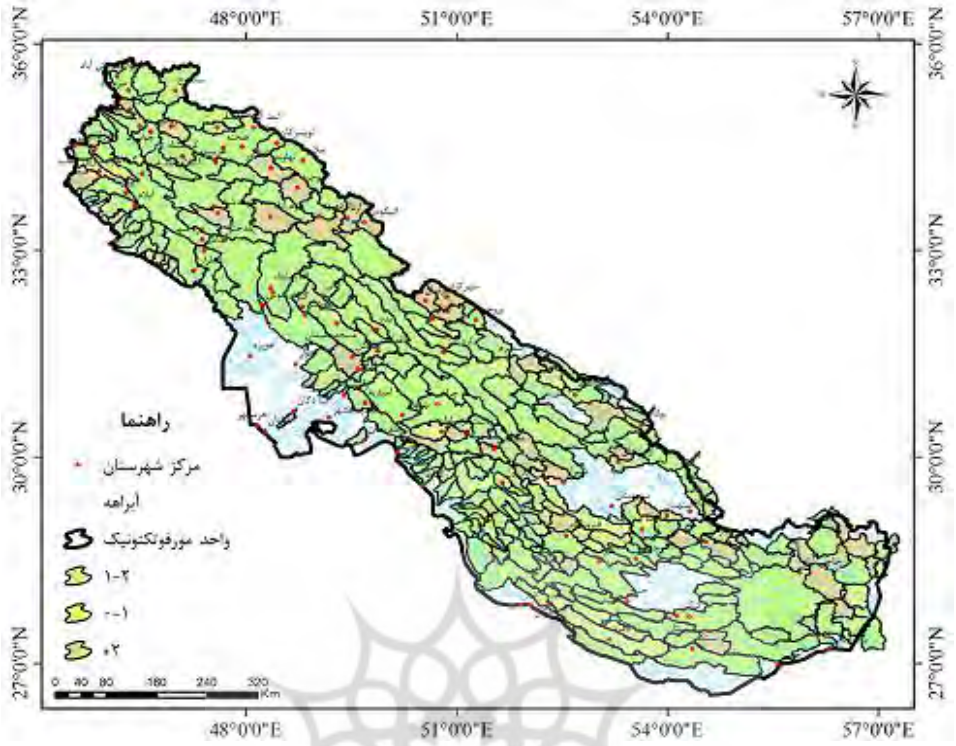
$$D = \frac{\ln Br}{\ln Rr}$$

پس از محاسبهٔ بُعد فرکتال در Excel، نتیجهٔ محاسبات در نرم‌افزار Arc GIS در سه گروه کمتر از یک، ۱ تا ۲ و بیشتر از ۲ طبقه‌بندی شد. در پایان، نقشهٔ مرتبط برای واحد مورفوتکتونیک زاگرس ترسیم و تجزیه‌وتحلیل شد.

یافته‌های پژوهش

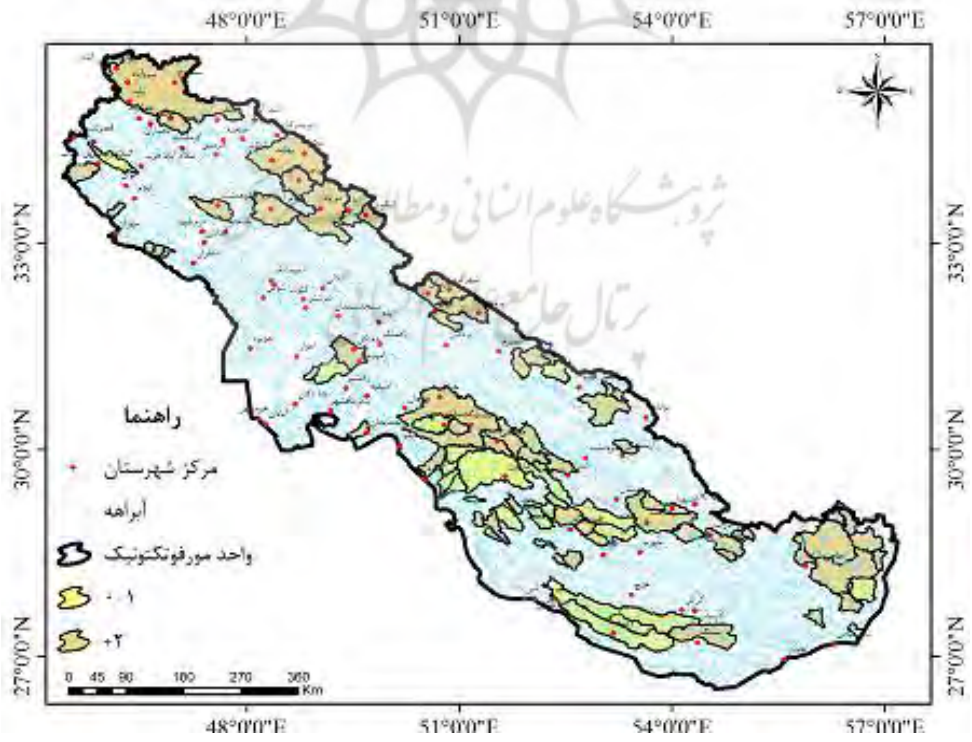
مقدار بُعد فرکتالی بین ۱ و ۲ متغیر است؛ این بدین معناست که در این شرایط، فرکتال نه در خط و نه در صفحه، بلکه خطی است که در سطح گسترش پیدا کرده‌است *(علمی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۳۸)*. با توجه به رابطهٔ (۳) بُعد فرکتالی تمام زیرحوضه‌های واحد مورفوتکتونیک زاگرس برآورد شد. اعداد برآوردشده در سه ردهٔ زیرِ یک، یک تا دو و بیشتر از دو طبقه‌بندی و تفسیر شده‌است (شکل ۳). در این واحد مورفوتکتونیکی، بُعد فرکتال غالب بین ۱-۲ است؛ براساس یافته‌های خان‌بابایی و همکاران (۲۰۱۳)، عدل و مهروند (۱۳۸۳)، کرم (۱۳۸۹) و علمی‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) این بُعد فرکتالی بیانگر این نکته است که شبکهٔ آبراهه‌ای به تعادل رسیده‌است (شکل ۴). حوضه‌های که ازنظر لیتولوژی، ناهمواری و تکتونیکی با دیگر حوضه‌ها متفاوت باشند. سطوح نزدیک به‌گسل اصلی زاگرس و در بخش جنوبی زاگرس چین‌خورده، بُعد فرکتال بیشتر از ۲ دارند و فرکتال آن‌ها در خط است؛ به این معنی که شبکهٔ آبراهه‌ها در خط به تعادل نرسیده‌اند (شکل ۵)؛ علت آن را می‌توان به لیتولوژی و تکتونیک آن منطقه نسبت داد. درواقع جایی که لیتولوژی آهک ضخامت بیشتر و سطح وسیع‌تر و یکپارچه‌تری را به خود اختصاص داده‌باشد، فرکتال زیرحوضه درسطح بوده و به این‌معنی است که آبراهه‌ها ازنظر پراکندگی در سطح به تعادل نرسیده‌اند (شکل ۶). زیرحوضه‌هایی متأثر از گسل و تکتونیک، فرکتال در خط دارند و آبراهه‌های آن‌ها در خط به تعادل نرسیده‌اند. آن دسته از زیرحوضه‌هایی که درطی زمان دچار انحراف یا اسارت‌شده یا در لیتولوژی آهکی متصل و ضخیم واقع شده‌اند، به تعادل نرسیده‌اند. براساس یافته‌های جعفری و بختیاری (۱۳۹۶)، جعفری و محمدی (۱۳۹۸) نامتقارن‌بودن آبراهه‌ها و غلبهٔ مواد آبرفتی در شمال رودخانه زیرحوضهٔ لامرد، دالّ بر اسارت یا انحراف رودخانه در طی کواترنری است.

در حوضهٔ دریاچهٔ مهارلو شیراز وجود شیب‌کم به‌همراه کنترل‌کنندهٔ تغییرات سطح اساس کواترنری در داخل حوضه (دریاچهٔ مهارلو) باعث فرکتال در خط شده و مانع از به‌تعادل‌رسیدن آبراهه‌ها در این حوضه شده‌اند. در زاگرس هر جا لیتولوژی آهک تحت‌تأثیر شدید انحلال قرارگرفته باشند آبراهه‌ها در خط به تعادل نرسیده‌اند، چنین می‌توان نتیجه‌گرفت که واحد زاگرس در فرکتال در تعادل است مگر درجاهایی که لیتولوژی یا انحراف و اسارت مانع از به‌تعادل‌رسیدن شده‌باشند.



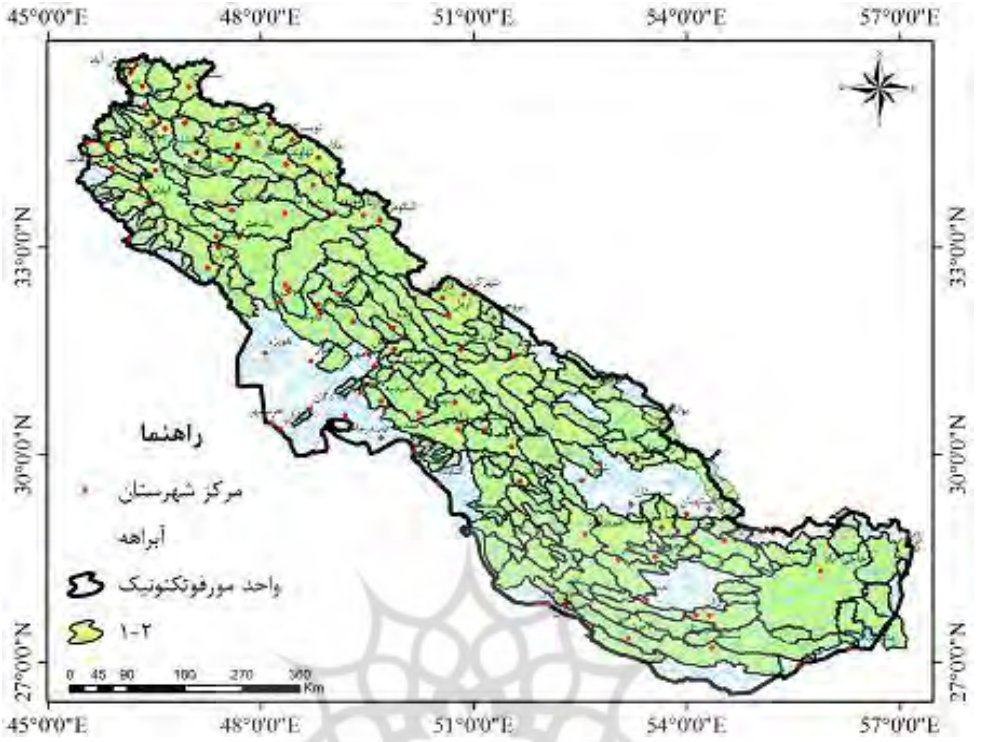
شکل ۳: طبقه‌بندی بُعد فرکتال در واحد مورفوتکتونیک زاگرس

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۹



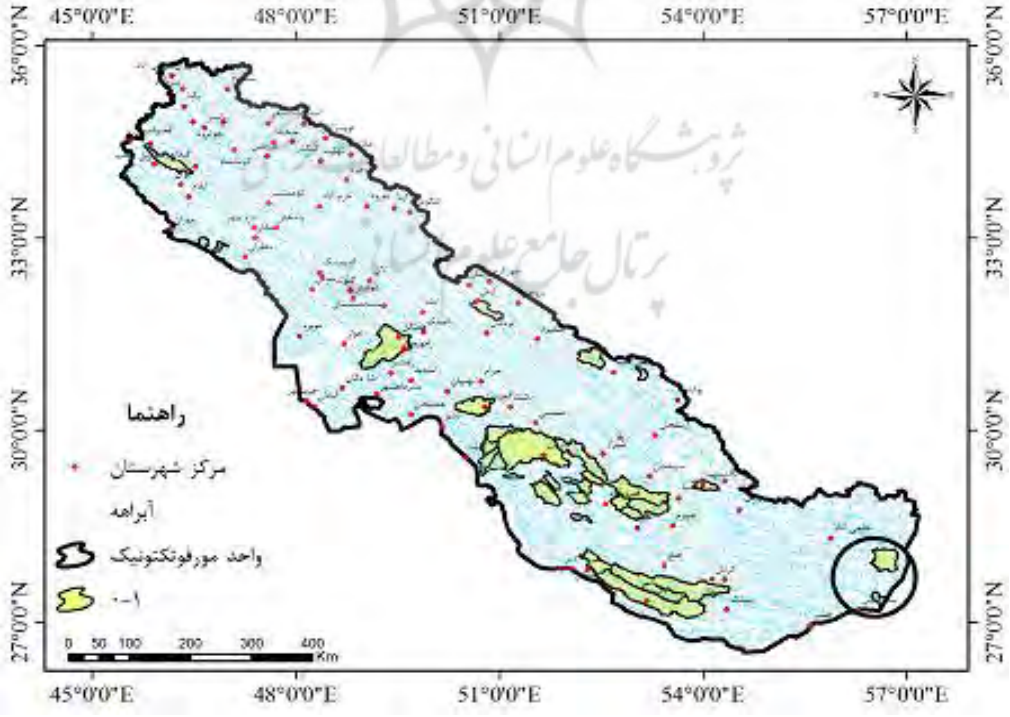
شکل ۴: طبقه‌بندی بُعد فرکتال در سطح و خط در واحد مورفوتکتونیک زاگرس

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۹



شکل ۵: طبقه‌بندی بُعد فرکتال در حالت تعادل در واحد مورفوتکتونیک زاگرس

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۹



شکل ۶: طبقه‌بندی بُعد فرکتال در سطح در واحد مورفوتکتونیک

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۹

پراکندگی حوضه‌های با فرکتال در سطح با توجه به نوع لیتولوژی غالب، مورد بررسی قرارگرفته و لیتولوژی حوضه‌های آشوبناک با لیتولوژی حوضه‌های متعادل مقایسه شده‌اند. لیتولوژی حوضهٔ آبریز شمارهٔ (۱) از آندزیت و تراکیت- آندزیت اندکی دگرگونی شده و مرمر به مقدار کمی است که با حوضه‌های متعادل متفاوت است. حوضهٔ جنوبی آنکه وسعت بیشتری داشته و این حوضه را نیز دربرمی‌گیرد؛ بُعد فرکتال متعادلی دارد. با بیشترشدن وسعت، لیتولوژی ملانژ تکتونیکی شامل ترکیبات افیولیتی در حوضهٔ غالب‌شده و ناتعادلی را بر کل حوضه حاکم کرده‌است.

مقایسهٔ لیتولوژی زیرحوضه آبریز شمارهٔ (۲) شکل (۶) با حوضه‌های اطراف دالّ بر این است که به‌علت وسعت‌کم حوضه، تنوع کمتری دارد (۳ نوع لیتولوژی). در اطراف این حوضه، حوضه‌های آبریزی وجود دارند که بُعد فرکتال متعادلی دارند؛ درصورتی‌که خود حوضه آشوبناک است.حوضه‌های آبریز وسیع‌تر، تنوع لیتولوژی بیشتری دارند.تنوع لیتولوژی زیرحوضه‌های‌موردمطالعه بسیار زیاد است. در حوضه‌های مختلف با توجه به تنوع لیتولوژی نمی‌توان مشخص‌کرد که دقیقاً کدام لیتولوژی باعث آشوبناکی حوضه می‌شود. اگر در یک حوضهٔ آبریز یک لیتولوژی در حوضه را دالّ بر ناتعادلی آن قلمداد کنیم، با گسترش حوضه یا در حوضهٔ دیگر آن جنس دالّ بر تعادل حوضه شده‌است؛ بنابراین نمی‌توان به قطعیت بیان کرد که کدام نوع از لیتولوژی باعث آشوبناکی یا تعادل حوضه می‌شود. می‌توان این‌طور بیان کرد که پراکندگی فضایی لیتولوژی بر روی تعادل یا ناتعادلی حوضه تأثیر بیشتری دارد تا خود لیتولوژی.

براساس یافته‌های عدل و مهروند (۱۳۸۳) رابطهٔ بُعد فرکتالی حوضه‌های آبخیز با برخی از پارامترهای ژئومورفولوژیک و هیدرولوژیک موردبررسی قرار گرفت. تشابه زیادی بین مشخصات ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی حوضه‌ها وجود دارد. بُعد فرکتالی حوضه‌های آبخیز برخلاف بُعد هندسی نمایانگر خصوصیات ژئومورفولوژیکی آن‌ها بوده‌است و جزئیات شکل و پیچیدگی‌های موجود در آن‌ها با محاسبهٔ این بُعد معلوم می‌شود. دامنهٔ تغییرات عوامل هیدرولوژی حوضه‌های متعادل در سطح و در خط مقایسه شد. بهترین رابطهٔ بین فرکتال حوضه‌ها با پارامتر نسبت طولی رودخانه‌ها برآورد شد. بررسی دامنهٔ تغییرات بین فاکتورهای فرکتال و نسبت طولی و طبقه‌بندی آن‌ها در گروه‌های مختلف فرکتالی دالّ بر این است که نسبت طولی بالای ۶ در فرکتال ۱-۰، نسبت طولی بین ۶-۲ در فرکتال ۲-۱، نسبت طولی ۲-۱ در فرکتال ۲+ قرار گرفته‌است. نکتهٔ قابل‌تأمل این است که نسبت طول در آبراهه با فرکتال رابطهٔ معکوس دارد؛ به‌طوری‌که هرچه نسبت طولی افزایش پیدا کند، فرکتال کم‌تر می‌شود؛ البته بُعد فرکتال حوضه‌هایی نیز از این قاعدهٔ کلی تبعیت نمی‌کنند.

نتیجه

هندسهٔ فرکتال ابزار مناسبی برای بررسی و شناخت رفتار پیچیدهٔ رودخانه است. مهم‌ترین ویژگی فرکتال، بُعد آن است. هدف این مقاله تعیین بُعد فرکتال و تحلیل آن با استفاده از تئوری هندسهٔ فرکتال در زیرحوضه‌های واحد زمین‌ساختی زاگرس، در غرب و جنوب غربی ایران است. در واحد زاگرس ۲۷۲ زیرحوضهٔ آبریز استخراج شد. بُعد فرکتال ۳۰ زیرحوضه در این‌واحد مورفوتکتونیک ۱-۰ (۱۱/۰۲٪)، ۱۸۵ زیرحوضه ۲-۱ (۶۸/۰۱٪) و ۵۷ حوضه بیشتر از ۲ (۲۰/۹۵٪) برآورد شد. این واحد مورفوتکتونیک ازنظر حوضه‌ای به تکامل رسیده‌است و درصد کمتری

از زیرحوضه‌ها، فرکتال در خط داشته‌اند. اکثر زیرحوضه‌های این واحد مورفوتکتونیک در حالت تعادل هستند و بُعد فرکتال آن‌ها بین ۲-۱ است. براساس آن می‌توان گفت رودخانه‌های این واحد از خواص فرکتالی تبعیت کرده‌اند. ابعاد فرکتالی در حوضه‌های مورد مطالعه متأثر از ویژگی‌های زمین‌شناسی و فیزیوگرافی است. البته به این معنی نیست که بُعد فرکتال از لیتولوژی حوضه به‌صورت انتزاعی تبعیت می‌کند، بلکه بیان‌کنندهٔ این نکته است که توزیع فضایی لیتولوژی در یک حوضه به‌همراه شواهد مورفوتکتونیکی مثل گسل می‌تواند بُعد فرکتال حوضه را از تعادل خارج کند. بُعد فرکتال بیشتر از ۲ و یا کمتر از ۱ نشان‌دهندهٔ آن است که تعادل شبکهٔ آبراهه‌های حوضه نه در سطح است و نه در خط و این‌گونه تعبیر می‌شود که حوضه ازنظر سیستمی به بلوغ نرسیده‌است. در واحد زاگرس تکتونیک و آهک تأثیر بسزایی در ناتعادلی بُعد فرکتال حوضه‌ها داشته‌است.

یافته‌های خان‌بابایی و همکاران (۲۰۱۳)، عدل و مهروند (۱۳۸۳)، کرم (۱۳۸۹) و علمی‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) دالّ بر این است بین بُعد فرکتالی و بعضی از خصوصیات فیزیوگرافی و هندسی حوضه‌های آبریز روابط معنی‌داری وجود دارد. بر این اساس بُعد فرکتالی و خصوصیات فیزیوگرافی تمامی زیرحوضه‌های واحد مورفوتکتونیک زاگرس مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج دالّ بر این است که رابطهٔ دقیق و مشخصی نمی‌توان بین آن‌ها برقرار کرد. بااین‌وجود تعیین بُعد فرکتالی اهمیت زیادی در شناخت رفتار و پیش‌بینی تغییرات مسیر رودخانه دارد. در راستای یافته‌های فلیپس و همکاران (۱۹۹۳) باید اذعان کرد که بین نسبت طولی و بُعد فرکتال حوضه‌ها رابطهٔ معکوس و معنی‌داری وجود دارد (با ضریب تبیین بیش از ۶۰ درصد).

منابع

- آرین،مهران؛ سیداحمد هاشمی (۱۳۸۷). پهنه‌بندی لرزهٔ زمین‌ساختی زاگرس. مجله علوم پایهٔ دانشگاه آزاد اسلامی. جلد ۱۸. شمارهٔ ۶۹. صفحات ۷۶-۶۳.
https://www.sid.ir/Fa/Journal/ViewPaper.aspx?id=86124
- آقانباتی، سیدعلی (۱۳۸۳). زمین‌شناسی ایران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. صفحه ۶۴۰.
https://www.gisoom.com/book/11083834
- جعفری، غلامحسن؛ فاطمه بختیاری (۱۳۹۶). شواهد ژئومورفولوژیکی اسارت و انحراف کواترنری رودخانه‌ها (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ قزل‌اوزن). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی. دورهٔ ۲۳. صفحات ۱۱۶-۱۰۵.
http://ensani.ir/fa/article/381229
- جعفری، غلامحسن؛ هژیر محمدی (۱۳۹۸). بررسی رفتار آشوبناک تلخه‌رود استان زنجان در کواترنری. فضای جغرافیایی واحد دانشگاه آزاد اهر. دورهٔ ۶۶. صفحات ۲۰۵-۱۸۵.
http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-2895-fa.html
- جعفری، غلامحسن؛هژیر محمدی (۱۳۹۸). بررسی رفتار آشوبناک فرایندهای ژئومورفولوژیکی حوضهٔ آبریز قزل‌اوزن.جغرافیا و مخاطرات‌محیطی. دانشگاه فردوسی مشهد. دورهٔ ۸. صفحات ۲۳-۱.
http://geoeh.um.ac.ir/article_32993.html
- چورلی، ریچارد جی؛ استانلی ای شوم؛ دیوید ای سودن(۱۳۹۲). ژئومورفولوژی (فرایندهای دامنه‌ای، آبراهه‌ای و ساحلی و بادی)، ترجمه احمد معتمد. انتشارات سمت. جلد سوم. ۴۵۶ صفحه.
https://bookroom.ir/book/54289

- عدل، ایرج؛ صمد مهروند (۱۳۸۳). بُعد فرکتالی و مشخصات هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز، اولین کنگرهٔ ملی مهندسی عمران. صفحات ۶-۱.
https://www.civilica.com/Paper-NCCE01-277_4543631433
- علایی‌طالقانی، محمود (۱۳۹۶). ژئومورفولوژی ایران، انتشارت قومس. صفحه ۳۶۰.
https://www.adinehbook.com/gp/product/9645516625
- علمی‌زاده، هیوا؛ امید ماه‌پیکر؛ مریم سعادتمند (۱۳۹۳). بررسی نظریهٔ فرکتال در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای (مطالعهٔ موردی: زرینه‌رود)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی.سال سوم. شمارهٔ ۲. پاییز ۱۳۹۳. صفحات ۱۴۱-۱۳۰.
https://elmnet.ir/article/1159980-42491
- علیزاده، امین (۱۳۹۴). اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه امام رضا. مشهد. ۹۴۲ صفحه.
https://www.gisoom.com/book/11153333
- فتاحی، محمدهادی؛ زهرا طالب‌زاده (۱۳۹۶). تولید آب‌نگار واحد مصنوعی بر پایهٔ ویژگی‌های فراکتال حوضهٔ آبخی،. فصلنامهٔ علمی- پژوهشی مهندسی منابع آب. دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت. دورهٔ ۱۰. صفحات ۹۷- ۸۷.
http://wej.miau.ac.ir/article_2304.html
- فتاحی، محمدهادی؛ زهرا طالب‌زاده (۱۳۹۶). ارتباط بین ضریب فشردگی حوضهٔ آبریز با ویژگی‌های فرکتال آن، تحقیقات منابع آب ایران. سال سیزدهم. شمارهٔ ۱. صفحات ۲۰۳-۱۹۱.
https://www.sid.ir/fa/Journal/ViewPaper.aspx?id=312333
- قاسمی‌فر، الهام؛ سمیه ناصرپور (۱۳۹۳). پهنه‌بندی اقلیمی ناحیهٔ زاگرس، فصلنامهٔ علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی سپهر. دورهٔ ۲۳. شمارهٔ ۸۹. صفحات ۶۰-۵۴.
http://ensani.ir/fa/article/346200
- کرم، امیر (۱۳۸۹). نظریهٔ آشوب فرکتال (برخال) و سیستم‌غیرخطی در ژئومورفولوژی، مجلهٔ جغرافیای طبیعی. شمارهٔ ۸. صفحات ۸۲-۶۷.
https://www.sid.ir/fa/Journal/ViewPaper.aspx?id=123336
- محمدی‌خشویی،مژده؛محمدرضااختصاصی(۱۳۹۸). مقایسهٔ بُعد فراکتال و ویژگی‌های ژئومورفولوژیک در مدیریت حوزهٔ آبخیز عقدا، فصلنامهٔ علمی- پژوهشی پژوهش‌های فرسایش محیطی. دانشگاه هرمزگان. دورهٔ ۹. صفحات ۸۴-۶۲.
http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-493-fa.html

Refrences:

- Baas, A. C (2002). Chaos، fractals and self-organization in coastal geomorphology: simulating dune landscapes in vegetated environments. Geomorphology. 48 (1-3). PP.309-328.
https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002Geomo..48..309B
- Bez, N., & Bertrand, S. (2011). The duality of fractals: roughness and Self-similarity Theoretical Ecology, 4(3), PP.371-383.
https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1007/s12080-010-0084-y
- Cleveringa، J.، & Oost، A. P. (1999). The fractal geometry of tidal-channel systems in the Dutch Wadden Sea. Geologie en Mijnbouw، 78(1)، PP. 21-30.
https://link.springer.com/article/10.1023/A:1003779015372
- Di Giulio, A., Ceriani, A., Ghia, E., & Zucca, F (2003). Composition of modern stream sands derived from sedimentary source rocks in a temperate climate (Northern Apennines, Italy). Sedimentary Geology, 158(1-2), PP.145-161.
https://www.researchgate.net/publication/223249539_Composition_of_modem_stream_sands_derived_from_sedimentary_source_rocks_in_a_temperate_climate_North_Apennines_Italy

- Khanbabaei, Z., Karam, A., & Rostamizad, G. (2013). Studying relationships between the fractal dimension of the drainage basins and some of their geomorphological characteristics. International Journal of Geosciences, 4(03), PP. 636- 642. https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=31782
- Mandelbrot, B. (1967). How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. Science, 156 (3775), PP.636-638. https://science.sciencemag.org/content/156/3775/636
- Phillips، J. D (1993). Interpreting the fractal dimension of river networks. Fractals in geography، 7، PP.142-157. https://www.researchgate.net/publication/292415293_Interpreting_the_fractal_dimension_of_river_ne
- Sivakumar, B & Berndtsson, R (2010). Advances in data-based approaches for hydrologic modeling and forecasting. World Scientific, P.441. https://www.amazon.com/Advances-Data-Based-Approaches-Hydrologic-Forecasting/dp/9814307971
- Tabatabaei, M., Solaimani, K., & Noroozi, A. A (2013). Ordering Discontinuous Digital Stream Networks in a Watershed by Developing an Object-oriented Model in the GIS Environment. Environmental Sciences, 10(1), PP.13-28. http://envs.sbu.ac.ir/article/viewFile/2390/2386
- Turcotte, D.L (2007). Self-organized complexity in geomorphology: Observations and models. Geomorphology، 91(3-4)، PP.302-310. https://www.researchgate.net/publication/223363088_Self-organized_complexity_in_geomorphology_Observations_and_modelstworks
- Rodriguez-Iturbe, I & Rinaldo, A (2001). Fractal river basins: chance and self-organization. Cambridge University Press. P.547. https://www.nhbs.com/fractal-river-basins-book