Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

# Determination of flow drainage patterns using fractal tree method (Case study: Zarrineh Rud sub-basin in Kurdistan province)

**Hadi SaniKhani[✉1], Babak Amirataee[2]**
1. Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, h.sanikhani@uok.ac.ir
2. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Orumiyeh, Iran, babak.amirataee@gmail.com
(Received: March. 4, 2022- Revised: Apr. 16, 2022- Accepted: Apr. 24, 2022)

## Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Apr. 12, 2022

**Received:** May. 2, 2022

**Accepted:** May. 8, 2022

**Published online:** June. 22, 2022

**Keywords**:
Drainage network,
Zarrineh Rud basin,
Strahler's law,
Horton's law, fractal tree

## ABSTRACT

The behavior of many complex natural phenomena, such as rivers, can be analyzed by fractal tree geometry. Zarrineh Rud sub-basin in Kurdistan province is one of the most watery basins of Urmia basin, which hydrological condition has a great impact on runoff management and downstream flows. Therefore, it is necessary to study the characteristics of this basin using fractal geometry. In the present study, the fractal behavior of Zarrineh rud basin in Kurdistan province has been investigated using GIS layers of stream, DEM map, and application of Strahler, Hack, Horton and fractal tree geometry by Richardson method. According to Hack's law, the slope of the basin trend line is high and this indicates a relatively high erosion in the Zarrineh Rud basin. According to Horton's law, the form factor decreases between stream order 1 and 2 and is almost the same for stream order 3 and higher. In addition, the fractal structure indicates that there is a fractal behavior in the range of stream order 2 and higher. Finally, based on the Richardson method, the fractal dimension of the basin was calculated in the range of 1.695- 1.837, which includes a significant part of the basin space. In addition, the results indicated that the fractal dimension obtained for the stream order 4 by the Horton method was 1.67, which is consistent with the results obtained by the Richardson method**.** Finally, it can be mentioned that, considering the special topography, climate, and hydrologic conditions of Zarrineh rud sub-basin, it is possible to help the country's planners and decision-makers to better manage this basin by identifying the hydrological behavior of the river.

Cite this article: Sarikhani, H., & Amirataee, B. (2022). Determination of flow drainage patterns using fractal tree method (Case study: Zarrineh Rud sub-basin in Kurdistan province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (4), 885-896.
© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ijswr.2022.339885.669221

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۳، شماره ۴ شاپا: ۲۴۲۳-۷۸۳۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

# تعیین الگوهای زهکشی جریان با استفاده از روش درخت فرکتال (مطالعه موردی: زیرحوضه زرینه‌رود در استان کردستان)

**هادی ثانی‌خانی[1]✉، بابک امیرعطایی[2]**

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران، h.sanikhani@uok.ac.ir

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، babak.amirataee@gmail.com

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:** مقالهٔ پژوهشی

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۱/۱/۲۳

**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۱/۲/۱۲

**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۱/۲/۱۸

**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۱/۴/۱

**واژه‌های کلیدی:**
شبکه زهکشی،
حوضه آبریز زرینه رود،
قانون استراهلر،
قانون هورتن،
درخت فرکتال

## چکیده

رفتار بسیاری از پدیده‌های طبیعی با پیچیدگی بسیار، مانند رودخانه‌ها را می‌توان با هندسه درخت فرکتال تحلیل نمود. زیرحوضه آبریز زرینه‌رود در استان کردستان یکی از پرآب‌ترین زیرحوضه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد که وضعیت هیدرولوژیکی آن تاثیر بسیاری بر روی مدیریت رواناب و جریان‌های پایین دست دارد، بنابراین بررسی ویژگی‌های فیزیوگرافی این حوضه آبریز با استفاده از روش درخت فرکتال در این تحقیق از اهمیت بالایی برخوردار است. در پژوهش حاضر به بررسی رفتار فرکتالی زیرحوضه آبریز زرینه‌رود در استان کردستان، با استفاده از لایه‌های GIS آبراهه‌ها، نقشه DEM و بکارگیری قوانین استراهلر، هاک، هورتن و هندسه درخت فرکتال به روش ریچاردسون، پرداخته شده است. بر اساس قانون استراهلر مشخص شد که ۵ درجه آبراهه در منطقه وجود دارد. بر اساس قانون هاک، مشخص شد، شیب خط روند حوضه تا حدی تند می‌باشد و این نشان از فرسایش نسبتا زیاد در محدوده مطالعاتی حوضه آبریز زرینه‌رود می‌باشد. مطابق قانون هورتن فاکتور فرم در حدفاصل آبراهه‌های درجه ۱ و ۲ کاهش یافته و برای آبراهه‌های با رتبه ۳ و بالاتر تقریبا یکسان می‌باشد. علاوه بر این ساختار فرکتالی نشان می‌دهد که در محدوده آبراهه‌های رتبه ۲ و بالاتر رفتار فرکتالی وجود دارد. در نهایت بر اساس روش ریچارسون، بعد فرکتالی حوضه آبریز مورد بررسی در رنج ۱/۸۳۷-۱/۶۹۵ محاسبه شد که بخش قابل توجهی از فضای حوضه این ویژگی را دارند. علاوه بر این نتایج نشان داد که بعد فرکتالی بدست آمده برای آبراهه‌های رتبه ۴ با روش هورتون برابر ۱/۶۷ بوده که با نتایج بدست آمده از روش ریچاردسون مطابقت دارد. در نهایت می‌توان گفت با توجه به موقعیت توپوگرافی، آب و هوایی و شرایط هیدرولوژیکی ویژه‌ی زیر حوضه آبریز زیرینه‌رود، می‌توان شناسایی رفتار هیدرولوژیکی رودخانه، به برنامه‌ریزان و تصمیم گیرندگان کشور در جهت مدیریت بهتر این حوضه کمک نمود.

استناد: ثانی خانی، ه؛ و امیرعطایی، ب (۱۴۰۱). تعیین الگوهای زهکشی جریان با استفاده از روش درخت فرکتال (مطالعه موردی: زیرحوضه زرینه‌رود در استان کردستان). *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۴)، ۸۸۵-۸۹۶.

DOI: http//doi.org/10.22059/ijswr.2022.339885.669221

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

## مقدمه

شبکه‌های زهکشی به عنوان شریان‌های حیاتی حوضه‌ها باعث تغییر و تحولات عمده‌ای در مکانیسم حوضه‌ها می‌شوند. پارامترهای مورفومتری حوضه آبریز شاخص‌های بسیار مناسبی برای تحلیل فرآیندهای ژئومورفولوژیکی هستند (Bahrami et al, 2019). رودخانه‌ها نیز به عنوان یکی از شبکه‌های زهکشی مهم دارای پیچیدگی و بی‌نظمی‌های بسیاری هستند و همواره تحت تأثیر عوامل و متغیرهای مختلف از نظر ابعاد، شکل، راستا و الگو در حال تغییر هستند. امروزه می‌توان با شناخت غیریکنواختی موجود در ژئوسیستم‌های رودخانه‌ای و بررسی ارتباط بین فرم‌ها و الگوهای شبکه زهکشی و همچنین پیش‌بینی الگوهای رفتاری اینگونه محیط‌های طبیعی، از قوانین حاکم بر فرم‌های ژئوسیستمی استفاده نمود و با کمک مدل‌های کمی آنها را نظم داد (Ariza et al., 2013). شبکه‌های رودخانه‌ای در محیط طبیعی الگوهای هندسی درخت مانندی را ایجاد می‌کنند که در جهت ایجاد تعادل در سیستم‌های رودخانه‌ای، رسوب و رواناب را تا پایدارترین قسمت یک سیستم آبریز خروجی یک حوضه فراهم کرده و رفتارهای مبتنی بر نظم امکان حمل هندسی را در این فرایند از خود بروز می‌دهند (Khosravi et al., 2016).

یکی از بهترین ابزارهای مناسب جهت بررسی ژئومورفولوژی زیرحوضه‌ها و شبکه رودخانه و مدل‌سازی بسیاری از پدیده‌های پیچیده طبیعی همچون رودخانه‌ها، هندسه فرکتال می‌باشد. هندسه فرکتال نوعی رویکرد سیستماتیک به پدیده‌های طبیعی پیچیده و خود سازمان یافته است که سعی دارد تا تفسیری منطقی درباره اشکال یا پدیده‌های پیچیده در طبیعت پیدا کند، زیرا از نظر هندسه اقلیدسی (به عنوان مثال خط ساحلی، ابرها و غیره) به طور کامل قابل توضیح نیستند. در هندسه فرکتال با تمرکز بر خصوصیات تجربی یک حوضه رودخانه می‌توان ویژگی‌های هیدرولوژی حوضه را توصیف نمود. حوضه رودخانه یکی از پیچیده‌ترین سیستم های طبیعی است که شامل تعاملات پویا بین اجزای متعدد با درجات زیادی از آزادی است (Kim and Jung, 2015). هندسه فرکتال به علت دید جامع‌تر نسبت به محیط پیرامون و در نظر گرفتن ویژگی‌های غیراقلیدسی به تدریج در عصر حاضر در علوم مختلف از جمله مهندسی رودخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع هندسه از مهم‌ترین روش‌های ساختاری است، که با تعیین بعد فرکتال ساختارهای خطی مثل آبراهه‌ها و مسیر پرپیچ و خم رودخانه‌ها می‌توان بسیاری از خصوصیات آنها را تخمین زد. اشیاء فرکتالی معمولا، خود متشابه هستند. در حقیقت تمامی منحنی‌های پیچیده در طبیعت ایده تکرار الگو در درون خود را دارند، با این تفاوت که در بعضی از منحنی‌های طبیعی همانند رودخانه‌ها الگوی تکرار شونده در سراسر رودخانه یکسان نیست و الگوهای متنوعی در بخش‌های متفاوت ایجاد می‌نماید (Fattahi and Talebzadeh, 2017). با کمک هندسه فرکتال می‌توان به تبیین فرایندها و پیچیدگی‌های حوضه، شبکه زهکشی و خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوضه آبخیز پرداخت (Mohammadi Khoshoei and Ekhtesasi, 2019). هندسه فرکتال خواص آبراهه‌های شبکه زهکشی را در ابعاد آماری و فرکتالی به صورت کاملا واضح و دقیق بیان می‌دارد (Karam and Saberi, 2015). تعیین بعد فرکتال اهمیت زیادی در شناخت رفتار و پیش‌بینی تغییرات مسیر رودخانه دارد. با اندازه‌گیری و محاسبه بعد فرکتالی می‌توان اطلاعات زیادی درباره طول انشعابات و سرچشمه‌های یک رود و همچنین شاخه‌هایی از رودخانه که امکان بررسی آنها به هر دلیل وجود ندارد، کسب کرد (Phillips, 2002).

مطالعات نسبتا محدودی در زمینه کاربرد نظریه فرکتال جهت بررسی الگوی زهکشی جریان در جهان انجام شده است که در این بخش به تعدادی از این مطالعات پرداخته می‌شود: Kusák (2014) در بررسی روش‌های هندسه فرکتال در مطالعه شبکه‌های پیچیده ژئومورفیک به این نتیجه رسیدند که اگر الگوی زهکشی و یا شبکه دره در مقیاس‌های مختلف همگون باشند می‌توان ابعاد را با استفاده از روش ابعاد فرکتال الگوهای زهکشی و شبکه‌های دره تعیین کرد. Zhang et al. (2015) در تحلیل همبستگی بین فراوانی سیلاب و پیچیدگی ژئومورفولوژیکی رودخانه هانگژو چین متوجه شدند که شبکه‌های چگال‌تر و پیچیده رودخانه دارای ابعاد فرکتال بیشتری هستند. همچنین مشخص شد هرچه ابعاد فرکتال بیشتر باشد احتمال وقوع سیل بیشتراست و شبکه‌های چگال‌تر و پیچیده‌تر رودخانه دارای ابعاد فرکتال بیشتری هستند. Kim and Jung (2015) به تحلیل الگوی زهکشی حوضه سولما از سرشاخه‌های رودخانه ایمجین در کشور کره جنوبی پرداختند و بعد فرکتالی شبکه‌های آبراهه حوضه را بین ۱/۶۸ تا ۱/۸ محاسبه نمودند. Tunas et al. (2016) مشخصات فرکتال هشت حوضه آبریز در سولاوسی اندونزی را با روش شمارش جعبه‌ای و ضریب هورتن مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تجزیه و تحلیل آنها نشان داد که بعد فرکتال با این دو روش نتایج مشابهی دارد. در نهایت تایید نمودند که شبکه هیدرولوژی رودخانه دارای ویژگی فرکتال پایدار برای مکان و زمان‌های مختلف است. Zhang et al. (2017) در تحلیل کاربرد ابعاد فرکتال برای شبکه‌های جریان رودخانه اندروز در ایالات متحده به این نتیجه رسیدند که کاربرد ابعاد فرکتال در شبکه‌های جریان، بینش وسیعی را در مورد تراکم زهکشی حوضه‌های خاص به دست می‌آورد، اما باید در انتخاب یک تکنیک محاسبه برای مطالعات با فرضیات مناسب در ساختار شبکه دقت گردد. Agus Nur et al. (2019) در بررسی ویژگی‌های فرکتال واحدهای ژئومورفولوژیک بوگور در جاوه مرکزی اندونزی دریافتند که بین ابعاد فرکتال آنومالی منطقه بوگور و توپوگرافی رابطه وجود دارد. Xiang et al. (2019) در مطالعه‌ای برای بررسی ساختار شبکه رودخانه تایهو در چین از تحلیل فرکتال چندگانه استفاده کردند. نتایج نشان داد شبکه‌های رودخانه واچنگ‌شئو، یانگ‌چنگ‌دیانمائو و هانجیاهو دارای ویژگی‌های چند منظوره واضح با ابعاد فرکتال ۱/۹ تا ۱/۹۱ هستند. علاوه بر این تغییرات منحصر به فرد در رودخانه واچنگ‌شئو با افزایش ۱۷/۹ و در هانجیاهو با افزایش ۱۷/۵ درصد در ابعاد طیف فرکتال محاسبه شده است. Feng et al. (2020) به تحلیل ژئومورفولوژی حوضه رودخانه سولما کره جنوبی در چارچوب درخت فرکتال پرداختند و به این نتیجه رسیدند که روند رشد یک درخت فرکتال فقط در منطقه محدودی از جریان در حوضه‌های طبیعی رخ می‌دهد و قانون هاک نیز روند متغیری را در حوضه‌های کوچک نشان می‌دهد، که به علت خاصیت غیریکنواخت شکل حوضه آبریز است. علاوه بر این متوجه شدند که فرایند انشعاب یک مسیر زهکشی

ممکن است به مرحله رشد درخت فرکتال حساس‌تر از پیچ و خم مسیر آبراهه باشد. Zakharov et al. (2020) هندسه فرکتال شبکه رودخانه و نئوتکتونیک حوضه سیخوت آلین را تحلیل کردند و متوجه شدند پارامتر خودتشابهی شبکه رودخانه که تابعی از ابعاد فرکتال و طول رودخانه است با حرکات نئوتکتونیک مطابقت دارد.

Tarahi et al. (2021) با تخمین رواناب در حوضه‌های آبریز با استفاده از مدل Nash-GIUH و تحلیل فرکتال به این نتیجه رسیدند که نتایج، ضرایب کارایی ۰/۴۲ و ۰/۹۶ بود. خطاهای برآورد دبی پیک در محدوده قابل قبول ۰/۹۳ تا ۱۲/۹۱ درصد بود. علاوه بر این، RMAE دارای مقدار کم در محدوده ۰/۰۶ تا ۰/۲۸ است که عملکرد خوبی را نشان می دهد. Kusák et al. (2022) به تجزیه و تحلیل الگوهای فرکتالی بر روی شبکه زهکشی نیل آبی در ارتفاعات اتیوپی، پرداختند. مطالعات آنها نشان داد الگوهای زهکشی دندریتی قدیمی واقع در قسمت غربی منطقه با فعالیت زمین ساختی کم و عدم وجود گسل کمترین مقدار بعد فرکتالی را داشتند. همچنین متوجه شدند الگوهای زهکشی دندریتیک سکوهای آتشفشانی تحت تاثیر برش‌های عمیق جوان تغییر کرده است و مقادیر بعد فرکتالی آنها افزایش یافته است. Martinez et al. (2022) نظریه فرکتال برای توصیف پیچیدگی مورفولوژیکی شبکه‌های جریان بزرگ در شیلی را با استفاده از روش شمارش جعبه‌ای و قانون هورتون مورد بررسی قرار دادند و متوجه شدند که بعد فرکتالی اندازه‌گیری شده دقیقاً در محدوده 1 <2> D قرار می‌گیرد، برخلاف نتایج به‌دست‌آمده از قوانین مبتنی بر هورتون، تنوع واضحی از یک محیط تکتونیکی به محیط دیگر را نشان می‌دهد. همچنین دریافتند الگوهای زهکشی توسط فرایندهای تکتونیکی و هیدرولوژیکی فرسایشی کنترل می‌شوند. Das et al. (2022) ساختار فرکتالی یک ساحل رودخانه در غرب بنگال در هند مطالعه نمودند. نتایج حاصل از روش شمارش جعبه‌ای نشان داد که ابعاد فرکتالی جریان‌های آشفته در سواحل به توزیع مقیاس جریانات گردابی بستگی دارد. این می‌تواند بیشتر به تاثیر برخورد جریانات با قسمت‌های ناهموار خشکی و نوع رسوب مرتبط باشد. همچنین متوجه شدند که بعد فرکتال محاسبه شده، نتایج مشابهی با روش شمارش جعبه دارد.

در ایران نیز نظریه فرکتال و کاربرد آن در ژئومورفولوژی به طور پراکنده مورد مطالعه قرار گرفته که از جمله این مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: Khosravi et al. (2016) طی تحقیقاتی که بر روی خصوصیات هیدرومورفومتری حوضه‌های آبریز در دامنه‌های شمالی بینالود انجام دادند به این موضوع پی بردند که ابعاد فرکتال در حوضه‌های مورد مطالعه متاثر از ویژگی‌های زمین‌شناسی و فیزیوگرافی می‌باشند، همچنین دریافتند با افزایش تعداد شاخه‌های حوضه‌های آبریز، بعد فرکتال نسبت انشعاب نیز افزایش پیدا می‌کند. Fattahi and Talebzadeh (2017) به تولید آبنگار واحد مثلثی فرکتالی در تمام زیرحوضه‌های حوضه وال‌نات‌گولچ در جنوب شرق ایالت آریزونا، آمریکا پرداختند و نتایج نشان داد روش ابداعی آبنگار واحد مصنوعی بر پایه‌ی ویژگی‌های فرکتال حوضه، که نیازی به مناسبات زمین ریخت شناسی ندارد، نتایج مناسبی به دست می‌دهد. Elmizadeh and Mah Peykar (2017)، به بررسی نظریه فرکتال در رودخانه‌ی زرینه‌رود پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بعد فرکتالی مشخصه‌ی الگوی پیچ و خم این رودخانه می‌باشد. همچنین مشخص شد بعد فرکتالی پایین رودخانه زرینه‌رود می‌تواند فرایندهای کنترلی تکتونیک روی تکامل الگوی زهکشی مورد مطالعه را نشان دهد. Khedri Gharibvand et al. (2018) با استفاده از مدل فرکتال روند تکاملی پهنه‌های گلی باتلاق گاوخونی را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به بررسی‌ها مشخص شد مقادیر فرکتال که بین ۱/۲۷ تا ۱/۴۴ برآورد شده بود، نشان از تمایل میکرولندفرم‌ها به افزایش میزان بی‌نظمی و آشفتگی با گذشت زمان دارد. نتایج انطباق سنجی خواص زمین ریخت‌شناسی حوضه آبریز وال نات‌گولچ و ویژگی‌های چند فرکتال شکل آبراهه توسط Kamyab and Fattahi (2018) نشان داد که ماهیت زیرحوضه‌ها بر الگوهای فرکتال و چندفرکتال استوار است و همچنین ماهیت غیرخطی شکل آبراهه نسبت به شاخص‌های چندفرکتال حساس می‌باشد. همچنین روابط معنی‌داری بین شاخص‌های ژئومورفولوژیک و شاخص‌های چندفرکتالی وجود دارد. Mohammadi Khoshoei and Ekhtesasi (2019) بعد فرکتال و ویژگی‌های ژئوموفولوژیک حوضه آبخیز عقدا را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که روابط معناداری بین ابعاد فرکتال شکل حوضه و شبکه زهکشی با ویژگی‌های ژئومورفولوژیک وجود دارد. Ghadimi and Javadi Sharif (2019) منابع آلاینده شیمیایی آب‌های زیرزمینی دشت جنوبی اراک را به روش‌های شاخص آلودگی و هندسه فرکتال تحلیل نمودند و دریافتند که آب‌های منطقه‌ای در مقایسه با استانداردهای آب شرب در حد مطلوب هستند، اما بررسی حد روش فرکتالی نشان داد غلظت ترکیبات شیمیایی بیشتر آب‌ها از حد طبیعی بیشتر است و در آستانه آلودگی قرار دارند. Mohammadi et al (2019) در بررسی رابطه بین بعد فرکتال و ویژگی‌های مورفومتریک شبکه زهکشی دشت یزد–اردکان به این نتیجه رسیدند که بیشترین مقدار عددی بعد فرکتال در سازند کهر (۱/۲۷۹) و کمترین آن در سازند تفت (۱/۰۴۶) محاسبه شد. همچنین رابطه معناداری ببین تراکم شبکه زهکشی و بعد فرکتال محاسبه شده است. Nazari Sarem et al. (2020) در پژوهشی به برآورد بعد فرکتالی ژئومورفولوژی کرانه‌های شمال خلیج فارس پرداختند که نتایج نشان داد خور دریایی موسی با بعد فرکتال ۱/۵ و خور عبدالله با بعد فرکتال ۰/۶ آشوبناک هستند و بعد فرکتالی دو رودخانه دالکی و اروندرود تقریبا ۰/۵ می‌باشد. در نهایت دریافتند که خورهای دریایی شمال خلیج فارس به ویژه خور موسی وارد مرحله لبه آشوبناکی شدند که نشاندهنده اثرگذاری فرایندهای آبی ساحلی است.

بررسی جامعی از مطالعات صورت گرفته در مناطق مختلف جهان نشان می‌دهد که دامنه تحقیقات انجام شده در خصوص تعیین الگوی زهکشی جریان با استفاده از نظریه فرکتال (از جمله درخت فرکتال) در جهان به صورت محدود انجام گرفته و در ایران نیز مطالعه‌ای با این شرایط کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین با توجه به موارد مطروحه می‌توان گفت تحقیق حاضر می‌تواند از اولین مطالعات در سطح حوضه‌ی آبریز زرینه‌رود در استان کردستان با استفاده از تکنینک درخت فرکتال با روش ریچاردسون باشد.

ویژگی‌های حوضه آبریز و شبکه زهکشی پایه و اساس بسیاری از تحلیل‌های هیدرولوژیکی را تشکیل می‌دهند. از آنجا که حوضه‌های آبریز واحدهای هیدرولوژیکی هر ناحیه را می‌سازند، مطالعه و بررسی وضعیت فیزیوگرافی آنها در هر ناحیه، به علت تأثیر فراوان آنها روی رواناب، میزان دبی سیلابی و بیلان حوضه آبریز، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بررسی تغییرات مسیر و الگوی هندسی رودخانه‌ها به منظور کسب شناخت دقیق و معضلات و مخاطرات احتمالی در جهت حفظ و بهره‌برداری بهینه از منابع طبیعی ضروری می‌باشد. تعیین الگوی زهکشی و ارتباط آن با نحوه انتقال رواناب در حوضه‌های آبریز همواره از مهمترین عوامل توجه محققین علوم و مهندسی آب بوده است. لذا شناخت وضعیت هیدرولوژیکی حوضه و نقش رواناب به عنوان متغیر اصلی در الگوی زهکشی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین، این پژوهش سعی دارد با استفاده از هندسه فرکتال به شناخت فرایندهای موثر بر زیر حوضه آبریز زرینه‌رود بپردازد. هدف اصلی در این تحقیق، تحلیل رفتار فرکتالی یکی از زیرحوضه‌های آبریز زرینه‌رود، از طریق محاسبه‌ی ابعاد فرکتال شکل حوضه و شبکه زهکشی می‌باشد.

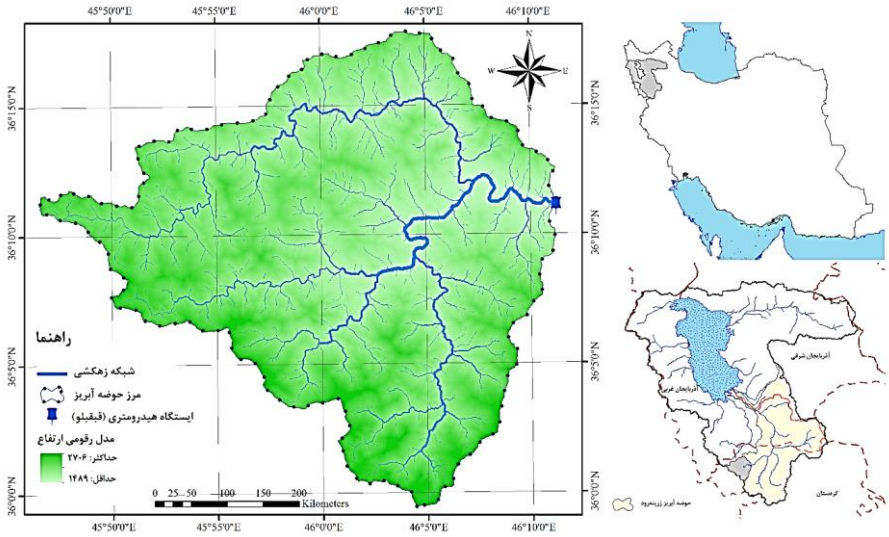
## داده‌ها و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی در شمال غرب ایران و در یکی از شاخه‌های جنوبی زیر حوضه رودخانه زرینه‌رود واقع در جنوب حوضه آبریز دریاچه ارومیه قرار گرفته است. زیرحوضه زرینه‌رود پرآب‌ترین زیرحوضه از حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد که از نظر تقسیمات سیاسی در محدوده سه استان کردستان، آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی قرار گرفته است. محدوده مطالعاتی با مساحت برابر ۶۷۱ کیلومتر مربع بر روی رودخانه سقزچای (یکی از چهار رودخانه اصلی زیرحوضه زرینه‌رود در بالادست مخزن سد شهید کاظمی بوکان) و در شمال استان کردستان بین ´۴۶ °۴۵ تا ´۱۱ °۴۶ طول شرقی و ´۵۹ °۳۵ تا ´۱۸ °۳۶ عرض شمالی قرار گرفته است. این محدوده در سطوح ارتفاعی ۱۴۸۹ متر الی ۲۷۰۶ متر واقع شده و از طرف غرب مشرف به حوضه رودخانه زاب می‌باشد. در انتهای زیرحوضه مطالعاتی، یک ایستگاه هیدرومتری بنام قبقبلو (با متوسط آورد سالیانه درازمدت ۲۷۰ میلیون مترمکعب) وجود دارد. از نظر کیفیت آب، رودخانه محدوده مطالعاتی از منطقه کربناته در سازندهای سیلیکاته عبور می‌کند. موقعیت محدوده مطالعاتی در شکل ۱ ارائه شده است.

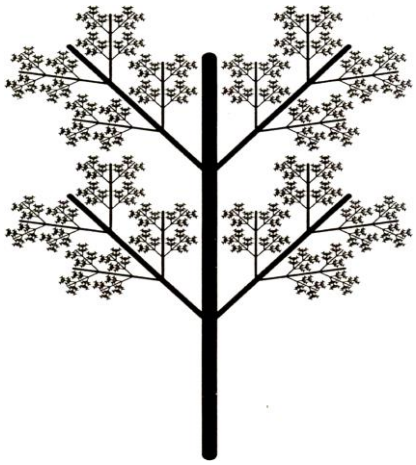
### داده‌ها و روش انجام تحقیق

اطلاعات و داده‌های مورد استفاده در این مطالعه اطلاعات مکانی (شیپ فایل‌های GIS) آبراهه‌های حوضه آبریز زرینه‌رود، جهت تحلیل شبکه زهکشی، تعیین مرز حوضه‌ی رودخانه و طبقه‌بندی آبراهه‌ها و نقشه‌های رقومی- ارتفاعی (DEM) برای استخراج و تحلیل‌های پارامترهای هیدرولوژیکی در سطح حوضه آبریز مورد نظر هستند. در این پژوهش جهت استخراج پارامترهای مورفولوژی حوضه از نقشه‌ی رقومی- ارتفاعی با اندازه سلولی ۳۰ متر در ۳۰ متر، مشخصات فیزیوگرافی محدوده مطالعاتی از قبیل مساحت، محیط، طول آبراهه‌ها و شماره رده آبراهه‌ها استخراج گردید. بعد از استخراج نقشه رقومی-ارتفاعی منطقه، شبکه آبراهه‌ای حوضه مورد مطالعه با به‌کارگیری روش استراهلر تعیین شده و آبراهه‌ها با درجات مختلف شناسایی شد. سپس با به‌کارگیری قوانین هورتن، نسبت‌های انشعاب، طول و مساحت در محدوده مورد نظر محاسبه شد. سپس با استفاده از قانون توان آبراهه و ارتباط بین مشخصات هندسی و ژئومورفولوژیکی حوضه، بعد فرکتالی حوضه تعیین شد. در ادامه الگوی زهکشی جریان در آبراهه‌ها با درجات مختلف به ازای توپوگرافی و شیب‌های متفاوت، بررسی و نقشه‌های مربوطه ارائه شد. در ادامه توضیحات روش هندسه درخت فرکتال ارائه می‌شود.




**شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی**

مشخصات هندسی یک شبکه شامل فرایند انشعاب توسط رشد گام به گام یک درخت فرکتال می‌تواند نشان داده شود (Hergarten, 2002). این کار با یک تنه یا ساقه به طول واحد شروع می شود و طی فرایند همانندسازی بر پایه الگوی اولیه شکل کلی یک شبکه رودخانه‌ای را در طول زمان در یک حوضه آبریز ایجاد می‌نماید (شکل ۲). در واقع شبکه‌های زهکشی ساختارهای درخت مانند فرکتالی هستند که روابط توانی بین اجزای آن برقرار است و به کمک درخت فرکتالی می‌توان شعبات مختلف یک رودخانه را تعیین کرد. تمام شعباتی که شاخه‌های فرعی به آنها متصل نمی‌شوند، به عنوان کانال‌های رتبه اول شناخته می‌گردند. به عبارت دیگر ابتدای هر کانال به عنوان شاخه رتبه اول تعیین می‌شود. هرگاه دو شاخه رتبه اول به یکدیگر متصل شوند یک شاخه رتبه دوم تشکیل می‌گردد. بدین صورت در محل اتصال هر دو شاخه رتبه اول، کانال رتبه دومی ایجاد و به سمت پایین، تا نقطه‌ای توسعه می‌یابد که در آنجا به کانال رتبه دوم دیگری متصل شود و در نتیجه شاخه رتبه سوم و همین طور چهارم پدید می‌آید. همچنین درصورتی که یک شاخه رتبه اول به یک کانال رتبه دوم وارد شود، هیچ تغییری در رتبه‌بندی شاخه‌های رتبه دوم حاصل نمی‌شود. افزایش رتبه در شاخه‌های رود فقط در زمانی حادث می‌شود که دو شاخه رود با رتبه‌ای برابر به یکدیگر بپیوندند (Elmizadeh et al., 2014). تعداد شاخه‌های جانبی می‌توانند بعد یک درخت فرکتال را تعیین کنند.



**شکل ۲- درخت فرکتال**

اگر n شاخه به طول γ $(0 < \gamma < 1)$ از یک ساقه رشد نمایند و این فرآیند پیوسته در مقیاس‌های کوچک‌تر ادامه یابد، تعداد و طول شاخه‌ها (انشعابات) در $k^{th}$ مرحله رشد در قالب روابط زیر می‌تواند ارائه گردد:

رابطه ۱) $$n_k = n^k$$

رابطه ۲) $$r_k = \gamma^k$$

تعداد انشعابات به طول $r_k$ و بزرگتر از آن یعنی $N(r_k)$ و مجموع طول کل آن‌ها $L(r_k)$ در قالب سری هندسی زیر می‌تواند محاسبه گردد( Kim and Jung, 2015):

رابطه ۳) $$N(r_k) = \frac{n}{n-1} r_k^{\frac{logn}{log\gamma}} - \frac{1}{n-1}$$

رابطه ۴) $$L(r_k) = \frac{(n\gamma)}{(n\gamma-1} r_k^{1+\frac{logn}{log\gamma}} - \frac{1}{(n\gamma)-1}$$

با قرار دادن $\frac{logn}{log\gamma}$ برابر D- معادلات زیر در فرم فرکتالی با قانون توانی به شکل زیر قابل ارائه هستند:

رابطه ۵) $$N(r_k) \propto r_k^{-D}$$

رابطه ۶) $$L(r_k) \propto r_k^{1-D}$$

که در این روابط D بعد فرکتالی درخت فرکتال در شکل ۲ می باشد و بیان کننده درجه فضای پر شده است. دو معادله ۵ و ۶ می‌توانند در شکل روابط خطی بین $N(r_k)$ و $L(r_k)$ با متغیر $r_k$ در مقیاس تمام لگاریتمی ارائه شوند. در خصوص فرکتال معین نظیر درخت فرکتال، این روابط همیشه به شکل پیوسته بدون محدودیت و بدون توجه به اندازه شاخه‌ها تکرار می‌شوند.

چنانچه هندسه شبکه آبراهه‌ها از قانون استراهلر تبعیت کند، قانون هورتون می‌تواند در قالب روابط زیر بیان شود (Kim and Jung, 2015):

رابطه ۷) $$R_B = \frac{N_{w-1}}{N_w}$$

رابطه ۸) $$R_L = \frac{L_w}{L_{w-1}}$$

$$R_A = \frac{A_w}{A_{w-1}}$$ رابطه ۹)

که $R_B$، $R_L$ و $R_A$ به ترتیب نسبت‌های انشعاب، طول و مساحت هستند. همچنین متغیرهای $N_w$، $L_w$ و $A_w$ به ترتیب معرف تعداد، متوسط طول و متوسط مساحت زهکشی آبراهه درجه w هستند.

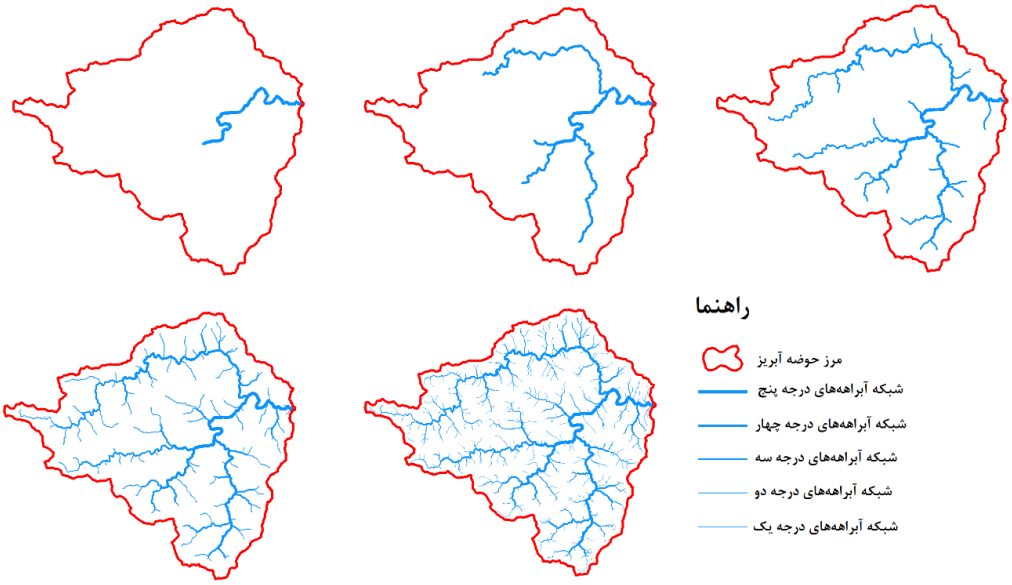
اگر شبکه آبراهه‌ها یک حوضه رودخانه مشابه یک درخت فرکتال در شکل ۲ فرض گردد، معادلات ۴ و ۵ می‌توانند معادل و هم ارز معادلات ۷، ۸ و ۹، در نظر گرفته شوند. به عبارت دیگر تعداد انشعابات و میزان تغییرات طول در هر مرحله رشد درخت فرکتال معادل نسبت‌های انشعاب و طول در قانون هورتون می‌باشد. بنابراین بعد فرکتالی شبکه آبراهه‌ها با توجه به رابطه $D = \frac{logn}{log\gamma}$ می تواند به صورت زیر بیان گردد:

$$D = \frac{logR_B}{logR_L}$$ رابطه ۱۰)

که در این رابطه $\gamma$ منعکس کننده شدت کاهش انشعابات در درخت فرکتال و $R_L$ بیان کننده شدت افزایش طول آبراهه‌ها می‌باشد. این موضوع بیان کننده این است که این دو متغیر علامت‌های مخالف هم دارند. با در نظر گرفتن بعد فرکتالی یکسان برای شبکه آبراهه‌ها که توسط La Barbera and Rosso (1989) بر مبنای قانون هورتون ارائه شد، می توان گفت که معادله ۱۰ نشان می‌دهد که در یک مقیاس مشخص عملکرد هر یک از بخش‌های کوچک در آبراهه‌ها که عمل انتقال جریان به آبراهه‌های بزرگ‌تر را انجام می‌دهند مشابه کل شبکه آبراهه‌ها می‌باشد که عمل زهکشی جریان به رودخانه اصلی را انجام می‌دهند. آنها چنین عنوان نمودند که شبکه آبراهه‌های طبیعی می‌تواند به‌عنوان یک فرکتال معین در نظر گرفته شود که در آن معادلات فرکتالی (معادلات ۷، ۸ و ۱۰) شکل یکسانی از شبکه آبراهه‌ها تا هر نقطه دلخواه در دامنه (رودخانه اصلی) دارد (Kim and Jung, 2015).

## نتایج و بحث

شکل ۳ رده‌بندی شبکه‌های زهکشی جریان زیر حوضه آبریز زرینه‌رود را مطابق قانون استراهلر نشان می‌دهد. همانطوریکه در شکل ملاحظه می‌گردد پنج رده آبراهه وجود دارد. سرشاخه هر آبراهه که از ارتفاعات شروع می‌شود رودخانه رده یک هستند. رودخانه رده یک رودخانه‌ای است که هیچ شاخه دیگری به آن نمی‌پیوندد. از اتصال دو رودخانه رده یک، رودخانه رده دوم ایجاد می‌شود. از اتصال دو رودخانه رده دوم، رودخانه رده، سوم، حاصل می‌شود. از متصل شدن دو رودخانه رده سوم، رودخانه رده چهارم و الی آخر تشکیل می‌شود. آخرین رده رودخانه در شکل، رده پنج می‌باشد که نقطه تمرکز تمامی جریانات است و نشان‌دهنده درجه تکامل شبکه آبراهه‌های در حوضه‌های بالادست می‌باشد. در واقع آبراهه درجه پنجم، همان آبراهه اصلی می‌باشد که جریان کل حوضه در نهایت به آن وارد می‌شود. مطابق تصاویر جریان و DEM منطقه می‌توان بیان کرد که جهت شبکه زهکشی جریان از توپوگرافی منطقه تبعیت می‌کند.




**شکل ۳- رده‌بندی شبکه‌های زهکشی جریان زیر حوضه آبریز زرینه‌رود بر اساس قانون استراهلر**

در جدول ۱، لیست ویژگی‌های زیر حوضه آبریز زرینه‌رود مطابق قانون استراهلر، ارائه شده است. در این جدول درجه آبراهه، تعداد آبراهه‌ها در هر درجه‌بندی، مجموع طول آبراهه‌ها، متوسط طول آبراهه‌ها، مساحت تحت پوشش آبراهه‌ها، نسبت مساحت به طول آبراهه‌ها و نسبت مساحت به تعداد آبراهه‌ها ارائه شده است. مطابق جدول بالاترین تعداد آبراهه، به آبراهه درجه اول تعلق دارد که ۴۶۲ آبراهه دارد و مساحت تحت پوشش آبراهه‌های درجه اول حدود ۴۱۵ کیلومتر مربع می‌باشد.

**جدول ۱- ساختار توپولوژیکی شبکه‌های زهکشی جریان زیر حوضه آبریز زرینه‌رود بر اساس قانون استراهلر**

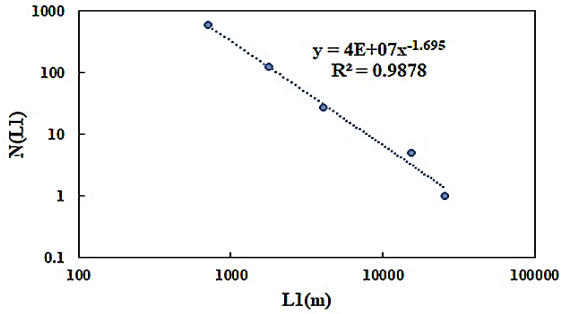
| درجه آبراهه (W) | تعداد آبراهه ($N_W$) | مجموع طول آبراهه‌ها (متر) ($\Sigma L_W$) | متوسط طول آبراهه (متر) ($L_W$) | مجموع مساحت تحت پوشش آبراهه‌ها (مترمربع) ($\Sigma A_W$) | متوسط مساحت تحت پوشش آبراهه‌ها ($A_W$) | نسبت مساحت به طول آبراهه‌ها (متر) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۴۶۲ | ۳۲۸۳۸۰ | ۷۱۱ | ۴۱۵۲۶۰۰۰۰ | ۸۹۸۸۵۳ | ۱۲۶۵ |
| ۲ | ۹۷ | ۱۷۲۹۴۰ | ۱۷۸۳ | ۵۳۷۱۹۰۰۰۰ | ۵۵۳۸۰۴۱ | ۳۱۰۶ |
| ۳ | ۲۲ | ۸۸۵۲۰ | ۴۰۲۴ | ۶۰۴۹۵۰۰۰۰ | ۲۷۴۹۷۷۲۷ | ۶۸۳۴ |
| ۴ | ۴ | ۶۱۱۶۰ | ۱۵۲۹۰ | ۶۵۱۸۹۰۰۰۰ | ۱۶۲۹۷۲۵۰۰ | ۱۰۶۵۹ |
| ۵ | ۱ | ۲۵۳۲۰ | ۲۵۳۲۰ | ۶۷۱۱۴۰۰۰۰ | ۶۷۱۱۴۰۰۰۰ | ۲۶۵۰۶ |

در جدول ۲، ساختار فرکتال پنج شبکه زهکشی جریان زیر حوضه آبریز زرینه‌رود بر اساس رتبه آبراهه‌ها ارائه شده است. در جدول مذکور، لیست درجه آبراهه‌ها، متوسط طول آبراهه‌ها، تعداد آبراهه‌ها (به صورت تجمعی) و مجموع طول آبراهه‌ها (به صورت تجمعی) به‌ازای روش ریچاردسون ارائه شده که نتایج آن با جدول شماره ۱ متفاوت است. نتایج جدول ۲ بیانگر این است که آبراهه درجه اول دارای بالاترین رده و بیشترین مقدار طول محاسبه شده، می‌باشد و از آبراهه درجه اول به سمت درجه پنجم، از مقادیر طول آبراهه‌ها کاسته می‌شود. به عبارت دیگر، پایین‌ترین مقدار طول آبراهه به آبراهه درجه پنجم تعلق می‌گیرد.

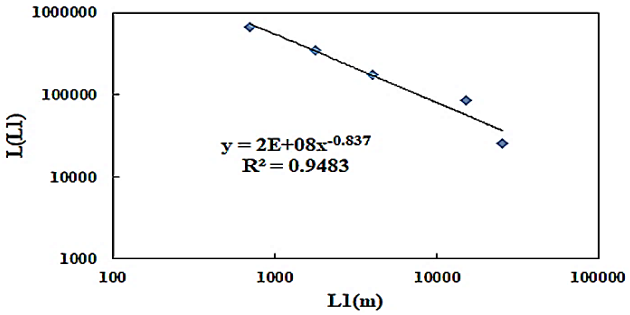
**جدول ۲- ساختار فرکتال پنج شبکه زهکشی جریان زیر حوضه آبریز زرینه‌رود بر اساس رتبه آبراهه‌ها**

| درجه آبراهه | متوسط طول آبراهه‌ها ($L_1$) | تعداد آبراهه‌ها (تجمعی) ($N(L_1)$) | مجموع طول آبراهه‌ها (تجمعی) ($L(L_1)$) |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۲۵۳۲۰ | ۱ | ۲۵۳۲۰ |
| ۲ | ۱۵۲۹۰ | ۵ | ۸۶۴۸۰ |
| ۳ | ۴۰۲۴ | ۲۷ | ۱۷۵۰۰۰ |
| ۴ | ۱۷۸۳ | ۱۲۴ | ۳۴۷۹۴۰ |
| ۵ | ۷۱۱ | ۵۸۵ | ۶۷۶۳۲۰ |

با توجه به اشکال ۴ و ۵ که به روش ریچاردسون جهت محاسبه بعد فرکتال معروف است، و با به‌کارگیری روابط ۵ و ۶، می‌توان بعد فرکتال را محاسبه نمود. با توجه به رابطه ۵ و شکل شماره ۴ می‌توان گفت که بعد فرکتالی حوضه مطالعاتی برابر با ۱/۶۹۵ می‌باشد. همچنین با به‌کارگیری رابطه ۶ و شکل شماره ۵ می‌توان گفت بعد فرکتالی حوضه زرینه‌رود برابر ۱/۸۳۷ است. بنابراین بر اساس روش ریچارسون بعد فرکتالی حوضه آبریز مورد بررسی در محدوده ۱/۸۳۷–۱/۶۹۵ می‌باشد. همچنین با مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان دریافت که هر دو نمودار روند یکسانی را نشان می‌دهند و انحراف جزئی از خط روند برازش داد شده در محل آبراهه‌های رتبه ۱ و ۲ دیده می‌شود. Tarboton et al., (1988) و La Barbera and Rosso (1989) بعد فرکتالی حوضه‌های آبریز را در محدوده ۱/۶ تا ۱/۷ گزارش نمودند که این مقدار بسته به عدم وجود مئاندرها و فرم سینوسی و پیچ و خم موجود در آبراهه‌ها می‌تواند تا حدی کاهش یابد.

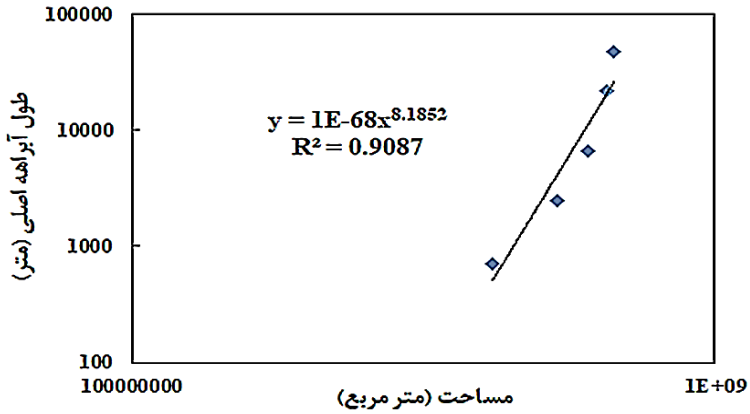



**شکل ۴- نمودار تغییرات N (L1) نسبت به L1 در زیر حوضه آبریز زرینه‌رود**



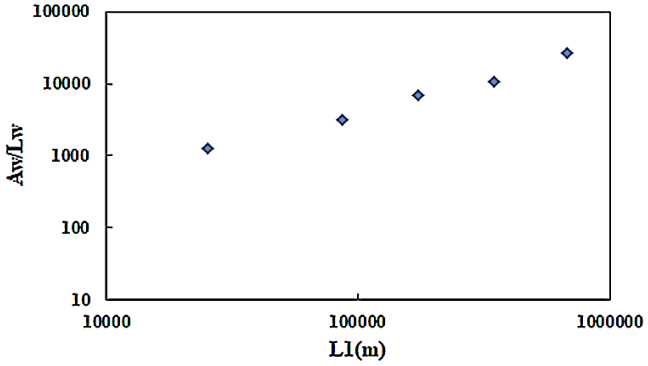

**شکل ۵- نمودار تغییرات L (L1) نسبت به L1 در زیر حوضه آبریز زرینه‌رود**

در شکل ۶، نمودار تغییرات مساحت زهکشی نسبت به طول کانال اصلی با توجه به درجه آبراهه‌ها ترسیم شده است. این شکل در واقع بیان کننده قانون توانی آبراهه‌ها می‌باشد. قابل ذکر است که طول‌های آبراهه اصلی با محاسبه مقادیر تجمعی متغیر L1 در ۵ شبکه زهکشی موجود در حوضه به منظور بررسی رشد مقادیر L1 نسبت به درجه حوضه تعیین گردید. با توجه به شکل و خط روند مربوط به آن می‌توان دید که شیب خط روند تا حدی تند بوده و این نشان از فرسایش نسبتا زیاد در محدوده زیرحوضه مطالعاتی حوضه آبریز زرینه‌رود می‌باشد.




**شکل ۶- وضعیت قانون توانی آبراهه (Hack's Law) در زیر حوضه آبریز زرینه‌رود**

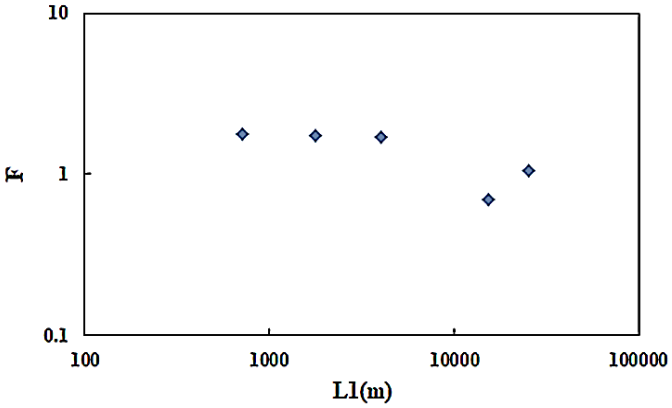
در شکل ۷ ارتباط بین Aw/Lw با متغیر L1 در مقیاس تمام لگاریتمی نشان داده شده است. در واقع این شکل بیان کننده تغییرات عرض (پهنای) حوضه در مقیاس می‌باشد. با مقایسه این شکل با اشکال ۴ و ۵، می‌توان دید رفتار نسبتا مشابهی در نمودار شکل ۷ با اشکال ۴ و ۵ وجود دارد. به عبارت دیگر، نتایج نشان می‌دهد که رفتار فرکتالی زیر حوضه مطالعاتی حوضه آبریز زرینه‌رود در محدوده آبراهه‌های رتبه ۲ و بالاتر وجود دارد.




**شکل ۷- وضعیت شاخص پهنای حوضه نسبت به L1 در زیر حوضه آبریز زرینه‌رود**

در شکل ۸ به منظور بررسی شکل ناحیه زهکشی، ارتباط بین فاکتور فرم حوضه ($F = \frac{A_w}{L_w^2}$) و متغیر L1 ارائه شده است. بر اساس تحقیقات Kim and Jung (2015)، نواحی متفاوتی به لحاظ مقیاس و درجه‌بندی آبراهه‌ها در سطح حوضه قابل مشاهده است. این نواحی به طور مشخص شامل ناحیه پراکندگی، ناحیه انتقالی و ناحیه کشیدگی می‌باشد. ناحیه کشیدگی در واقع بیان کننده حوضه‌های آبرفتی می‌باشد. با دقت در نمودار ارائه

شده در شکل ۸، می توان این نواحی را در زیر حوضه آبریز زرینه‌رود نیز تشخیص داد. بر اساس شکل ۸، فاکتور فرم در حدفاصل آبراهه های درجه ۱ و ۲ کاهش یافته و ناحیه انتقالی در حد فاصل آبراهه‌های ۲ و ۳ مشخص می باشد. روند کلی مقادیر فاکتور فرم برای آبراهه‌های با رتبه ۳ و بالاتر تقریبا یکسان می‌باشد.




**شکل ۸- وضعیت فاکتور فرم حوضه نسبت به L1 در زیر حوضه آبریز زرینه‌رود**

در جدول ۳، مقادیر نسبت انشعاب، نسبت طول آبراهه‌ها برای ۵ شبکه زهکشی موجود در مطالعه (مطابق با شکل ۳) ارائه شده و مقادیر بعد فرکتالی هر کدام از شبکه ها مطابق رابطه شماره ۱۰ (رابطه هورتون) محاسبه شده است. با توجه به مقادیر بعد فرکتالی ارائه شده در جدول ۳، مشاهده می‌گردد که با افزایش درجه آبراهه‌ها، بعد فرکتالی از مقدار ۱ (بعد فرکتالی خط) به سمت ۲ (بعد فرکتالی صفحه) میل می‌کند. با مقایسه نتایج بدست آمده در این بخش برای آبراهه‌های رتبه ۱ تا ۳ می‌توان دید تشابهی بین این مقادیر با مقادیر بدست آمده از روش ریچاردسون وجود ندارد. اگر چه برای آبراهه‌های با رتبه‌های ۴ و ۵ می‌توان دید مقادیر بدست آمده با روش هورتون همخوانی خوبی با مقادیر بدست آمده از روش ریچاردسون دارند.

**جدول۳- نسبت انشعاب، طول آبراهه‌ها و ابعاد فرکتال زیر حوضه آبریز زرینه‌رود بر اساس قانون هورتن**

| درجه آبراهه | نسبت انشعاب ($R_B$) | نسبت طول آبراهه ($R_L$) | بعد فرکتال (D) |
|---|---|---|---|
| ۱ | -- | -- | ۱ |
| ۲ | ۶/۱۰۱ | ۴/۹۹۷ | ۱/۱۲ |
| ۳ | ۵/۵۶۴ | ۳/۵۰۳ | ۱/۳۷ |
| ۴ | ۴/۷۶۳ | ۲/۵۴۵ | ۱/۶۷ |
| ۵ | ۴/۴۱۰ | ۲/۲۷۱ | ۱/۸۰ |

Beer and Borgas (1993) در مطالعات خود عنوان نمودند که قانون هورتون نوعی تبدیل ریاضی می‌باشد که در آن ساختار شبکه آبراهه‌های پیچیده به ساختار شبکه های قطعی و معین تبدیل می‌شوند و قانون هورتون در آن‌ها به صورت قطعی معتبر می‌باشد، اما برخی محدودیت‌ها در کاربرد این قوانین وجود دارد که سبب می‌شود شبکه آبراهه‌های واقعی از ساختار شبکه‌های قطعی و معین متفات باشند. بنابراین می‌توان گفت شبکه آبراهه‌های مورد مطالعه در این تحقیق ممکن است به لحاظ ویژگی‌های رفتاری با ساختار شبکه های هورتونی متفاوت باشد. لازم به ذکر است که بعد فرکتالی بدست آمده برای آبراهه‌های رتبه ۴ با روش هورتون برابر ۱/۶۷ بوده که با نتایج بدست آمده از روش ریچاردسون (معادلات ۵ و ۶) همخوانی دارد. همچنین در شبکه آبراهه‌های رتبه ۱ تا ۴ عدم تغییر مقیاس در حوضه با توجه به قانون هورتون مشاهده گردید. نتایج بدست آمده در این بخش با مطالعات Kim and Jung (2015) همخوانی دارد.

## نتیجه‌گیری

زیر حوضه آبریز زرینه‌رود در استان کردستان در جنوب حوضه آبریز دریاچه ارومیه یکی از پرآب‌ترین زیرحوضه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه به شمار می‌آید که هر گونه تغییر در شرایط هیدرولوژی آن می‌تواند تاثیرات بسیاری بر رواناب جریان و مدیریت آب زیرحوضه‌های پایین دست داشته باشد. بنابراین شناخت وضعیت هیدرولوژیکی حوضه و نقش رواناب به عنوان متغیر اصلی در الگوی زهکشی در این منطقه با اهمیت می‌باشد. بدین منظور هدف اصلی در این تحقیق، تحلیل رفتار فرکتالی زیرحوضه آبریز زرینه‌رود، از طریق محاسبه‌ی ابعاد فرکتال شکل حوضه و شبکه زهکشی می‌باشد.

در این پژوهش از اطلاعات مکانی (شیپ فایل‌های GIS) آبراهه‌های حوضه آبریز زرینه‌رود جهت تحلیل شبکه زهکشی، تعیین مرز حوضه‌ی

رودخانه و طبقه‌بندی آبراهه‌ها و نقشه‌های رقومی- ارتفاعی با اندازه سلولی ۳۰ متر در ۳۰ متر برای استخراج و تحلیل‌های پارامترهای هیدرولوژیکی در سطح حوضه آبریز استفاده شد. علاوه بر این روش‌های قانون استراهلر برای درجه‌بندی آبراهه، قانون هورتن برای محاسبه نسبت‌های انشعاب، طول و مساحت، قانون توان آبراهه و روش هندسه فرکتال ریچاردسون به منظور بررسی ارتباط بین مشخصات هندسی و ژئومورفولوژیکی حوضه جهت تعیین بعد فرکتالی حوضه مورد استفاده قرار گرفت.

بر اساس نتایج قانون درجه‌بندی آبراهه استراهلر، پنج درجه آبراهه شناسایی شد. علاوه بر این معین شد جهت شبکه زهکشی جریان از توپوگرافی منطقه تبعیت می‌کند. ساختار فرکتالی شبکه رودخانه‌ای حوضه به ازای آبراهه‌ها با درجات مختلف مطابق روش ریچاردسون به صورت معکوس درجه‌بندی قانون استراهلر نیز مورد محاسبه قرار گرفت که بر اساس آن مشخص شد آبراهه درجه اول دارای بالاترین رده و بیشترین مقدار طول محاسبه شده می‌باشد و از آبراهه درجه اول به سمت درجه پنجم از مقادیر طول آبراهه‌ها کاسته می‌شود. تغییرات مساحت زهکشی نسبت به طول کانال اصلی با روند خطی ترسیم شد که مطابق آن مشخص شد شیب خط روند تا حدی تند بوده و این امر نشان‌دهنده فرسایش نسبتا زیاد در محدوده حوضه آبریز زرینه‌رود می‌باشد.

در تحلیل وضعیت قانون توان آبراهه در زیر حوضه آبریز زرینه‌رود مشخص گردید که در محدوده آبراهه‌های رتبه دو و بالاتر، رفتار فرکتالی وجود دارد. در نمودارهای مرتبط با ویژگی‌های پهنای حوضه به طول آبراهه‌ها نیز کاهش قابل توجه فاکتور فرم در حدفاصل آبراهه‌های درجه یک و دو مشاهده گردید و سپس شاهد ناحیه انتقالی در حدفاصل آبراهه‌های رتبه ۲ و ۳ بودیم. علاوه بر این مشخص گردید که روند کلی مقادیر فاکتور فرم برای آبراهه‌های با رتبه سه و بالاتر تقریبا یکسان می‌باشد.

در انتها مقادیر بعد فراکتالی برای هر یک از شبکه‌های رودخانه مورد محاسبه و بررسی قرار گرفت. نتایج این بخش نشان داد که با افزایش درجه آبراهه‌ها بعد فرکتالی از میزان عددی ۱ (بعد فرکتالی خط) به سمت ۲ (بعد فرکتالی صفحه) میل می‌نماید. همچنین مشخص شد که مقادیر محاسبه شده روش ریچاردسون برای آبراهه‌های با رتبه های ۴ و ۵ با مقادیر روش هورتون همخوانی خوبی دارند. بررسی بعد فرکتال بر اساس روش ریچارسون نشان داد بعد فرکتالی زیر حوضه آبریز زرینه‌رود در رنج ۱/۸۳۷-۱/۶۹۵ می‌باشد. علاوه بر این نتایج بیانگر این بود که بعد فرکتالی بدست آمده برای آبراهه‌های رتبه ۴ بازای روش هورتون برابر ۱/۶۷ بوده که با نتایج بدست آمده از روش ریچاردسون مطابق دارد. ضمناً عدم تغییر مقیاس در حوضه با توجه به قانون هورتون در شبکه آبراهه‌های رتبه ۱ تا ۴ مشاهده گردید.

در نهایت لازم به ذکر است که زیر حوضه آبریز زیرینه‌رود در استان کردستان به عنوان یکی از پرآب‌ترین زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه دارای موقعیت توپوگرافی و آب و هوایی ویژه‌ای است که تغییر در ویژگی‌های هیدرولوژی آن تحت تاثیر شرایط تکتونیکی، مورفولوژیکی و یا وقوع بارش‌های سنگین و مخاطرات حدی اقلیمی در این ناحیه منجر به زیان‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی بسیاری می‌گردد. در همین راستا با شناسایی و دانستن رفتار هیدرولوژیکی این حوضه آبریز، می‌توان به برنامه‌ریزان و تصمیم گیرندگان اصلی کشور در جهت کاهش خسارات وارده کمک شایانی نمود.

## سپاس‌گزاری

این تحقیق با حمایت مادی معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه کردستان به شماره قرارداد طرح پژوهشی ۹۷/۱۱/۶۴۰۶ انجام پذیرفته است که در اینجا از این بابت تشکر و قدردانی می‌گردد.

**"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"**

## REFERENCES

Agus Nur, A., Syafr, I., Muslim, D., Hirnawan, F., Raditya, P., Sulastri, M. and Abdulah, F. (2016). Fractal characteristics of geomorphology units as Bouguer anomaly manifestations in Bumiayu ،Central Java ،Indonesia. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 29(1),012019.

Ariza, V.A., Jiménez-Hornero, F. and Gutiérrez de Ravé, E. (2013). Multi-fractal analysis applied to the study of the accuracy of DEM-based stream derivation. *Geomorphology*, 197, 85-98.

Bahrami, Shahram., Zanganeh Asadi, M.A. and Taghavi Moghadam, I. (2019). Evaluation of the morphometric effect of drainage network on sedimentation rate and erosion of catchments (Case study: 15 basins in northeastern Iran). *Geographical space*, 66, 139-163. (In Farsi)

Das, V. K., Debnath, K. and Sivakumar, B. (2022). Does turbulence show fractal structure within a dynamic undercut of an alluvial riverbank?, *Chaos, Solitons & Fractals*, 157, 111998.

Elmizadeh, H. and Mah Peykar, O. (2017). Investigation of fractal theory in Zarrinehrud river using box counting method. *Geographical space*, 59, 255-270. (In Farsi)

Elmizadeh, H., Mah Peykar, O. and Saadatmand, M. (2014). A Study of Fractal Theory in River Geomorphology: A Case Study of Zarrinehrood. *Quantitative geomorphological research*, 2, 130-141. (In Farsi)

Fattahi, M.H. and Talebzadeh, Z. (2017). Production of artificial unit hydrograph based on fractal characteristics of

watershed. *Water Resources Engineering*, 32, 87-97. (In Farsi)

Feng, M., Jung, K. and Kim, J.C. (2020). Geomorphologic Analysis of Small River Basin within the Framework of Fractal Tree. *Water*, 12(9), 2480.

Ghadimi, F. and Javadi Sharif, P. (2019). Determination of chemical pollutant sources of groundwater in the southern plain of Arak by fractal geometry pollution index methods. *Geography and environmental planning*, 2, 35-54. (In Farsi)

Hergarten, S. (2002). *Self-organized criticality in earth system*. New York: Springer.

Kamyab, S. and Fattahi, M.H. (2018). Adaptation of geomorphological properties (geomorphological of catchment and features) of multi-fractal waterway shape. *Iranian Water Resources Research*, 5, 311-326. (In Farsi)

Karam, A. and Saberi, M. (2015). Calculation of fractal dimension in drainage basins and its relationship with some geomorphological features of the basin, Case study: North Tehran catchments. *Quantitative geomorphological research*, 3, 153-167. (In Farsi)

Khedri Gharibvand, L., Qahroudi Tali, M., Sabok khiz, F. and Sepehr, A. (2018). Investigation of the evolutionary trend of Gavkhoni swamp mud zones using fractal model. *Geography and environmental planning*, 2, 113-128. (In Farsi)

Kim, J.c. and Jung, K. (2015). Fractal Tree Analysis of Drainage Patterns. *Water Resource Management*, 29, 1217–1230.

Khosravi, O., Sepehr, A. and Abdullahzadeh, Z. (2016). Fractal behavior and its relationship with hydromorphometric characteristics of northern slopes of Binalood watershed. *Hydrogeomorphology*, 9, 1-20. (In Farsi)

Kusák, M. (2014). Review article: Methods of fractal geometry used in the study of complex geomorphic networks. *AUC Geographica,* 49(2), 99-110.

Kusák, M. (2022). Application of fractal and multifractal analysis on Blue Nile drainage patterns in the morphostructural analysis of the Ethiopian highlands, Ethiopia. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 03091333211059419.

La Barbera, P. and Rosso, R. (1989). on the fractal dimension of stream networks. *Water Resources Research*. 25(4): 735-741.

Martinez, F., Ojeda, A. and Manríquez, H. (2022). Application of fractal theory to describe the morphological complexity of large stream networks in Chile. *Water Resources*, 49(2), 301-310.

Mohammadi Khoshoei, M. and Ekhtesasi, M.R. (2019). Comparison of fractal dimension and geomorphological features in the management of Aqda watershed. *Environmental Erosion Research*, 33, 62-84. (In Farsi)

Mohammadi, M., Ekhtesasi, M.R., Talebi, A. and Hosseini, Z.A. (2019). Investigation of the relationship between fractal dimension and morphometric features of drainage network (Case study: Yazd-Ardakan plain watershed). *Arid Biome*, 2, 1-16. (In Farsi)

Nazari Sarem, M., Dabiri, R., Ansari, M.R. and Vosoughi Abedini, M. (2020). Estimation of fractal dimension of geomorphology. *Quantitative geomorphological research*, 2, 159-174. (In Farsi)

Phillips, J.D. (2002*). Interpreting the fractal dimension of river networks*, In: LAM, N. S. N., DECOLA, L. (eds.): Fractals in Geography. PTR Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 142–157.

Tarboton, D.G., Bras, R.L., Rodríguez-Iturbe, I. (1988). The fractal nature of river networks. *Water Resource Research*, 24(8),1317–1322.

Tarahi, M., Sabzevari, T., Fattahi, M. H. and Derikvand, T. (2022). Estimating runoff in ungauged catchments by Nash-GIUH model using image processing and fractal analysis. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(1), 51-66.

Tunas, G., Anwar, N. and Lasminto, U. (2016). Fractal Characteristic Analysis of Watershed as Variable of Synthetic Unit Hydrograph Model. *The Open Civil Engineering Journal*, 10(1), 706-718.

Xiang, j., Xu, Y., Yuan, j., Wang, Q., Wang, j. and Deng, X. (2019). Multifractal Analysis of River Networks in an Urban Catchment on the Taihu Plain, China. *Water*, 11(11), 2283.

Zakharov, V.S., Simonov, D.A., Gilmanova, G.Z. and Didenko, A.N. (2020). The fractal geometry of the river network and neotectonics of south Sikhote-Alin. *Russian Journal of Pacific Geology*, 14, 526–541.

Zhang, A., Swanson, F., Tullos, D. and Jones, J. (2017). An analysis of applying fractal dimension to stream networks, Corpus ID: 32491344.

Zhang, S.h., Guo, Y. and Wang, Z. (2015). Correlation between flood frequency and geomorphologic complexity of river network -A case study of Hangzhou China. *Journal of Hydrology*, 527, 113-118.