



بررسی شبکه‌ی آبراهه‌های حوضه آبریز رامهرمز با استفاده از مدل توکوناگا و بعد فرکتال همبستگی

مهشید معاوی^۱، هیوا علمیزاده^{۲*}

۱- کارشناس ارشد ژئومورفولوژی، گروه زمین شناسی دریایی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران

۲- دانشیار ژئومورفولوژی، گروه زمین شناسی دریایی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

چکیده

در دیدگاه رفتارهای فرکتالی، ویژگی همانندسازی در طول زمان الگوهایی را در بستر حوضه به وجود می‌آورند که بنا بر ویژگی‌های زایشی و چگونگی تحولات، عملکرد منحصر به فردی را در طی بلوغ یک حوضه آبریز به نمایش می‌گذارند. به همین دلیل در این پژوهش با هدف بررسی انشعاب شبکه‌های آبراهه‌ای حوضه رامهرمز از مدل توکوناگا و بعد فرکتال همبستگی استفاده شده است. رودخانه رامهرمز از زیرحوضه‌های حوضه آبریز جراحی واقع در جنوب غربی کشور می‌باشد که از ۵۰ کیلومتری جنوب شرق ایذه سرچشمه گرفته و به سوی جنوب غرب سرازیر می‌گردد. در این پژوهش شبکه‌های رودخانه با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS استخراج شده و سپس داده‌های ورودی برای محاسبه عدد فرکتالی دو بعدی به کمک تابع همبستگی وارد نرم‌افزار گردید. در این راستا ابتدا حوضه رامهرمز را به دو بخش شرقی و غربی تقسیم نموده و در ادامه با استفاده از روش توکوناگا، شبکه نامنظم و منحنی رودخانه رامهرمز به شکل منظم، هندسی و درختی منتناظر ترسیم شده است. با توجه به طول شاخه‌ها، بعد فرکتالی برای هر دو بخش حوضه رامهرمز محاسبه گردید. بعد فرکتالی همبستگی حوضه رامهرمز و بخش‌های شرقی و غربی آن بین (۱/۴۲ تا ۱/۶۸) با ضریب همبستگی بالا برآورد گردیده است. بعد فرکتال محاسبه شده معرف نسبت انشعاب متوسط و مدت زمان اندک برای رسیدن به جریان دائمی است که بیانگر رفتار آشوبناکی نسبتاً بالای حوضه و بخش‌های آن می‌باشد.

کلمات کلیدی: بعد فرکتال همبستگی، مدل توکوناگا، شبکه‌های آبراهه‌ای، حوضه آبریز رامهرمز، جنوب غرب ایران.

۱- مقدمه

شبکه‌های زهکشی از جمله فعال‌ترین محیط‌های ژئومورفیکی هستند که به دلیل ویژگی‌های طبیعی خود در طول زمان دائماً در حال تغییر و تحول می‌باشند. این تغییر و تحول که از اصول حاکم بر هر رودخانه است، در کمترین فواصل زمانی روی می‌دهد (دوریتو^۱ و همکاران، ۲۰۲۰: ۲؛ یان^۲ و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۳۲۳)؛ به همین دلیل رودخانه‌ها محیط‌های ناپایداری هستند و الگوی جریانی آنها بسیار پیچیده می‌باشد. این ناپایداری و پیچیدگی تحت تأثیر عوامل محیطی مانند زمین‌شناسی، جنس سازند، توپوگرافی، شیب لایه‌ها، تکتونیک، دبی، بار رسوبی، ارتفاع و اقلیم به صورت سیستم فرایند - پاسخ پدیدار می‌گردند (لیائو^۳ و همکاران، ۲۰۱۹: ۵۶۵؛ جوشی و کوتلیا^۴، ۲۰۱۸: ۱۲۳). در این رابطه مطالعه تغییرات مورفولوژیک رودخانه‌ها و روابط آن با عوامل تأثیرگذار طبیعی و انسانی و متغیرهایی که در شکل هندسی و دینامیک شبکه آبراهه‌ها تأثیر دارند، به طور گسترده‌ای به عنوان یک ابزار مفید به منظور مشخص نمودن روند تکاملی رودخانه‌ها و برنامه‌ریزی صحیح جهت حفاظت و پایداری رودخانه‌ها شناخته شده است (کرک^۵ و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۴؛ یانگ^۶ و همکاران، ۲۰۲۰: ۶). از این رو می‌توان به منظور شناخت غیریکنواختی موجود در اینگونه محیط‌های طبیعی و بررسی ارتباط بین شبکه زهکشی، فرم‌ها و الگوها در ژئوسیستم‌های رودخانه‌ای و همچنین پیش‌بینی الگوهای رفتاری حوضه مورد مطالعه، از قوانین فرکتالی حاکم بر فرم‌های ژئوسیستمی استفاده نمود (شایان و همکاران، ۱۳۹۵: ۲۳۳).

پیدایش و تکامل شبکه آبراهه‌ها، یک پدیده‌ی تدریجی و پیچیده است که در آن متغیرهای وابسته‌ای مانند فرم و شیب با داده‌های میزان دبی و رسوب در حال تعادل پویاست و فرآیندهای آن طی دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت بر یکدیگر اثر می‌گذارند (برتولونی^۷، ۲۰۱۲: ۴۶۰؛ اوتوم^۸ و همکاران، ۲۰۱۹: ۴۰). علاوه بر این ویژگی‌های مورفولوژی مانند رده آبراهه‌ها، تراکم زهکشی، شیب آبراهه‌ها، ناهمواری، طول جریان سطحی، فراوانی آبراهه، شکل رودخانه و سایر جنبه‌های مورفولوژی حوضه‌ها برای شناسایی مهم هستند و برای شناخت و محاسبه بهتر آنها باید به یک روش مناسبی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند (گلکار^۹ و همکاران، ۲۰۱۳: ۳۵۱). لذا بعد از مطرح شدن مفهوم هندسه فراکتال به عنوان یک چارچوب ریاضی برای مطالعه هندسه‌های پیچیده و نامنظم با الگوهای مشابه در مقیاس‌های مختلف (بازساکي^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۳: ۵۸)؛ در سال‌های اخیر بسیاری از پژوهشگران استفاده از هندسه فرکتال، بعد فرکتالی و تحلیل فراکتال را در شبکه‌های رودخانه‌ای به کار برده‌اند

1- Durigetto
2- Yan
3- Liao
4- Joshi & Kotlia
5- Carke

6- Yang
7- Bartolini
8- Utomo
9- Golekar
10- Buzsaki

و نشان دادند که توزیع شبکه‌های رودخانه‌ای حالت فراکتالی دارند (یانگ و شی^۱، ۲۰۱۷: ۱۶۸؛ یو^۲ و همکاران، ۲۰۱۸: ۳؛ ژو^۳ و همکاران، ۲۰۱۷: ۹). در این میان مطالعات نسبتاً کمی در خصوص تحلیل فراکتالی مسیر رودخانه صورت گرفته و بیشتر مطالعات بر روی الگوی زهکشی شبکه‌های رودخانه‌ای متمرکز شده است (مندز^۴ و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۳۱؛ گیل^۵ و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۵۲؛ پارسون و تامس^۶، ۲۰۱۸: ۲۴۴). از جمله مطالعات صورت گرفته می‌توان به علمیزاده و همکاران (۱۳۹۳) اشاره نمود که نظریه فرکتال را در ژئومورفولوژی رودخانه-ای زربینه رود بررسی کردند و با استفاده از هندسه فرکتال و روش رتبه‌بندی هورتون-استرالر به این نتیجه رسیدند بعد فرکتال بالای رودخانه زربینه رود (۱/۹۸) معرف پیک هیدروگراف بالای حوضه می‌باشد. همچنین اصغری سراسکانرود و زینالی (۱۳۹۴) با بررسی الگوی پیچان رودی گرمی‌چای در آذربایجان شرقی، کرم و صابری (۱۳۹۴) حوضه‌های آبریز شمال تهران، فتاحی و کامیاب (۱۳۹۷) و همچنین سلطانی و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی تغییرات لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه ارس نتیجه گرفتند، تغییرات الگوی هندسه‌ای رودخانه دلیلی بر افزایش پیچیدگی است که باعث تغییر بعد فرکتالی رودخانه می‌شود و همچنین روابط معناداری بین شاخص‌های ژئومورفولوژیک و شاخص‌های فرکتالی وجود دارد؛ لذا فرکتال به‌عنوان روش مناسب برای نشان دادن تغییرات حوضه می‌توان مورد تحلیل قرار گیرد. از دیگر پژوهش‌ها در سطح جهان، زاناردو^۷ و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از پارامترهای توکوناگا در بررسی جریان رودخانه‌های آمریکا نتیجه گرفتند که شاخه‌های رودخانه وابستگی قابل توجهی به متغیرهای هیدروکلیماتیک حوضه دارند و می‌توان ارتباط جریان پایین‌دست رده‌ها را با ترسیم حوضه به شکل درختی نشان داد. سوپرکا^۸ (۲۰۱۴)، گوپتا و مسا^۹ (۲۰۱۴)، رزو^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۴) و فرناندز و سانچز^{۱۱} (۲۰۱۵) با بررسی مفهوم بعد فرکتال در شبکه آبراهه‌ها به این نتیجه رسیدند که فرکتال روش مناسبی برای شناسایی پارامترهای ژئومورفولوژی رودخانه‌ها می‌باشد و می‌توان محاسبات مدل‌سازی هیدرولوژیکی را در ارتباط با محاسبات بعد فرکتال به کار برد. توناس^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۶) به این نتیجه رسیدند شبکه هیدرولوژی رودخانه دارای ویژگی‌هایی برای پایداری در زمان و مکان‌های مختلف است و نسبت شیب رودخانه، نسبت مساحت حوضه و نسبت طولی رودخانه با بعد فرکتال ارتباط دارند و می‌توان ویژگی شبکه حوضه را با ابعاد فرکتال تحلیل نمود. نتایج تحقیقات ژو^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۷) نیز نشان داد ابعاد فرکتال مقطع عرضی رودخانه با افزایش عمق و سرعت جریان رودخانه کاهش می‌یابد. میکسنر^{۱۴} (۲۰۱۹) نیز با مطالعه فضایی و زمانی

1- Yang & Shi

2- Yu

3- Zhou

4- Méndez

5- Gale

6- Parsons & thoms

7- Zanardo

8- Sowpamilk

9- Gupta & Mesa

10- Rozo

11- Frnandez & Sanchez

12- Tunas

13- Zhou

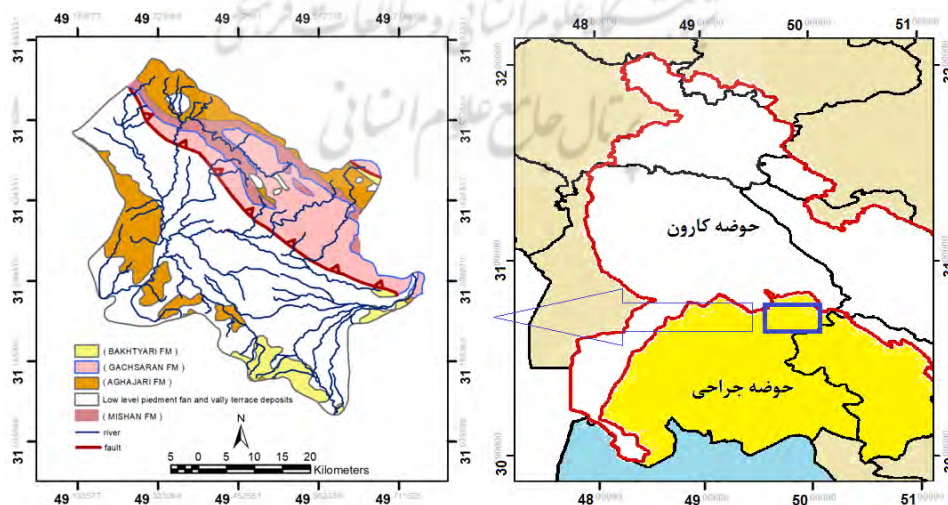
14- Meixner

فرکتال خود متشابه در رودخانه جنوب آریزونا نتیجه گرفت که توزیع خاک‌های مرطوب و خشک با تغییرات فرکتال و مشخصات طولی کانال رابطه دارد و جریان‌های هیدروژئولوژیکی و ژئومورفیکی رودخانه‌های آبرفتی مناطق خشک می‌توانند منجر به رفتار پیچیده‌ای در طول زمان شوند. در این راستا این پژوهش با هدف بررسی شبکه آبراهه‌های حوضه آبریز رامهرمز از مدل توکوناگا و بعد فرکتال همبستگی استفاده نموده است.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

رودخانه رامهرمز از ۵۰ کیلومتری جنوب شرق ایذه از پشت کوه قارون سرچشمه گرفته و به سوی جنوب غرب در استان خوزستان سرازیر می‌گردد. این رودخانه قبل از رسیدن به شهر رامهرمز به نام رود زرد خوانده شده و در ۲۲ کیلومتری جنوب رامهرمز به جراحی می‌ریزد (شکل ۱). بخش غربی این رودخانه به نام کوپال از چشمه‌های شمال شرق رامهرمز معروف به چشمه‌های کوپال از مقابل سورخانی می‌گذرد و در نهایت به دشت وسیع جنوب نیروگاه رامین و روستای غزانیه اهواز می‌ریزد. با توجه به اینکه رودخانه کوپال در محدوده‌ای با شیب بسیار کم جریان دارد، جاری شدن رواناب آن بر روی آبرفت‌ها به مدت و مسافت طولانی از کیفیت بدی برخوردار بوده و دارای شوری زیادی می‌باشد. از نظر اقلیمی حوضه مورد مطالعه، معتدل متمایل به گرم و از نظر میزان بارندگی جزء نواحی نیمه خشک و خشک به شمار می‌آید و خشکی و گرمی هوا به سبب وجود بادهای گرم و خشک جنوب غرب خوزستان می‌باشد.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

Fig (1): Geographical location of the study area.

روش توکوناگا: مدل توکوناگا^۱ یک مدل انشعاب است که توصیف سازنده‌ای از یک درخت خود مشابه و یک راه جایگزین برای توصیف مقیاس شبکه را ارائه می‌دهد. منشأ آن در هیدرولوژی است و میانگین ویژگی‌های توپولوژیکی شبکه رودخانه‌های متوسط تا بزرگ را می‌توان به خوبی با مدل توکوناگا توصیف کرد (کوچگف و زالیپین^۲، ۲۰۱۸: ۳؛ زناردو و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۹). در ابتدا مطابق روش توکوناگا حوضه رودخانه رامهرمز را به دو بخش شرقی و غربی تقسیم نموده و در ادامه محاسبات بعد فرکتالی با استفاده از این روش، شبکه نامنظم و منحنی رودخانه رامهرمز به شکل منظم، هندسی و درختی ترسیم شده و نسبت انشعاب حوضه از معادله نسبت انشعاب هورتون محاسبه شد. برای محاسبه روش توکوناگا؛ در ابتدا با بهره‌گیری از روش هورتون-استرالر^۳ تمام آبراهه‌هایی که شاخه فرعی به آن‌ها متصل نمی‌گردد، به عنوان شاخه‌های رتبه اول شناخته می‌شوند و از اتصال دو آبراهه رتبه اول به یکدیگر یک آبراهه رتبه دوم را تشکیل می‌دهند. آبراهه درجه دوم از محل اتصال دو شاخه رتبه اول تشکیل شده و به سمت پایین تا نقطه‌ای امتداد پیدا می‌کند که در آن جا این آبراهه درجه دوم با یک آبراهه رتبه دوم دیگر متصل و یک آبراهه رتبه‌ی سوم ایجاد شود، در ادامه به همین ترتیب از به هم پیوستن دو آبراهه رتبه سه، یک آبراهه رتبه چهار ایجاد می‌گردد. افزایش رتبه در شاخه‌های رود فقط در زمانی حادث می‌شود که دو شاخه رود با رتبه‌ای برابر به یکدیگر بپیوندند (تورکت^۴، ۲۰۰۷: ۳۰۷؛ کوچگف و همکاران، ۲۰۲۱: ۴۱). تعداد کل آبراهه‌های مرتبه i ام (N_i) برای یک درخت فرکتالی از مرتبه n از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$N_i = \sum_{j=1}^n N_{ij} \quad (1)$$

اما به طور کلی اتصال انشعابات در شبکه‌ی رودخانه‌ها بسیار متفاوت است و انشعاب رودخانه‌ها در حوضه‌ها به یکی از شکل‌های شاخه درختی، موازی، داربستی و در مواردی راست گوشه است. نسبت انشعاب هورتون از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌گردد (چاوان و سرینیواس^۵، ۲۰۱۵: ۴۷۱).

$$R_b = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad (2)$$

در ادامه نسبت طول مرتبه نیز از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید. در واقع طول شاخه‌ها با ازدیاد رتبه‌ها افزایش می‌یابد و مقادیر آبراهه‌ها با رتبه‌های مختلف در حوضه‌ها، نشان از تغییرات در شیب و توپوگرافی دارد.

$$R_r = \frac{r_{i+1}}{r_i} \quad (3)$$

۱- ایچی توکوناگا (۱۹۷۸)، مدل توکوناگا را بر اساس قوانین هورتون-استرالر و شامل مفهوم توپولوژی خود مشابه در ساخت شبکه رودخانه معرفی کرد.
 2- Kovchegov & Zaliapin
 3- Horton- Strahler
 4- Turcotte
 5- Chavan & Srinivas

در این جا (N_i) تعداد آبراهه‌های مرتبه (i) ام و (r_i) طول متوسط آبراهه‌های مرتبه (i) می‌باشد. با توجه به رابطه (۳)، مقادیر مستقل از مرتبه؛ برای شبکه‌های زهکشی تقریباً ثابت هستند. با استفاده از بعد فرکتالی برای شبکه‌های زهکشی، رابطه‌ی ۴ بین طول و مرتبه شبکه برقرار است (تورکت، ۲۰۰۷: ۳۰۷).

$$D = \frac{\ln R_b}{\ln R_r} \quad (۴)$$

در ادامه برای طبقه‌بندی شاخه‌های جانبی، توکوناگا سیستم مرتبه‌بندی هورتون - استرالر را توسعه داد. بر این اساس یک شاخه مرتبه اول که یک شاخه مرتبه اول را قطع می‌کند با (۱۱) و تعداد چنین شاخه‌هایی با (N_{11}) نشان می‌دهند؛ همچنین یک شاخه مرتبه اول که یک شاخه مرتبه دوم را قطع می‌کند با (۱۲) و تعداد چنین شاخه‌هایی با (N_{12}) ؛ یک شاخه مرتبه دوم که یک شاخه مرتبه دوم را قطع می‌کند با (۲۲) و تعداد آن نیز با (N_{22}) ؛ نشان داده می‌شود. در این رابطه با استفاده از رابطه‌ی ۵ کمیت (T_{ij}) را به دست می‌آوریم (نیومن^۱ و همکاران، ۱۹۹۷: ۶۰۶).

$$T_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_j} \quad (۵)$$

همان‌طور که در رابطه بالا ملاحظه می‌شود از کمیت بالا که تعداد شاخه‌های جانبی است، برای محاسبه (T_{ij}) استفاده شده است. سپس رابطه‌ای نمایی شامل دو مجهول (a) و (c) معرفی می‌شود که این دو مجهول به پارامترهای توکوناگا معروف‌اند و رابطه‌ی نمایی آن به شکل زیر است (نیومن و همکاران، ۱۹۹۷: ۶۰۶).

$$T_k = ac^{k-1} \quad (۶)$$

در رابطه بالا (T_k) از فرمول زیر به ازای مقادیر مختلف $(0 < k < n)$ تعیین می‌شود (نیومن و همکاران، ۱۹۹۷: ۶۰۶).

$$T_k = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} T_{i,i+k} \quad (۷)$$

برای درک رابطه فوق می‌توان از ماتریس بالا مثلی زیر کمک گرفت:

$$\begin{matrix} T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{23} & T_{24} & \\ T_{34} & & \end{matrix} \quad (۸)$$

برای به دست آوردن مقادیر رابطه‌ی ۹ مطابق با ماتریس، به عنوان مثال به ازای $(k=1)$ میانگین مقادیر (T_{ij}) در ستون اول محاسبه می‌شود و به ازای $(k=2)$ میانگین مقادیر (T_{ij}) در ستون دوم و به همین ترتیب الی آخر

عمل می‌کنیم. پس از محاسبه مقادیر (Tk) و قرار دادن آن‌ها در رابطه فوق، نموداری قابل ترسیم است که ضرایب (a و c) از روی آن به دست می‌آید. سپس پارامترهای توکوناگا را در رابطه زیر قرار داده و (Rb) تعیین می‌شود (پکهام^۱، ۱۹۹۵: ۹۵؛ مک کنال و گوپتا^۲، ۲۰۰۸: ۲۳۰).

$$\frac{2+c+a+\sqrt{(2+c+a)-8c}}{2} \quad (۹)$$

در ادامه، رابطه‌ی ۱۰ را برای رسم نمودار لگاریتمی (Tk) برحسب (K) استفاده می‌کنیم:

$$\ln T_k = \ln ac^{k-1} = \ln a + \ln c^{k-1} = \ln a + (k-1) \ln c \quad (۱۰)$$

بعد همبستگی^۳: بعد همبستگی یکی از روش‌های مرسوم تعیین آشوبناکی^۴ سیستم سری‌های زمانی و همچنین بعد آشوبی و بعد جاذب سیستم است (رضایی و جباری قره‌باغ، ۱۳۹۶: ۲۴۳). در این پژوهش شبکه‌های رودخانه از نرم‌افزار Arc GIS استخراج شده و سپس داده‌های ورودی برای محاسبه عدد فرکتالی دوبعدی به کمک تابع همبستگی وارد نرم‌افزار گردید (دونادیو^۵ و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۹۷۹). تابع همبستگی تعداد جفت‌هایی با فاصله $|X_i - X_j|$ که کوچک‌تر از (R) هستند را می‌شمارد، این بدین صورت انجام می‌شود که نقطه‌ای به عنوان مرکز در نظر گرفته می‌شود و توزیع نقاط دیگر نسبت به آن تحلیل می‌شود. تعداد جفت‌های ایجاد شده با استفاده از جبر ترکیبی برابر است با $2[n(n-1)]^{-1}$. (رابطه‌ی ۱۱).

$$C(R) = 2[n(n-1)]^{-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \theta(R - |X_i - X_j|) \quad (۱۱)$$

در معادله فوق، $\theta(x)$ تابع هویساید است که مقدار آن برای $(x < 0)$ برابر صفر و برای $(x \geq 0)$ برابر با یک است و (n) تعداد نقاط موجود است و (X_i) مجموعه مختصات نقطه (ام) و $2[n(n-1)]^{-1}$ ضریب نرمال‌سازی است که متناظر با جفت‌هایی است که C(R) تمایل به یک و (R) تمایل به بی‌نهایت دارد، اگر n نقطه از مجموعه توزیع فرکتالی داشته باشد (دونادیو و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۹۷۹). سپس:

$$C(R) = KR^D \quad (۱۲)$$

یا به‌طور معادل در گراف لگاریتم-لگاریتمی:

$$\ln(Tk) = \ln(a) + k \ln(c) \quad (۱۳)$$

که در آن $C(R)$ توزیع فرکانس تمامی فواصل بین نقاط است و k مقداری ثابت است و D بعد فرکتالی است (دونادیو و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۹۷۹). در نهایت میزان آشوبناکی آن‌ها را با توجه به رابطه‌های (۱۴ و ۱۵) مورد مقایسه قرار می‌گیرند:

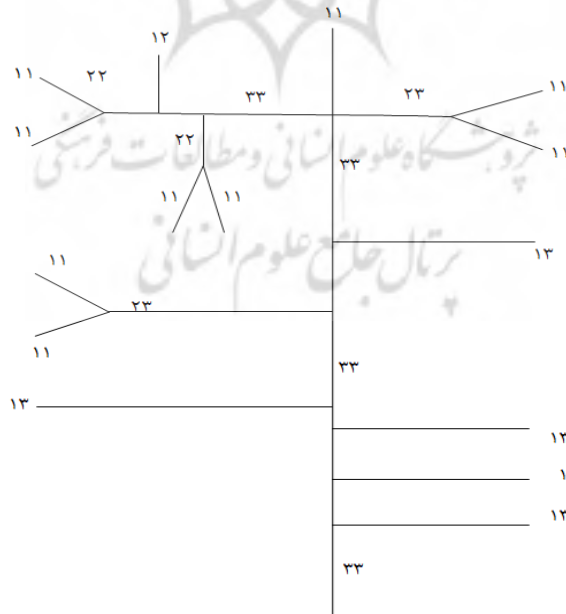
$$y = a^x [x + 2]^d - a^x x^d \quad (14)$$

$$y = [x + 2]^d - x^d \quad (15)$$

که در آن a : ضریب ثابت، d : بعد همبستگی و x : مجموعه مختصات نقطه a و d می‌باشد.

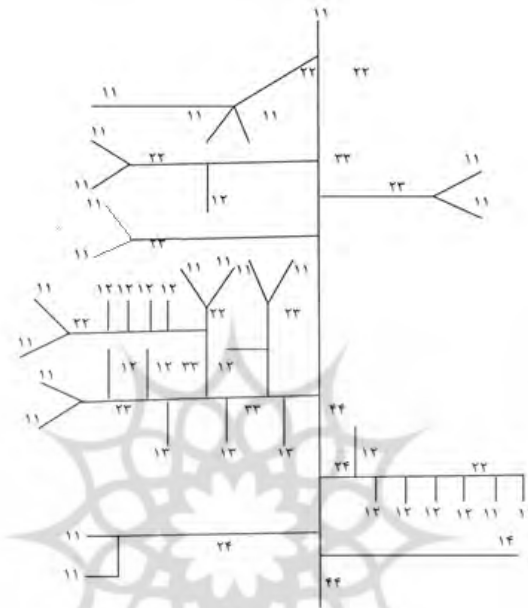
۳- یافته‌ها و بحث

نتایج توکوناگا: با توجه به اینکه مبانی هرگونه تجزیه و تحلیل عددی ویژگی‌های رودخانه‌ها، با مفهوم رتبه‌بندی رود ارتباط دارد؛ در نتیجه در اولین گام رتبه‌بندی رودخانه رامهرمز به روش هورتون - استرالر و توکوناگا انجام گرفت. در این راستا مطابق با روش توکوناگا بخش شرقی و غربی رامهرمز با توجه به رده‌بندی استرالر به شکل درخت متناظر ترسیم گردیدند (شکل‌های ۲ و ۳).



شکل (۲): درخت متناظر با نام گذاری جانبی بخش شرقی حوضه رامهرمز

Fig (2): The corresponding tree with the lateral naming of the eastern part of Ramhormoz basin.



شکل (۳): درخت متناظر با نام گذاری جانبی بخش غربی حوضه رامهرمز

Fig (3): The corresponding tree with the lateral naming of the western part of Ramhormoz basin.

مطابق با رابطه‌ی ۱ برای تفکیک شاخه‌های آبراهه‌های حوضه به مرتبه توکوناگا و هورتون- استرالر و پردازش تعداد آبراهه‌ها در (جداول ۱ و ۲) محاسبه گردیده است.

جدول (۱): رتبه‌بندی شاخه‌های بخش شرقی حوضه رامهرمز

Table (1): Ordering of the branches of the eastern part of Ramhormoz Basin

مرتبه توکوناگا	مرتبه هورتون - استرالر	طول (km)	نام شاخه	مرتبه توکوناگا	مرتبه هورتون - استرالر	طول (km)	نام شاخه
۱۱	۱	۶/۹۵	L1	۱۳	۱	۲/۳۵	L9
۱۱	۱	۱/۶۶	L3	۱۳	۱	۱	L7
۱۱	۱	۱/۸۸	L4	۱۳	۱	۱/۲۱	L8
۱۱	۱	۱/۸۴	L11	۱۳	۱	۲/۴۴	L13
۱۱	۱	۶/۳۲	L12	۲۲	۲	۷/۵۶	L18
۱۱	۱	۴/۲۰	L14	۲۲	۲	۱۹/۵۰	L19
۱۱	۱	۳/۸۸	L15	۲۳	۲	۵/۵۵	L5
۱۱	۱	۴/۴۲	L16	۲۳	۲	۱/۲۰	L10
۱۱	۱	۳/۹۷	L17	۳۳	۳	۳/۸۷	L20
۱۲	۱	۱/۳۵	L2	۳۳	۳	۲۰/۹۵	L21
۱۲	۱	۱	L6				

جدول (۲): رتبه‌بندی شاخه‌های بخش غربی حوضه رامهرمز
Table (2): Ordering of the branches of the western part of Ramhormoz Basin

مرتبۀ توکوناگا	مرتبۀ هورتون -استرال	طول (km)	نام شاخه	مرتبۀ توکوناگا	مرتبۀ هورتون -استرال	طول (km)	نام شاخه
۱۱	۱	۱/۴۲	R1	۱۲	۱	۱/۲۱	R31
۱۱	۱	۴/۵۸	R2	۱۲	۱	۳/۳۱	R32
۱۱	۱	۱۸/۸۸	R6	۱۲	۱	۱/۲۰	R40
۱۱	۱	۳/۰۷	R8	۱۲	۱	۱/۰۷	R41
۱۱	۱	۱/۹۰	R9	۱۲	۱	۱/۱۱	R42
۱۱	۱	۷/۸۱	R11	۱۲	۱	۱/۸۸	R43
۱۱	۱	۵/۲۰	R12	۱۲	۱	۱/۶۵	R44
۱۱	۱	۴/۵۱	R15	۱۲	۱	۴/۳۹	R7
۱۱	۱	۲/۵۳	R16	۱۲	۱	۱/۷۴	R33
۱۱	۱	۴/۸۸	R18	۱۳	۱	۱/۳۸	R34
۱۱	۱	۵/۱۲	R19	۱۳	۱	۳/۱۹	R35
۱۱	۱	۲/۸۲	R28	۱۴	۱	۳/۷۴	R36
۱۱	۱	۱/۶۰	R29	۲۲	۲	۲۰/۲۲	R5
۱۱	۱	۶/۲۰	R37	۲۲	۲	۱۸,۸۲	R3
۱۱	۱	۵	R38	۲۲	۲	۷/۰۹	R10
۱۱	۱	۰/۰۱	R47	۲۲	۲	۱۸/۴۸	R50
۱۱	۱	۰/۰۲	R48	۲۲	۲	۷/۳۷	R51
۱۱	۱	۱/۳۲	R49	۲۳	۲	۱۸/۹۳	R17
۱۱	۱	۶/۰۷	R46	۲۳	۲	۱۹/۷۹	R30
۱۱	۱	۱۱/۵۳	R4	۲۳	۲	۱۴/۹۶	R39
۱۱	۱	۳/۰۹	R21	۲۴	۲	۲۲/۲۲	R20
۱۲	۱	۳/۹۹	R22	۲۴	۲	۱۰/۱۶	R45
۱۲	۱	۳/۱۷	R24	۳۳	۳	۹/۲۰	R14
۱۲	۱	۴/۱۱	R25	۳۳	۳	۱۴/۰۱	R52
۱۲	۱	۱/۲۷	R26	۳۳	۳	۷/۵۳	R53
۱۲	۱	۱/۵۵	R27	۴۴	۴	۱۷/۶۲	R54

سنجش درجه تکامل حوضه آبریز و شبکه رودخانه رامهرمز با معیارهای تراکم، رتبه یا رده و نسبت انشعاب صورت گرفت. مطابق با رابطه (۲) نسبت انشعاب به روش هورتون محاسبه گردید. به دلیل اینکه نسبت انشعاب برای بیان میزان توسعه آبراهه‌ها با رتبه‌های مختلف، نسبت به یکدیگر به کار برده می‌شود و می‌تواند شاخص

مناسبتی برای مشخص کردن تأثیر انشعابات شبکه رودخانه بر هیدروگراف سیل یا به طور کلی رفتار هیدرولوژیکی حوضه باشد و در واقع یکی از عوامل مؤثر در شکل هیدروگراف به شمار می‌آید (جدول ۳ تا ۶).

جدول (۳): مطابق با رابطه‌ی ۱ تعداد شاخه‌های بخش شرقی حوضه رامهرمز

Table (3): According to Equation (1), the number of branches in the eastern part of Ramhormoz Basin

پارامتر	مرتبۀ اول (N1)	مرتبۀ دوم (N2)	مرتبۀ سوم (N3)
تعدادشاخه‌ها (Ni)	۱۵	۴	۲

جدول (۴): مطابق با رابطه (۲) نسبت انشعاب بخش شرقی حوضه رامهرمز

Table (4): According to Equation (2), the ratio of the bifurcation of the eastern part of Ramhormoz Basin

پارامتر	N1 / N2	N2 / N3	میانگین
نسبت انشعاب (Rb)	۳/۷۵	۲	۲/۸۷

جدول (۵): مطابق با رابطه‌ی ۱ تعداد شاخه‌های بخش غربی حوضه رامهرمز

Table (3): According to Equation (1), the number of branches in the western part of Ramhormoz Basin

پارامتر	مرتبۀ اول (N1)	مرتبۀ دوم (N2)	مرتبۀ سوم (N3)	مرتبۀ چهارم (N4)
تعدادشاخه‌ها (Ni)	۳۹	۱۱	۳	۱

جدول (۶): مطابق با رابطه‌ی ۲ نسبت انشعاب بخش غربی حوضه رامهرمز

Table (4): According to Equation (2), the ratio of the bifurcation of the western part of Ramhormoz Basin

پارامتر	N1 / N2	N2 / N3	N3 / N4	میانگین
نسبت انشعاب (Rb)	۳/۵۵	۳/۶۷	۳	۳/۴۰

در ادامه، مطابق رابطه‌ی ۳ و سیستم هورتون، نسبت طول آبراهه‌ها را با نسبت میانگین طول آبراهه در رتبه‌های مورد نظر محاسبه و آنرا نسبت به میانگین طول آبراهه رتبه کمتر بعدی تعریف نمود (جدول ۷ تا ۱۰).

جدول (۷): میانگین طولی رودخانه بخش شرقی حوضه رامهرمز

Table (7): Longitudinal average of the river in the eastern part of Ramhormoz basin

پارامتر	ri 1	ri 2	ri 3
میانگین طولی (ri)	۳/۰۳	۸/۴۵	۱۲/۴۱

جدول (۸): نسبت طولی مرتبۀ بخش شرقی حوضه رامهرمز

Table (8): Longitudinal ratio of the eastern part of Ramhormoz basin

پارامتر	Rr 2/ri 1	Rr 3/ri 2	میانگین
نسبت طولی مرتبۀ (Rr)	۲/۷۹	۱/۴۷	۲/۱۳

جدول (۹): میانگین طولی رودخانه بخش غربی حوضه رامهرمز

Table (9): Longitudinal average of river in the western part of Ramhormoz basin

پارامتر	ri 1	ri 2	ri 3	ri 4
میانگین طولی (ri)	۳/۵۱	۱۴/۳۷	۱۰/۱۹	۱۷/۶۲

جدول (۱۰): نسبت طولی مرتبه بخش غربی حوضه رامهرمز

Table (10): Longitudinal ratio of the western part of Ramhormoz basin

پارامتر	Rr 2/ri 1	Rr 3/ri 2	Rr 4/ri 3	میانگین
نسبت طولی مرتبه (Rr)	۴/۰۹	۰/۷۰۹	۱/۷۳	۲/۱۸

شبکه‌ی رودخانه‌ها در سطح حوضه آبریز، عمل تخلیه رواناب را برعهده دارند. هرچه شبکه رودخانه‌های یک حوضه تکامل یافته‌تر باشند؛ تخلیه رواناب از آن حوضه بهتر و ساده‌تر انجام می‌شود (رحیم‌زادگان و مریخ‌پور، ۱۳۹۵) با توجه به (جداول ۱ و ۲) بخش شرقی در روش ترسیمی توکوناگا در مرتبه (۳) و بخش غربی در رده (۴) قرار دارند و در نهایت هر دو بخش حوضه به رودخانه جراحی می‌ریزند. با توجه به طول شاخه‌ها، بعد درختان فرکتالی مطابق (رابطه‌ی ۴) برای هر دو بخش حوضه شرقی و غربی رامهرمز به ترتیب (۱/۳۹) و (۱/۵۷) محاسبه گردید. بعد فرکتال محاسبه شده معرف نسبت انشعاب متوسط و مدت زمان اندک برای رسیدن به جریان دائمی است:

$$D = \ln Rb / \ln Rr = 2/87 / 2/13 = 1/39 \text{ (بخش شرقی)}$$

$$D = \ln Rb / \ln Rr = 3/40 / 2/18 = 1/57 \text{ (بخش غربی)}$$

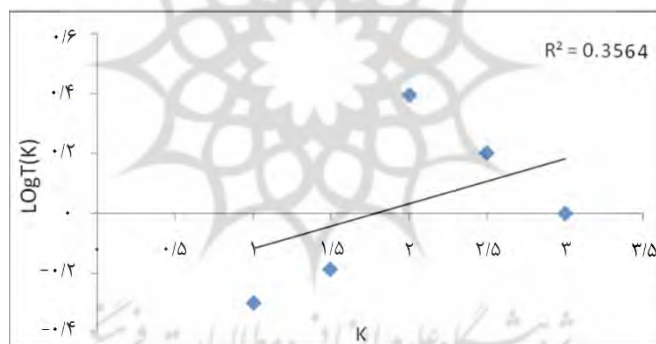
در ادامه با توجه به روش توکوناگا درختان فرکتالی دارای آبراهه‌های جانبی می‌باشند. مقدار بعد فرکتالی با توجه به ارتباط بین آبراهه‌ها با رده (j) و آبراهه‌های رده (j)، یک ماتریس بالا مثلثی ایجاد می‌شود. با توجه به رابطه (۵) ماتریس را در رابطه‌ی ۸ ایجاد می‌کنیم؛ برای بخش شرقی حوضه ماتریس برابر با:

$$\begin{matrix} 1/02 & 0/5 & 2/5 \\ & 0/85 & 1 \\ & & 0/4 \end{matrix}$$

و برای بخش غربی حوضه ماتریس برابر با:

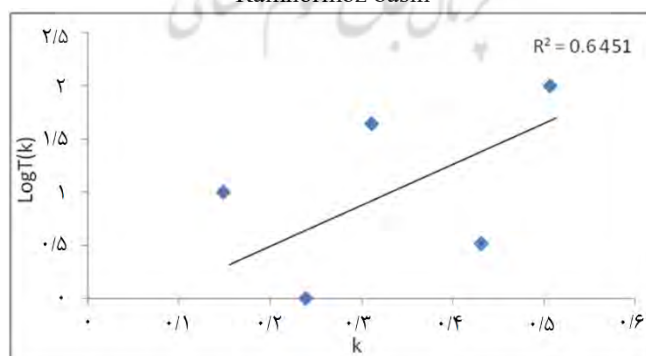
$$\begin{matrix} 1/27 & 1 & 3 \\ & 2 & 1/33 \\ & & 0/5 \end{matrix}$$

در ایجاد ماتریس با توجه به معادله‌ی ۵ و ۸، رده بخش شرقی حوضه رامهرمز در مرتبه سوم با ایجاد سه ستون ماتریس و بخش غربی حوضه در رده چهارم، با چهار ستون ماتریس ایجاد شده است. در ادامه مطابق با ماتریس بالا مقدار $T(k)$ با توجه به رابطه‌ی ۶ تعیین می‌شود. با توجه به شاخه آبراهه اصلی بخش شرقی حوضه رامهرمز در مرتبه سوم ($0 < K < 3$) و بنابراین، $T1 = (0/5)$ ، $T2 = (1/75)$ ، $T3 = (1)$ ، بخش غربی حوضه رامهرمز در رده ی چهارم پس ($0 < K < 4$) و بنابراین، $T1 = (1/27)$ ، $T2 = (1/16)$ ، $T3 = (1/66)$ می باشد؛ قراردادن این اعداد در رابطه‌ی (۳-۱۰) و رسم نمودار لگاریتمی TK برحسب مقادیر K در رابطه‌ی ۱۰ ایجاد می‌گردد. مقادیر ثابت $a = (0/5)$ و $c = (3/5)$ با ضریب تعیین کم ($0/3564$) بخش غربی حوضه رامهرمز و مقادیر ثابت $a = (1/161)$ و $c = (47/257)$ که با ضریب تعیین متوسط ($0/6451$) شرق حوضه رامهرمز محاسبه گردید (شکل‌های ۴ و ۵).



شکل (۴): وابستگی $T(K)$ با مقادیر ثابت $a = 0/5$ و $c = 3/5$ در بخش شرقی حوضه رامهرمز

Fig (4): Dependence of $T(K)$ with constant values of $a = 0.5$ and $c = 3.5$ in the eastern part of Ramhormoz basin



شکل (۵): وابستگی $T(K)$ با مقادیر ثابت $a = 1/161$ و $c = 47/257$ در بخش غربی حوضه رامهرمز

Fig (5): Dependence of $T(K)$ with constant values of $a = 1.161$ and $c = 47.257$ in the western part of Ramhormoz basin.

در ادامه پارامترهای توکوناگا را در رابطه‌ی ۹ قرار داده و Rb را تعیین می‌کنیم.

مقدار Rb بخش شرقی حوضه:

$$Rb = \frac{2 + 3.5 + 0.5 + \sqrt{(2 + 3.5 + 0.5)^2 - 8(3.5)}}{2} = 3/99$$

مقدار Rb بخش غربی حوضه:

$$Rb = \frac{2 + 47.257 + 1.161 + \sqrt{(2 + 47.257 + 1.161)^2 - 8(47.257)}}{2} = 4/85$$

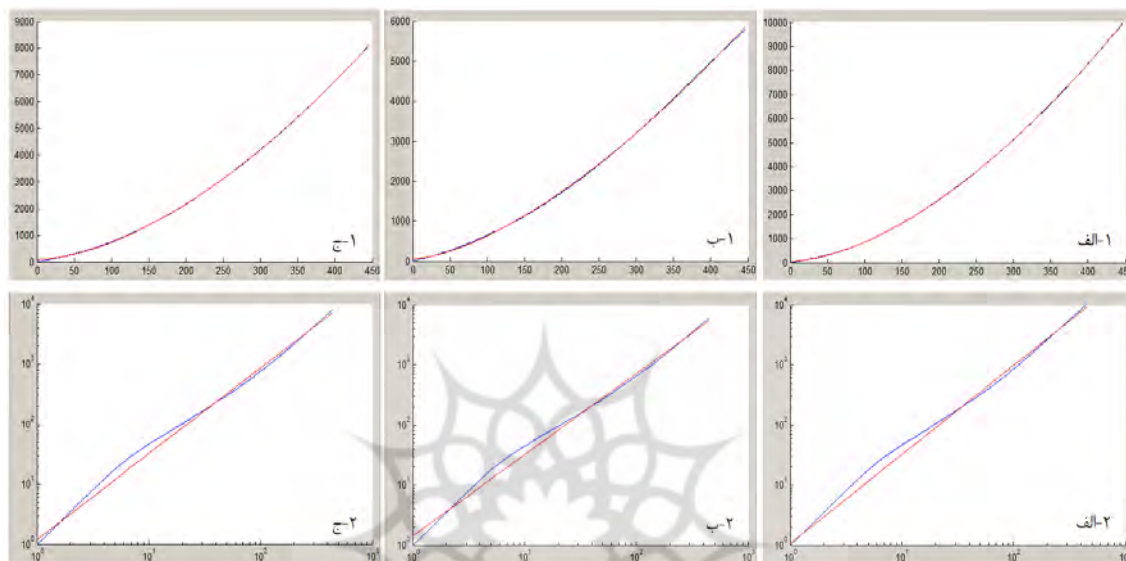
در نگاه اول بین مرتبه و طول شاخه‌ها هیچ گونه ارتباط و همبستگی وجود ندارد و همان‌طور که در (جدول ۷ و ۱۰) مشاهده می‌شود؛ با افزایش مرتبه، میانگین طولی انشعابات رود نیز افزایش می‌یابد؛ زیرا همان‌گونه که شاخه‌ها به هم پیوند می‌خورند، میزان دبی افزایش یافته و قدرت پیشروی رودخانه بیشتر می‌شود.

نتایج بعد همبستگی: بعد فرکتالی و حساسیت به شرایط اولیه، از ویژگی‌های عمده یک سیستم آشوبناک هستند. در روش بعد همبستگی، بعد فرکتالی سیستم جهت شناسایی رفتار آشوبناک سیستم برآورد می‌شود (ذاکرمشقق و انیس‌حسینی، ۱۳۹۲). در این رابطه مطابق با رابطه‌های (۱۱ تا ۱۵) بعد فرکتالی همبستگی حوضه رامهرمز و بخش‌های شرقی و غربی آن بین (۱/۴۲ تا ۱/۶۸) با ضریب همبستگی بالا محاسبه گردیده است، که بیانگر رفتار آشوبناکی نسبتاً بالای حوضه و بخش‌های آن می‌باشد (جدول ۱۱) و (شکل ۶).

جدول (۱۱): نتایج محاسبات نمودار همبستگی حوضه رامهرمز

Table (11): Results of Ramhormoz Basin correlation diagram calculations

حوضه	پارامترها	D	ضریب همبستگی
حوضه رامهرمز	نمودار غیرخطی	۱/۶۸	۰/۹۹۹۹۸۹
	نمودار لگاریتم خطی	۱/۴۸۱	۰/۹۸۶۴۱۵
بخش شرقی	نمودار غیرخطی	۱/۵۴۲	۰/۹۹۹۸۶۸
	نمودار لگاریتم خطی	۱/۳۴۷	۰/۹۸۹۰۶۷
بخش غربی	نمودار غیرخطی	۱/۶۸۳	۰/۹۹۹۹۵۸
	نمودار لگاریتم خطی	۱/۴۲۴	۰/۹۸۲۵۵۴



شکل (۶): نمودار همبستگی: ۱: نمودار غیرخطی، ۲: نمودار لگاریتم خطی و الف: حوضه رامهرمز، ب: بخش شرقی و ج: بخش غربی

Fig (6): Correlation diagram: 1: Nonlinear diagram, 2: Linear logarithm diagram and A: Ramhormoz basin, B: Eastern part and C: Western part

۴- نتیجه‌گیری

به منظور بررسی ارتباط بین شبکه زهکشی، فرم‌ها و الگوها در ژئوسیستم‌های رودخانه‌ای و همچنین پیش‌بینی الگوی رفتار شبکه آبراهه‌های حوضه رامهرمز، از قوانین فرکتالی حاکم بر فرم‌های ژئوسیستمی استفاده گردید. در شکل‌گیری و تکامل شبکه‌های آبراهه‌ای در بستر حوضه آبریز که به‌عنوان یک هویت ژئوسیستمی شناخته می‌شوند، پیدایش الگوهای شاخه درختی در حوضه مورد مطالعه، نتیجه پاسخ‌های غیرخطی جریانات رسوب و رواناب به ویژگی‌های ذاتی و بیرونی حوضه می‌باشد. در دیدگاه رفتارهای فرکتالی، ویژگی همانندسازی در طول زمان الگوهایی را در بستر حوضه به وجود می‌آورند که بنا بر ویژگی‌های زايشی و چگونگی تحولات، عملکرد منحصر به فردی را در طی بلوغ یک حوضه آبریز به نمایش می‌گذارند.

مطابق نتایج تعداد شاخه‌های آبراهه‌ها در بخش شرقی و غربی حوضه رامهرمز که در رده (۱) و (۲) قرار دارند، بیش از سایر رده‌هاست. از علل فراوانی شاخه‌ها در مرتبه پایین، نظم جانبی در حوضه و بخش‌های آن می‌باشد؛ اما به مرور با برخورد به زاویه‌های مختلف شیب از حالت نظم جریان خارج می‌شوند. همچنین در قسمت‌هایی از حوضه که شیب بیشتر می‌شود، جریان آبراهه‌ها به طور موازی با یکدیگر قرار دارند. بعد فرکتال بخش شرقی حوضه رامهرمز برابر با (۱/۳۹) با (۲۸) شاخه آبراهه و نسبت انشعاب هورتون (۲/۸۷)، بخش غربی حوضه رامهرمز

با بعد فرکتالی (۱/۵۷) با (۵۴) شاخه آبراهه و نسبت انشعاب هورتون (۳/۴) بیانگر این است که میانگین نسبت انشعاب با زیاد شدن رده‌ها افزایش پیدا می‌کند. همچنین نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد میانگین طولی آبراهه‌های حوضه رامهرمز با میانگین نسبت انشعاب رابطه مستقیم دارند و هر چقدر تعداد آبراهه‌ها بیشتر شود، نسبت انشعاب، تراکم زهکشی و مقدار بعد فرکتال بیشتر می‌شود. میانگین طولی در بخش شرقی حوضه رامهرمز به ترتیب برای رده‌های ۱، ۲، ۳ (۳/۰۳، ۸/۴۵، ۱۲/۴۱) و در بخش غربی حوضه به ترتیب برای رده‌های ۱، ۲، ۳، ۴ (۳/۵۱، ۱۴/۳۷، ۱۰/۱۹، ۱۷/۶۲) می‌باشد. مقادیر نسبت طول بخش‌های رودخانه نیز نشان از تغییرات در شیب و توپوگرافی دارد. الگوی زهکشی حوضه مورد مطالعه به دلیل وجود سازندها و رسوبات سست کواترنری و دامنه‌های پوشیده از رسوبات تبخیری، مارن، سنگ آهک و شیل، تعداد زیادی شاخه رتبه اول و حتی دوم را به وجود آورده است؛ به طوریکه جنس سازندهای منطقه مورد مطالعه تأثیر آشکاری در تراکم زهکشی و ایجاد شبکه شاخه درختی دارند و شاخه‌های ایجاد شده به خصوص در مرتبه‌های پایین‌تر متأثر از سازندهای حوضه می‌باشند. این امر تعداد زیادی شاخه رتبه اول و حتی دوم را در سازندهای سست از جمله رسوبات آبرفتی و گچساران به وجود آورده و به شبکه زهکشی اضافه نموده و در رتبه بقیه شاخه‌های آبراهه نیز اثر مستقیمی دارد. بین بعد فرکتال و پارامترهای مورفومتری حوضه روابط معناداری برقرار می‌باشد. بعد فرکتال محاسبه شده معرف نسبت انشعاب متوسط و مدت زمان اندک برای رسیدن به جریان دائمی است. به طوریکه با افزایش مرتبه، میانگین طولی انشعابات رود نیز افزایش می‌یابد؛ زیرا همان‌گونه که شاخه‌ها به هم پیوند می‌خورند، میزان دبی افزایش یافته و پیک هیدروگراف رودخانه نیز بهمان نسبت بیشتر خواهد بود؛ در نتیجه قدرت پیشروی رودخانه بیشتر می‌شود. به این ترتیب تعداد انشعابات رودخانه از مرتبه‌های گوناگون، همچنین سطح و طول این انشعابات از رابطه توانی و فرکتالی تبعیت می‌کنند؛ لذا فرکتال به عنوان روش مناسب برای نشان دادن تغییرات حوضه می‌توان مورد تحلیل قرار گیرد. نتایج بعد فرکتال همبستگی بیانگر رفتار آشوبناکی نسبتاً بالای حوضه می‌باشد و نشان می‌دهد که یکی از ویژگی‌های انشعاب شبکه آبراهه‌های حوضه آبریز رودخانه رامهرمز در هر دو بخش شرقی و غربی، حساسیت بسیار به آبراهه‌های رده‌ی یک می‌باشد؛ به طوری که در بخش شرقی رده اصلی از ۳۳ به ۲۲ و در بخش غربی از مرتبه اصلی ۴۴ به ۳۳ تغییر می‌کنند. پس می‌توان نتیجه گرفت آشوب به وجود آمده در رتبه‌بندی حوضه هم تأثیر می‌گذارد و کوچک‌ترین تغییر در رده‌های این شبکه زهکشی منجر به تغییرات بزرگ در کل سیستم انشعاب آبراهه‌های حوضه می‌گردد که با یافته‌های (علمی‌زاده و همکاران ۱۳۹۳؛ انور و همکاران، ۲۰۱۹) همخوانی دارد. در نتیجه این سیستم به شرایط اولیه حساس بوده و کل سیستم در نتیجه یک تغییر کوچک دچار تغییر بزرگ می‌شود. از طرف دیگر پدیده‌ای که در نگاه اول دارای هیچ قاعده و نظم خاصی نیست، مطابق روابطی که بیان شد دارای نظم شده و به طور دقیق قابلیت بررسی دارد.

۵-منابع

- Anwar, N., Tunas, I., Lasminto, U., (2019). A synthetic unit hydrograph model based on fractal characteristics of watersheds, *International Journal of River Basin Management*, 17:4, 465-477.
- Ariza, V. A., Hornero, J., Gutiérrez, F., Rave, E., (2013). Multi-fractal analysis applied to the étude, of DEM-based stream, *Geomorphology*, 197:85-95.
- Asghari Saraskanroud S, Zeinali B. (2016). Investigation of meandering pattern Germe Chay River in Azarbayjan Sharghi province by geomorphology and Fractal methods. *GeoRes*, 30 (4) :64-79.
- Bartolini, C., (2012). Is the morphogenetic role of tectonic overemphasized at times? *Boll. Geof. Teor. Appl.* 53(4), pp.459-470.
- Buzsaki, G., Logothetis, N., Singer, W., (2013). Scaling brain size, keeping time: evolutionary preservation of brain rhythms. *Neuron*, (2013), 80:751-64.
- Carke, J., Aher, P.D., Adinarayana, A., Gorantivar, J., (2015). Prioritization of Watersheds Using Multicriteria Evaluation Through Fuzzy Analytical Hierarchy Process. *Agricultural Engineering Int: CIGR Journal*, 15(1). pp. 11-18.
- Chavan, S.R., & Srinivas, V.V. (2015). Effect of DEM source on equivalent Horton-Strahler ratio based GIUH for catchments in two Indian river basins. *Journal of Hydrology*, 528, 463-489.
- Donadio, C., Magdaleno, F., Mazzarella, A., Kondolf, G. M., (2014). 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, pp. 1975-1984.
- Durighetto, N., Vingiani, F., Bertassello, L. E., Camporese, M., & Botter, G. (2020). Intraseasonal Drainage Network Dynamics in a Headwater Catchment of the Italian Alps. *Water Resources Research*, 56(4).doi:10.1029/2019wr025563.
- Elmizadeh, H., & Abasi, A. (2018). Order_matrix Analysis of Micro Drainage Network Emerged in Dried Bed of Urmia Lake. *Quantitative Geomorphological Research*, 6(4), 147-159.
- Elmizadeh, H., MahPeykar, O., Saadatmand, M., (2015). Investigation of Fractal Theory in River Geomorphology: A Case Study of Zarrineh River. *Quantitative Geomorphological Research*, 3(2), 130-141.
- Fattahi, M., Kamyab, S. (2019). Compliance Process of the Geo-morphological indices of the watershed with the Multi-fractal Properties of the River Network. *Iran-Water Resources Research*, 14(5), 339-451.
- Fernandez-Martínez, M., Sanchez-Granero, M.A. (2015). How to calculate the Hausdorff dimension using fractal structures, *Applied Mathematics and Computation*, 264: 116-131.

- Gale, S. J., Ibrahim, Z. Z., Lal, J., & Sicinilawa, U. B. T. (2019). Downstream fining in a megaclast-dominated fluvial system: The Sabeto River of western Viti Levu, Fiji. *Geomorphology*, 330, 151–162. doi:10.1016/j.geomorph.2019.01.009.
- Golekar, R.B., Baride, M.V., Patil S.N., (2013). Morphometric analysis and hydrogeological implication: Anjaniand Jhiri river basin Maharashtra, India, *Arch Appl Sci Res*, 5(2): 33-41.
- Gupta, V. K., and Mesa, O. J., (2014). Horton laws for hydraulic–geometric variables and their scaling exponents in self-similar Tokunaga river networks, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 21: 1007-1025.
- Horton, R.E., (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrographical approach to quantitative morphology. In: Christofolletti, A. (Ed.), *Geomorfologi'a Fluvial. O Canal Fluvial*, vol. 1. Ed. Blucher, Sao Paulo, Brazil, pp. 312 – 32.
- Joshi, L. M., & Kotlia, B. S. (2018). Tectonic footprints and landscape evaluation along Kulur River valley, Kumaun Lesser Himalaya, India. *Journal of Asian Earth Sciences*, 162, 121–136. doi:10.1016/j.jseaes.2018.04.023.
- Karam, A., Saberi, M., (2014). Calculation of fractal dimension in drainage basins and its relationship with some geomorphological characteristics of the basin (Case study: North Tehran catchments), *Quantitative Geomorphological Research*, 4(3), 153-167.
- 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.
- Kovchegov, Y., and Zaliapin, I., (2018). Tokunaga self-similarity arises naturally from time invariance, Chaos: An Interdisciplinary, *Journal of Nonlinear Science* .Volume 28, Issue 4. 10.1063/1.5029937.
- Kovchegov, Y., and Zaliapin, I., Fofoula-Georgiou, E. (2021). Critical Tokunaga model for river networks, *Physical Review Journals*. E 105, 014301.
- Utomo, K. S., Sutopo, Y., & Adi, M. H. (2019). Drainage Network System of Sekaran Village, Gunungpati District, Semarang City. *Jurnal Teknik Sipil Dan Perencanaan*, 21(1), 39–45. doi:10.15294/jtsp.v21i1.18301.
- Liao, Z., Gu, X., Xie, J., Wang, X., & Chen, J. (2019). An integrated assessment of drainage system reconstruction based on a drainage network model. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(26), 563–576. doi:10.1007/s11356-019-05280-1.
- McConnell, M. and Gupta, M. (2008). A proof of the Horton law of stream numbers for the Tokunaga model of river networks, *World Scientific Publishing Company*, Vol. 16, No. 3, 227–233
- Meixner, T., Williams, Z.C., Pelletier, J.D., (2019). Self-affine fractal spatial and temporal variability of the San Pedro River, southern Arizona, American Geophysical Union. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124, (6), p. 1540-1558

- Méndez-Quintas, E., Santonja, M., Pérez-González, A., Arnold, L. J., Demuro, M., & Duval, M. (2020). A multidisciplinary overview of the lower Miño River terrace system (NW Iberian Peninsula): A response to comments by Viveen et al. *Quaternary International*, 565, 129–135. doi:10.1016/j.quaint.2020.09.037.
- Moavi, M., & elmizadeh, H. (2020). Analysis of Form and Patterns of Ramhormoz Basin Drainage Network Using Order Matrix Model. *Quantitative Geomorphological Research*, 9(1), 172-183. doi: 10.22034/gmpj.2020.109541
- Newman, W.I., Turcotte, D.L., Gabrielov, A.M., (1997). Fractal Trees with Side Veltri, M., Veltri, P., Maiolo, M., (1996), On the fractal description of natural channel networks, *Journal of Hydrology*, 187: 137-144.
- Panahi, R., moshashaie, M., moshashae, M. (2022). Gorphological Analysis of the Mereg Mahidasht River. *Hydrogeomorphology*, 9(32), 62-43. doi: 10.22034/hyd.2022.49931.1622
- Parsons, M., & Thoms, M. C. (2018). From academic to applied: Operationalising resilience in river systems. *Geomorphology*, 305, 242–251. doi:10.1016/j.geomorph.2017.08.040.
- Parvaneh, Z., & elmizadeh, H. (2022). Analysis of geometric order of drainage networks using Tokunaga model and capacity dimension (Case study: Bashar river basin). *Quantitative Geomorphological Research*, 11(1), 171-182. doi: 10.22034/gmpj.2022.334599.1339
- Peckham, S.D., (1995). New Results for Self-Similar Trees with Applications to River Networks, *Water Resources Research*.31, 1023.
- Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Pourghasemi, H. (2015). Sub-watershed flooding prioritization using morphometric and correlation analysis (Case study: Golestan Watershed). *Iranian journal of Ecohydrology*, 2(2), 151-161. doi: 10.22059/ije.2015.56241.
- Rahmizadegan, M., Merrikhpour, M. (2016). Determination of Basin's Physiographic Characteristics Derived from the ASTER Digital Elevation Model (Case Study: The KabudRahang Plain, Hamedan, IRAN). *Water Resources Engineering*, 9(29), 103-124.
- Rezaei, H., Jabbari Gharabagh, S. (2017). Noise Reduction Effect on Chaotic Analysis of Nazluchay River Flow. *Water and Soil Science*, 27(3), 239-250.
- Rozo, G. A., Nogueira, C., Soto, C., (2014). Remote sensing-based analysis of the planform changes in the Upper Amazon River over, *Journal of Arid Environments*, period 19, pp425-439
- Shayan, S., Maghsoudi, M., Gol Alizade, M., Sharifi Kiya, M., Norbakhsh, S. (2016). Spatial analysis of aeolian landforms by fractal theory (Case study: Ardestan Rig). *Physical Geography Research Quarterly*, 48(2), 231-245. doi: 10.22059/jphgr.2016.59365.
- Soltani, S., ghohroudi tali, M., sadoogh, S. (2019). Application of remote sensing and fractal mathematical model in studying the behavior and variations of geomorphologic landforms of Aras river. *Quantitative Geomorphological Research*, 7(4), 73-92.

- Sowpamilk, M., (2014). jaira., implication of fractal dimension on properties of rivers and river basins, Vol. 5, Issue12, December(2014), pp. 155-164.
- Tarboton, D.G. (1996). Fractal river networks, Horton's laws and Tokunaga cyclicity, *Journal of Hydrology*, 187, 105-117.
- Tunas, I., Anwar, N ., Lasminto, U., (2016). Fractal Characteristic Analysis of Watershed as Variable of Synthetic Unit Hydrograph Model, *The Open Civil Engineering Journal*, 10(1):706-718 · October 2016 with 168 Reads.
- Turcotte, D.L., (2007). Fractal and chaos in geology and geophysics, Cambridge University Press, Cambridge, pp.1- 398.
- Yamani, M., Alaei Taleghani., M, Shahbazi, Sabrieh. (2012). Morphotectonic and its impact on the changes in bed and pattern. *Journal of Geography and Regional Development*, 9(2).
- Yan, Y., Tang, J., & Pilesjö, P. (2018). A combined algorithm for automated drainage network extraction from digital elevation models. *Hydrological Processes*, 32(10), 1322–1333. doi:10.1002/hyp.11479.
- Yang, H., and Shi, C.h., (2017). The Fractal Characteristics of Drainage Networks and Erosion Evolution Stagesof Ten Kongduis in the Upper Reaches of the Yellow River, ChinaSource: *Journal of Resources and Ecology*, 8(2):165-173.
- Yang, H., Yang, X., Huang, W., Li, A., Hu, Z., Huang, X., & Yang, H. (2020). 10Be and OSL dating of Pleistocene fluvial terraces along the Hongshuiba River: Constraints on tectonic and climatic drivers for fluvial downcutting across the NE Tibetan Plateau margin, China. *Geomorphology*, 348, 106884. doi:10.1016/j.geomorph.2019.106884.
- Yu, F., Serena C., Kyungrock, P., Gavan, M.G., Suresh, P., Rao, C., Montanari, A ., Jawitz, JW., (2018). Globally Universal Fractal Pattern of Human Settlements in River Networks. *American Geophysical Union*. pp:1-20.
- Zakir Mushfeq, M., Anis Hosseini, Massoud. (2013). Analysis and Prediction of the Kashkan River Flow using Chaos Theory. *Journal of Hydraulics*, 8(3), 45-61.
- Zanardo, S., I. Zaliapin, and E. Foufoula-Georgiou (2013). Are American rivers Tokunaga self-similar? New results on fluvial network topology and its climatic dependence, *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 118 (1):166-183.
- Zhou, Z., Zhihui, N., Lichun, W., Liang, Z., (2017). Fractal research of transverse sections of a long river channel below a dam, *Environment Earth Science*, 76:553, pp: 11-1.