هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۹، زمستان ۱۳۹۵، صص ۲۰-۱

وصول مقاله: ۹۴/۱۱/۱۱ تأیید نهایی مقاله: ۹۵/۱۱/۰۴

رفتار فرکتالی و ارتباط آن با خصوصیات هیدرومورفومتری حوضه‌های آبریز دامنه‌ی شمالی بینالود

عادل سپهر*[۱]

عذرا خسروی[۲]

زهرا عبدالله‌زاده[۳]

چکیده

در این پژوهش، روابط بین ابعاد فرکتال با خصوصیات مورفومتری حوضه‌های آبریز دامنه‌ی شمالی بینالود مطالعه شده است. هدف مقاله، محاسبه‌ی ابعاد فرکتال حوضه‌های مورد مطالعه و مقایسه‌ی نتایج آن با خصوصیات مورفومتری آنها و تحلیل رفتار فرکتالی این حوضه‌ها بوده است. در ابتدا رودخانه‌های طرق، گلستان، اسجیل، گلمکان، فریزی و اخلمد در دامنه‌های شمالی بینالود انتخاب و مرز حوضه‌های آبریز آنها با استفاده از عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های توپوگرافی مشخص شد. سپس شاخص‌های مورفومتری و هیدرولوژی حوضه مانند نسبت انشعاب، طول شبکه‌های رودخانه، تعداد شبکه‌ها، مساحت حوضه‌ها و طول آبراهه‌ی اصلی هر یک از حوضه‌ها اندازه‌گیری و در نهایت بعد فرکتال برای هر حوضه محاسبه گردید. بر اساس محاسبات صورت گرفته، حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی اسجیل دارای بیشترین مقدار بعد فرکتال، و حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی طرق حداقل مقدار عددی بعد فرکتال را دارا می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش مشخص‌کننده‌ی

۱ـ استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران (نویسنده مسئول *)
Email:adelsepehr@um.ac.ir

۲ـ دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳ـ کارشناس ارشد مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

روابط معناداری بین ابعاد فرکتال حوضه‌ها، شبکه‌های زهکشی، فرم‌ها، الگوهای نهایی و خصوصیات مورفومتری آنها می‌باشد. بررسی رابطه‌ی بین بعد فرکتال نسبت انشعاب با مساحت حوضه‌های مورد مطالعه، یک رابطه‌ی معکوس و منفی را نشان می‌دهد، به‌طوری که در بین حوضه‌های مورد مطالعه، حوضه‌ی آبریز اسجیل با کمترین مساحت، دارای بیشترین بعد فرکتال انشعاب رودخانه‌ای و حوضه‌ی آبریز طرق با بیشترین مساحت، حداقل بعد فرکتال انشعاب روخانه‌ای را نشان می‌دهد. همچنین نتایج ضریب همبستگی در سطح اطمینان ۹۵٪ بین پارامترهای مورفومتری و ابعاد فرکتال انشعاب رودخانه‌ای و تراکم زهکشی، نشان داد که بعد فرکتال انشعاب رودخانه‌ای و شکل حوضه، بیشترین ضریب همبستگی را داراست.

کلمات کلیدی: بعد فرکتال، ویژگی‌های هیدرومورفومتری، آشوب، دامنه‌های شمالی بینالود.

مقدمه

در دیدگاه سیستمی، سیستم‌های ژئومورفیک (ژئوسیستم‌ها)، سیستم‌هایی پویا با رفتار پیچیده‌ی غیرخطی هستند. پاسخ‌های غیرخطی این سیستم‌های باز در شرایط نامتعادل، ساختارها و الگوهای ناپایدار را در آستانه‌های تعادلی رقم می‌زنند. مطالعه‌ی نظم و تکرار موجود در بسیاری از پدیده‌های طبیعی مانند شکل ابرها، رشته کوه‌ها، شبکه آبراهه‌ای، الگوهای زهکشی و پوشش گیاهی، منجر به خلق روابط ریاضی موجود میان این الگوهای تکرارشونده در قالب مفهوم هندسه فرکتال شده است. واژه‌ی فرکتال مشتق از واژه لاتین فراکتوس[1] به معنی سنگی شکسته و خردشده می‌باشد (کرم، ۱۳۸۹: ۷۳ و۶۷) و به عنوان زیرشاخه‌ای از آنالیز مختلط برای رفع ضعف‌های اقلیدسی در بیان و مدل‌سازی از پدیده‌های طبیعی گسترش

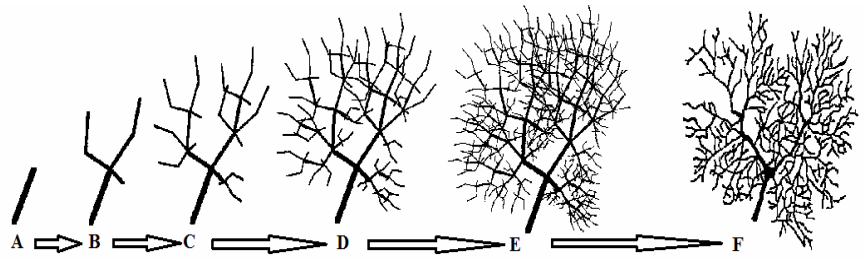
1- Fractus

یافته است. واژه‌ی فرکتال در سال ۱۹۶۷ توسط مندلبروت[1]، هنگام مطالعه روی الگوهای موجود در خطوط ساحلی غرب بریتانیا مطرح شد. ویژگی فرکتالی شبکه‌های زهکشی، یکی از اولین نمونه‌های رفتار فرکتالی بود که در سال ۱۹۸۲ توسط مندلبروت ارائه داده شد (تورکات[2]، ۲۰۰۷: ۳۰۲). هندسه‌ی فرکتال بیانگر یک الگوی تکرارشونده در اشیا و تصاویر می‌باشد، یعنی اگر هر تصویر یا شکل دارای این خاصیت، به قسمت‌های کوچک‌تر (براساس مقیاس فرکتال) تقسیم شود، هر کدام از این قسمت‌های کوچک‌تر خود یک کپی کوچک شده از شکل اولیه می‌باشد که در دیدگاه سیستمی این رفتار نوعی خود سازماندهی بحرانی به حساب می‌آید. هدف هندسه‌ی فرکتالی، محاسبه و یافتن این بعد هندسی به منظور پیش‌بینی رفتار طبیعت و دینامیک الگوهای موجود در آن است.

ژئوسیستم‌ها دارای اشکال هندسی فراکتالی‌اند و از نظمی خاص، اما پیچیده پیروی می‌کنند. مرزهای آن‌ها نیز از همین هندسه در ارتباط با برهم کنش نیروهای درونی و بیرونی در طول دوره‌های زمانی متفاوت شکل می‌گیرند؛ اغلب ژئوسیستم‌ها از اشکال متضاد و دوگانه در چارچوب هندسه‌ی فراکتالی متقارن ساخته شده‌اند که از جمله‌ی این الگوها می‌توان به شبکه‌های رودخانه‌ای، خطوط ساحلی و پهنه‌های ماسه‌ای اشاره نمود. شبکه‌های رودخانه‌ای به‌عنوان یک هویت ژئوسیستمی، یکی از بارزترین الگوهای فرکتالی در طبیعت به‌شمار می‌روند. این الگوها به‌شکل قابل توجهی ساختارهای درخت‌مانندی را ایجاد می‌کنند که در جهت ایجاد تعادل در سیستم رودخانه‌ای، امکان حمل رسوب و رواناب را تا پایدارترین قسمت یک سیستم آبریز (خروجی حوضه) فراهم کرده و رفتارهای فرکتالی را در این فرآیند از خود بروز می‌دهند. به عبارتی بر طبق قوانین

1- Mandelbrot
2- Turcotte

ترمودینامیک، رفتار آشوبناک جریان آب در بالادست حوضه‌های آبریز که متأثر از متغیرهای مستقل (ناهمواری اولیه، زمین‌شناسی، اقلیم و زمان) و متغیرهای وابسته ژئوسیستم (چورلی[1] و شوم[2]، ۱۳۷۵) نظیر مورفومتری، مورفولوژی دامنه‌ها، مورفولوژی مواد رسوبی، مورفولوژی شبکه‌ی زهکشی، جنس بستر و سایر خصوصیات وابسته است، در جهت رسیدن به یک نقطه تعادل با حداقل انرژی (خروجی حوضه) با آزاد کردن انرژی و افزایش آنتروپی ترمودینامیک، الگوهای آبراهه‌ای را بر بستر حوضه سازماندهی کرده و بسته به میزان انرژی خود بر تراکم زهکش اثرگذار خواهد بود. خصوصیات هندسی یک شبکه‌ی آبراهه‌ای به‌دنبال فرآیند انشعاب یا شاخه‌شاخه شدن می‌تواند به آسانی با رشد گام به گام درخت فرکتالی تشریح شود (هرگارتن[3]، ۲۰۰۲). این فرآیند با یک الگوی شاخه‌ای واحد به‌نام آغازگر فرکتال[4] آغاز می‌شود (شکل ۱) و طی فرآیند همانندسازی برپایه الگوی اولیه شکل کلی یک شبکه‌ی رودخانه‌ای را در طول زمان در یک حوضه‌ی آبریز ایجاد می‌نماید.



شکل (۱) فرآیند انشعاب با عملکرد همانندسازی آغازگر فرکتال (A) در شبکه‌ی زهکشی یک حوضه‌ی آبریز تا تکامل فرآیند در الگوی نهایی (F) (اقتباس از پلیونیسز[5]، ۱۹۸۹)

1- Chorley
2- Schumm
3- Hergarten
4- Fractal initiator
5- Pellionisz

در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌های فرکتالی برای توصیف ویژگی‌های پدیده‌های ژئومورفولوژیک به سرعت افزایش یافته است. مطالعات اولیه استفاده از فرکتال در ژئومورفولوژی بر روی عناصر خطی مانند سواحل، رودخانه‌ها و گسل‌ها متمرکز بوده است (مندلبروت، ۱۹۶۷؛ رابرت[۱]،۱۹۸۸؛ کانک[۲] و دینگ[۳]، ۱۹۹۱؛ زو[۴]، ۱۹۹۱؛ جین[۵] و همکاران، ۱۹۹۷). در دهه‌ی پایانی قرن بیستم، روش‌های برآورد ابعاد فرکتالِ لندفرم‌هایِ سطحی پیشنهاد شد که اکثر مطالعات صورت گرفته در این زمینه تأیید کردند که تغییرات بعد فرکتال بر روی سطوح، وابسته به محل و همچنین وابسته به مقیاس هستند. در سال‌های اخیر، برخی گزارش‌های مدل‌های فرکتالی سلولی به تجزیه و تحلیل انواع خواص فرکتالی لندفرم‌ها پرداخته‌اند و نتایج بهتری حاصل شده است (لیسی‌بی و همکاران، ۲۰۱۲ :۱۵۱).

پژوهش‌های مختلفی در خصوص فرکتال، خود تنظیمی[۶] و آشوب در ژئومورفولوژی ساحلی و جریانی صورت گرفته است (رودریگوئز[۷] و رینالدو[۸]، ۱۹۹۷؛ پلتیر[۹]، ۱۹۹۹؛ باآس، ۲۰۰۲). گیولرمو[۱۰] و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از هندسه‌ی فرکتال و دو روش مجاورت و جعبه‌های شمارش، بعد فرکتال در کانال جزرومدی باهیرا بالانکا[۱۱] در آرژانتین را برآورد کردند. نتایج ایشان نشان داد که عمده‌ی کانال‌های منطقه دارای ویژگی‌های خودتکراری هستند، اما سه کانال ازکانال‌های مورد مطالعه، فاقد

1- Robert
2- Kong
3- Ding
4- Zhou
5- Jin
6- Self-organized
7- Rodrigues
8- Rinaldo
9- Pelletier
10- Guillermo
11- Bahı´a Blanca

بعد فرکتال می‌باشند. تورکات (۲۰۰۷) در بررسی ابعاد فرکتال شبکه‌های زهکشی، پس از کاربرد مدل‌های مختلف فرکتال به این نتیجه رسید که بهترین مدل فرکتال جهت بررسی ابعاد فرکتال شبکه‌های زهکشی، مدل DLA[1] است. همچنین پلتیر (۲۰۰۷) با استفاده از مدل ساده و شبیه‌سازی شده، به مطالعه‌ی رفتار فرکتالی لندفرم‌های جریانی مانند آبشارها و پشته‌ها پرداخت. شن[۲] و همکاران (۲۰۱۱) خصوصیات فرکتالی کانال اصلی رودخانه‌ی زرد[۳] در کشور چین را در ارتباط با تکامل زمین‌ساختی منطقه‌ی مورد بررسی قرار دادند.

در پژوهشی دیگر، لیسی‌بی و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی خواص فرکتال لندفرم‌های منطقه ارداس بلوک[۴] در چین پرداخته و خواص فرکتالی لندفرم‌هایی مانند دامنه‌ها، زمین‌های لسی و بیابانی را مطالعه و اثرات فرآیندهای زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی بر خواص فرکتال را بررسی کردند. پاپا نیکولاو[۵] و همکاران (۲۰۱۲) به تعیین ابعاد فرکتال مورفولوژیِ میکروفرم‌های ایجاد شده در رودخانه‌های با بستر گراولی پرداختند.

در ایران، نظریه فرکتال و کاربرد آن در ژئومورفولوژی، به طور پراکنده مورد مطالعه قرار گرفته است (کرم، ۱۳۸۹؛ سپهر، ۱۳۹۳؛ رامشت، ۱۳۸۲؛ اده و همکاران، ۱۳۹۳). موحد و هرمانیس[۶] (۲۰۰۸) آنالیزهای فرکتالی را در نوسانات جریانی رودخانه‌ها مورد مطالعه قرار دادند. در پژوهشی دیگر خانبابایی و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی بعد فرکتالِ حوضه‌های آبریز کارون، واقع در رشته کوه زاگرس

1- Diffusion-limited aggregation
2- Shen
3- Yellow River
4- Ordos Block
5- Papanicolaou
6- Hermanis

پرداخته و رابطه‌ی بین ابعاد فرکتال شبکه‌ی زهکشی و خصوصیات ژئومورفولوژیک این حوضه‌ها را مورد مطالعه قرار دادند.

در این پژوهش، با استفاده از قوانین فرکتالی که وجود دارد، ژئوسیستم‌های رودخانه‌ای دامنه‌های شمالی بینالود و ارتباطی که بین ابعاد فرکتال و ویژگی‌های مورفومتری این حوضه‌ها وجود دارد، مورد بحث و پژوهش قرارگرفته است. این پارامترها شامل: بعد فرکتال تراکم زهکشی[1] و بعد فرکتال نسبت انشعاب[2] می‌باشد. همچنین در این پژوهش، رابطه بین مقدار ارزش عددی ابعاد فرکتال حوضه‌های مورد مطالعه، با خواص هیدرومورفومتری آنها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

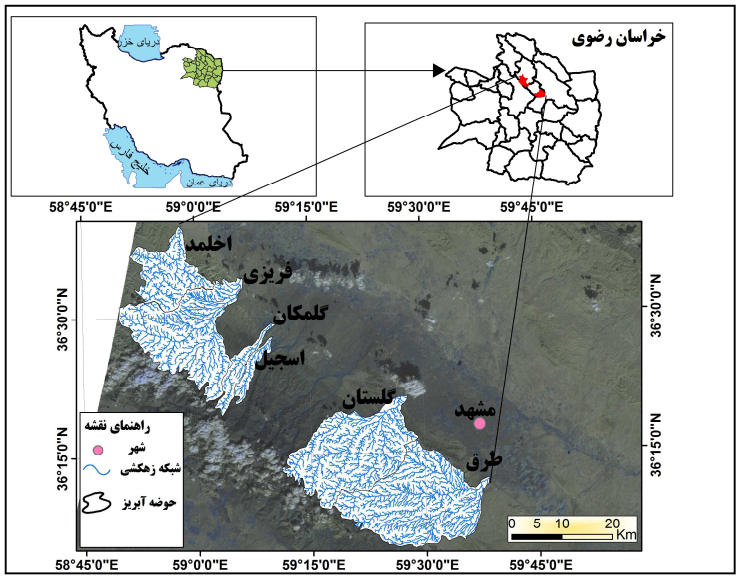
مواد و روش

موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه در شمال شرق ایران و در استان خراسان رضوی در بخش غربی حوضه‌ی بزرگ کشفرود و در دامنه‌های جنوب شرقی رشته کوه بینالود واقع شده است. شکل (۲)، موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه را در ایران و استان خراسان رضوی بر روی تصویر ماهواره‌ای ماهواره لندست سال ۲۰۱۴ میلادی نشان می‌دهد. در این پژوهش، شش حوضه‌ی آبریز اصلی این منطقه شامل حوضه‌های آبریز رودخانه‌های اخلمد، فریزی،گلمکان، اسجیل، گلستان و طرق جهت مطالعه انتخاب شده است (شکل ۳). از آنجا که در بین حوضه‌های موجود در دامنه‌ی شمالی بینالود، داده‌های این شش حوضه نسبت به سایر حوضه‌ها کامل‌تر بوده و در خروجی آنها ایستگاه اندازه‌گیری میزان بار رسوبی وجود داشت، بنابراین این شش حوضه به عنوان مبنای پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند. محدوده‌ی منطقه‌ی

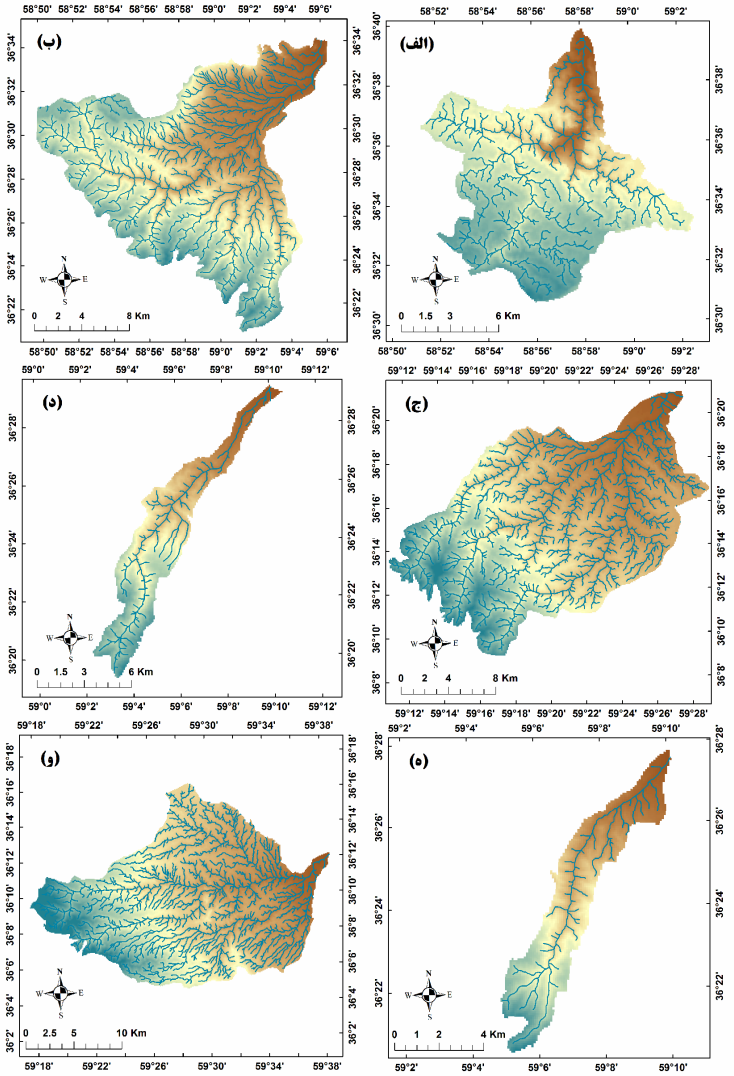
1- Drainage density
2- Bifurcation ratio

مطالعاتی در حد فاصل ´۱۵ °۳۶ تا ´۱۰ °۳۷ عرض شمالی و بین ´۳۵ °۵۸ تا ´۴۰ °۵۹ طول شرقی قرار دارد.



شکل (۲) موقعیت حوضه‌های مورد مطالعه در دامنه‌ی شمالی بینالود
(تصویر سنجنده +ETM سال ۲۰۱۴ با ترکیب رنگی ۵-۶-۷)

رودخانه‌های مورد مطالعه از دامنه‌های شمالی بینالود سرچشمه گرفته و پس از عبور از دشت مشهد به رودخانه کشف رود که بخشی از حوضه‌ی آبریز کشف رود می‌باشد، سرازیر می‌شوند. در بین حوضه‌های مورد مطالعه، حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی طرق دارای بیشترین مساحت (۳۷۰/۴ km2) و حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی اسجیل (۲۶,۷۹ km2) حداقل مساحت را دارا می‌باشد.



شکل (۳) مورفولوژی حوضه‌های مورد مطالعه: الف) حوضه‌ی آبریز اخلمد ب) حوضه‌ی آبریز فریزی ج) حوضه‌ی آبریز گلستان د) حوضه‌ی آبریز گلمکان ه)حوضه آبریز اسجیل و) حوضه‌ی آبریز طرق

مواد و روش

به منظور بررسی ارتباط بین شبکه‌ی زهکشی، فرم‌ها و الگوها در ژئوسیستم‌های رودخانه‌ای و همچنین پیش‌بینی الگوی رفتار حوضه‌های مورد مطالعه از قوانین فرکتالی حاکم بر فرم ژئوسیستم‌ها استفاده شده است و اشکال الگوی منظم یا فرکتال در این سیستم‌ها بررسی شده است. نقشه‌ها و تصاویر استفاده شده جهت گزینش حوضه‌ها را نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و تصویر ماهواره‌ای لندست سنجنده +ETM از گذر ۱۶۰ و سطر ۳۵ در تاریخ 25– 2014-OCT شامل شده است.

در مرحله‌ی اول روند کار، ابتدا نقشه‌های توپوگرافی پایه‌ی محدوده‌ی مورد مطالعه تهیه و سپس بر روی این نقشه‌ها، مرز حوضه‌های آبریز واقع در دامنه‌ی شمالی ارتفاعات بینالود مشخص و از یکدیگر تفکیک گردید. شش حوضه‌ی اصلی که به لحاظ تراکم زهکشی و هم از لحاظ شرایط سیل‌خیزی در استان خراسان رضوی از پتانسیل بالایی برخوردار بودند انتخاب شدند. سپس حوضه‌های آبریز مشخص شده اسکن و در محیط نرم‌افزاری ARCGIS 10.2 لایه‌های وکتوری آنها تهیه گردید. جهت تدقیق مرز حوضه‌های آبریز، لایه‌های تهیه شده به محیط نرم‌افزار Global mapper 15.1 منتقل شده و سپس با استفاده از ابزار Generate Watershed مرز حوضه‌های مورد مطالعه، اصلاح و تدقیق داده شد. بر طبق نقشه‌ی پایه‌ی تولیدی، نقشه‌های شیب، جهت شیب، آبراهه و طبقات ارتفاعی تهیه و مورد استفاده قرار گرفت.

بخش دوم این پژوهش شامل تعیین و انتخاب عوامل مورفومتری بود که به وسیله‌ی آنها بتوان ویژگی‌های فرکتالی این حوضه‌ها را بررسی نمود. جهت پی بردن به قوانین فرکتالی، از عوامل هیدرولوژیک بر اساس پارامترهای مورفومتری استفاده شد. بدین منظور، پارامترهای طول شبکه‌های رودخانه، تعداد شبکه‌ها، مساحت

حوضه‌ها و طول آبراهه‌ی اصلی هر یک از حوضه‌ها محاسبه شد (جدول ۱). جهت مطالعه‌ی رابطه‌ی بین بعد فرکتال و خصوصیات فرم و شبکه‌ی زهکشی حوضه‌های مورد مطالعه، ابتدا پارامترهای نسبت انشعاب[۱]، تراکم زهکشی[۲]، نسبت طولی رودخانه[۳] و عامل فرم حوضه[۴] به ترتیب با استفاده از روابط (۱) تا (۴) محاسبه و در پایان بعد فرکتال شبکه‌های رودخانه هر یک از حوضه‌ها با استفاده از روابط (۵) و(۶) محاسبه و نسبت به یکدیگر مقایسه گردید.

به منظور تعیین رتبه‌ی آبراهه‌های یک حوضه آبریز و یا مقایسه دو حوضه از نظر چگونگی شبکه‌ی آبراهه‌ها در یک درجه‌ی مشخص به تعداد آن در درجه‌ی بزرگ‌تر، از نسبت انشعاب استفاده می‌شود. نسبت انشعاب شاخه‌های بین رتبه‌های متوالی با استفاده از رابطه‌ی (۱) محاسبه شده است (زاهدی و بیاتی خطیبی، ۱۳۹۲: ۶۳):

رابطه‌ی (۱) $Rb = Nu/Nu+1$ و یا

$$Rb= (n1/n2 +n2/n3+.....+ni-1/ni)\ (1/i-1)$$

در رابطه (۱):

Rb: نسبت انشعاب، Nu: تعداد شاخه های آبراهه‌ای از یک درجه‌ی معین

Nu+1: تعداد شاخه‌های یک درجه بالاتر بعدی

زیاد بودن میزان تراکم زهکشی، دلیل بر بالابودن تعداد آبراهه در حوضه‌ی آبریز می‌باشد و نشان‌دهنده‌ی شدت هرزآب و فرسایش در قسمت‌های مختلف حوضه، که خود متأثر از اقلیم و لیتولوژی (جنس زمین) حوضه می‌باشد، است. سیلاب‌های

1- Bifurcation Ratio
2- Drainage Density
3- River Index
4- Form Factor

تند در زمان‌های کوتاه که بعد از بارندگی ظاهر می‌شود، از مشخصه‌ی بارز حوضه‌هایی است که تراکم آبراهه‌ای در آنها بیشتر است. برای محاسبه این ضریب از رابطه‌ی (۲) استفاده شده است (زاهدی و بیاتی خطیبی، ۱۳۹۲: ۴۵):

$$Dd = \sum Li / A \qquad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

در رابطه (۲):

Dd: تراکم زهکشی، Li: مجموع طول کلیه‌ی آبراهه‌ها برحسب کیلومتر

A: مساحت حوضه برحسب کیلومتر مربع

برای محاسبه‌ی نسبت طولی رودخانه Rl نیز از رابطه‌ی (۳) استفاده شده است:

$$R_1 = \frac{r_1}{r_{i+1}} \qquad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

که در آن ri طول رودخانه با رتبه i است.

عامل فرم حوضه بر طبق نظر هورتون، نسبت عرض متوسط حوضه به طول آن است. برای محاسبه این ضریب از رابطه‌ی (۴) استفاده شد:

$$FF = \frac{A}{L2} \quad (۴) \qquad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

در رابطه‌ی (۴):

FF: عامل فرم حوضه

L: فاصله‌ی دورترین نقطه‌ی حوضه تا نقطه‌ی خروجی حوضه

A: مساحت حوضه برحسب کیلومتر مربع

بعد فرکتال تراکم زهکشی (چگالی) به صورت رابطه‌ی (۵) حاصل می‌شود. در اینجا RB نسبت انشعاب و Dd تراکم زهکشی رودخانه می‌باشد، که در واقع می‌توان آن را مشابه رابطه‌ی (۲) در نظر گرفت (تورکات، ۲۰۰۷ : ۳۰۴).

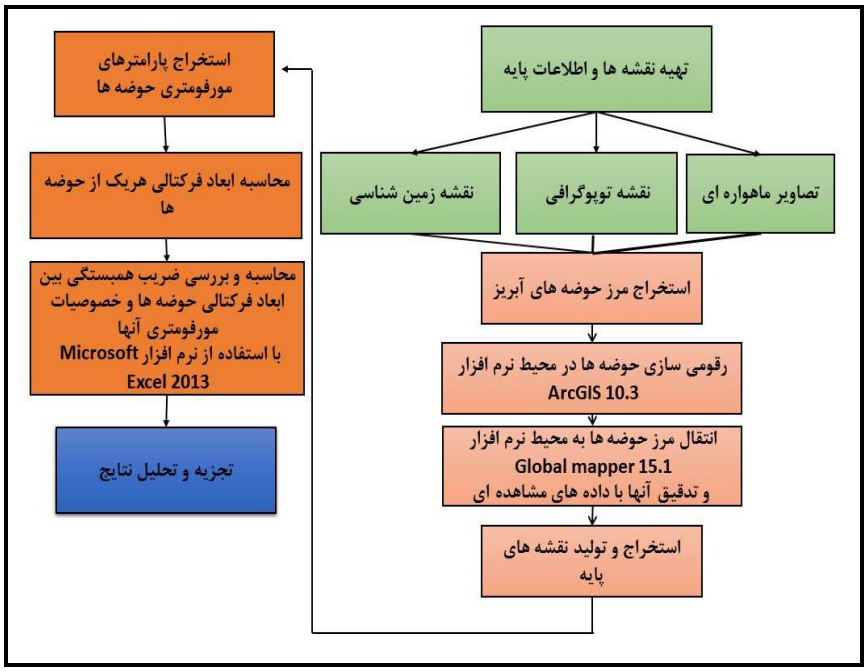
$$D = \frac{Ln\left(\frac{N_i}{N_{i+1}}\right)}{In(\sum li/A)} = \frac{LnR_B}{2nDd} \qquad \text{رابطه‌ی (۵)}$$

بعد فرکتال شبکه‌ی زهکشی (بعد فرکتال نسبت انشعاب)، به صورت رابطه‌ی (۶) حاصل می‌شود.

$$D = \frac{Ln\left(\frac{N_i}{N_{i+1}}\right)}{Ln\left(\frac{ri}{r_{i+1}}\right)} = \frac{LnR_B}{LnR_l} \qquad \text{رابطه‌ی (۶):}$$

در اینجا RB نسبت انشعاب و Rl نسبت طولی رودخانه می‌باشد که در واقع همان رابطه‌ی (۳) می‌باشد.

در بخش سوم، بین ابعاد فرکتالی حوضه‌ها و خصوصیات مورفومتری آنها ضریب همبستگی محاسبه و نمودار و جداول مربوطه ترسیم گردید. سپس مطالعه‌ی بعد فرکتال در حوضه‌های مورد مطالعه، با توجه به ارتباط درونی بین شبکه‌ی زهکشی، فرم‌ها و الگوهای نهایی و همچنین مقایسه بین این عوامل در هریک از حوضه‌ها نسبت به یکدیگر صورت گرفته است (شکل ۴).



شکل (۴) چارت مراحل انجام پژوهش

بحث و نتایج

تحلیل اعداد نهایی منتج از ابعاد فرکتال حوضه‌ها نشان می‌دهد که بعد فرکتال تراکم شبکه‌ی زهکشی در حوضه‌های مورد مطالعه برابر با ۱,۸۶،۲,۰۶ ،۲,۰۳۳، ۲,۶۹۱، ۲,۲۵۱، و ۳,۲۴۲ و همچنین بعد فرکتال انشعاب رودخانه‌ای در این حوضه‌ها برابر با ۱,۷۴، ۱,۷۵، ۱,۷۴، ۲,۷۴، ۱,۶۹، و ۳,۲۱ به ترتیب برای حوضه‌های طرق، گلستان، فریزی، گلمکان، اخلمد و اسجیل می‌باشد (جدول ۱).

جدول (۱) ویژگی‌های هیدرومورفومتری حوضه‌های مورد مطالعه

پارامتر	طرق	گلستان	فریزی	گلمکان	اخلمد	اسجیل
نسبت انشعاب (km/km2)	۳/۴۹۳	۳/۷۸۱	۳/۷۱۹	۴/۵	۴/۱	۷/۴۵
نسبت طول رودخانه (km)	۲/۱۹۱	۲/۱۳۴	۲/۱۲۶	۱/۷۲۹	۱/۸۱	۱/۸۶۷
بعد فرکتال انشعاب رودخانه‌ای	۱/۷۴۹	۱/۷۵۵	۱/۷۴۱	۲/۷۴۷	۱/۶۹	۳/۲۱۷
عامل فرم حوضه ff	۰/۳۶۷	۰/۴۰۳	۰/۵۱۱	۰/۰۹۹	۰/۴۳	۰/۱۱۵
عامل شکل حوضه sf	۲/۷۲۲	۲/۴۸۲	۱/۹۵۷	۱۰/۱۴	۲/۲۸	۸/۷۲۶
طول حوضه- L (Km)	۳۱/۷۵	۲۸/۰۷	۲۴/۲۶	۲۰/۹۵	۱۷/۲	۱۵/۲۹
مساحت (Km2)	۳۷۰/۴	۳۱۷/۵	۳۰۰/۶	۴۳/۲۸	۱۲۹/۳۳	۲۶/۷۹
تراکم زهکشی (km/km2)	۲/۱۲۸	۱/۹۰۷	۱/۹۰۸	۱/۷۴۹	۱/۸۷	۱/۸۵۸
بعد فرکتال تراکم زهکشی	۱/۸۱۶	۲/۰۶	۲/۰۳۳	۲/۶۹۱	۲/۲۵	۳/۲۴۲

بررسی رابطه‌ی بین بعد فرکتال نسبت انشعاب با مساحت حوضه‌های مورد مطالعه (جدول ۲)، یک رابـطه‌ی معکوس و مـنفی را نشان مـی‌دهد، به‌طوری که در بین حوضه‌های مورد مطالعه، حوضه‌ی آبریز اسجیل با کمترین مساحت (۲۶/۷۹km2)، دارای بیشترین بعد فرکتال انشعاب رودخانه‌ای (۳/۲۱) و حوضه‌ی آبریز طرق با حداکثر مساحت (۳۷۰/۴km2) دارای حداقل بعد فرکتال انشعاب روخانه‌ای (۱/۷۴) می‌باشد (شکل ۵ الف). استثنای موجود در این رابطه حوضه‌ی آبریز اخلمد می‌باشد، که با توجه به مقایسه‌ی مساحت کمتر آن (۱۲۹/۳) با حوضه‌ی آبریز طرق و فریزی، دارای کمترین بعد فرکتال انشعاب رودخانه‌ای است که این متأثر از، زمین‌شناسی متفاوت این حوضه، قرارگیری آن در آهک‌های توده‌ای ژوراسیک و دارا بودن الگوی زهکشی متفاوت نسبت به دیگر حوضه‌های منطقه و فقر زهکشی می‌باشد. این امر به نوعی بازگوکننده‌ی آرامش بیشتر در حوضه‌های قدیمی‌تر است.

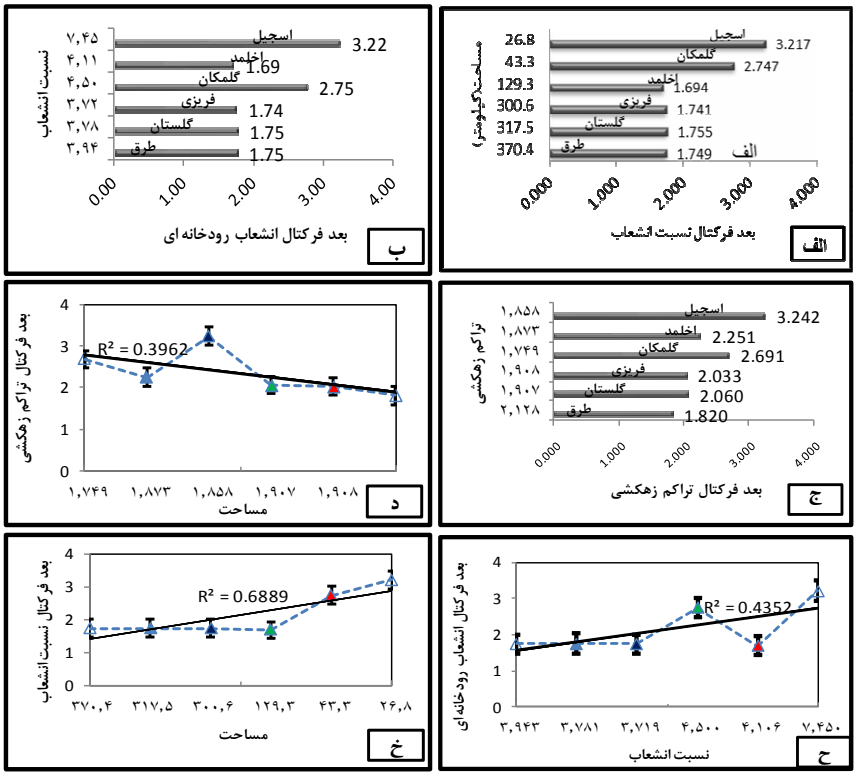
جدول (۲) هـمبستگی بین ابعاد فرکتال و مـیانگین خصوصیات مورفومتری حوضه‌ها در کل حوضه‌های مورد مطالعه (طرق، گلستان، اخلمد، فریزی، گلمکان و اسجیل)

شاخص‌های اندازه‌گیری شده		نسبت انشعاب	نسبت طول رودخانه	عامل فرم حوضه ff	عامل شکل حوضه sf	طول حوضه (دورترین فاصله تا خروجی حوضه)	مساحت	تراکم زهکشی
بعد فرکتال انشعاب رودخانه‌ای	ضریب همبستگی	۰/۸۸۴*	-۰/۶۰۹	-۰/۸۶۲**	۰/۹۳۹**	-۰/۶۱۰	-۰/۸۰۹	-۰/۱۵۳
بعد فرکتال تراکم زهکشی	ضریب همبستگی	۰/۹۳۷**	-۰/۷۱۸	-/۸۲۰*	۰/۸۶۲ *	-۰/۸۰۹	-/۹۰۴*	-۰/۴۴۲

* محاسبات در سطح معنی‌داری ۹۵٪ انجام شده است.

نسبت انشعاب در حوضه‌های مورد مطالعه، ارتباط مستقیم و مثبت با بعد فرکتال نسبت انشعاب دارد به طوری‌که حوضه‌ی اسجیل، با نسبت انشعاب ۷/۴۹ دارای بعد فرکتال ۳/۲۱ و حوضه‌ی فریزی با نسبت انشعاب ۳/۷۱ دارای بعد فرکتال ۱/۷۴ می‌باشد و این بدین معناست که با افزایش تعداد شاخه‌ها، بعد فرکتال افزایش می‌یابد (شکل ۵ ب). در بین حوضه‌های مورد نظر، حوضه‌ی آبریز طرق دارای بیشترین تراکم زهکشی (۲/۱۲) و حوضه‌ی آبریز اسجیل دارای کمترین تراکم زهکشی (۱/۸۵) می‌باشد. نتایج تحلیل‌های حاصل از مقایسه‌ی بعد فرکتال تراکم زهکشی با تراکم زهکشی یک رابطه‌ی معکوس را نشان می‌دهد، به‌طوری که، حوضه‌ی طرق (که جزو بزرگ‌ترین و قدیمی‌ترین حوضه‌های منطقه بر پایه‌ی نقشه‌های زمین‌شناسی و لیتولوژی می‌باشد) با بیشترین تراکم زهکشی، دارای حداقل بعد فرکتالِ تراکم زهکشی(۱/۸۱) و حوضه اسجیل (با توجه به جوان و کوچک بودن این حوضه) با کمترین تراکم زهکشی، دارای حداکثر بعد فرکتالِ تراکم زهـکشی (۳/۲۴) است (شـکل ۵ ج). ایـن نتایج مـی‌تواند تأییدکـننده‌ی

یافته‌های پژوهش خانبابایی و همکاران (۲۰۱۳) باشد که بعد فرکتال حوضه‌های کشیده با تراکم زهکش کم را بیشتر از ابعاد فرکتالی حوضه‌های گرد با شبکه‌ی زهکشی بالا نشان داد.



شکل (۵) الف) مقایسه‌ی بین بعد فرکتال نسبت انشعاب و مساحت در حوضه‌های مورد مطالعه. ب) مقایسه‌ی بین بعد فرکتال انشعاب رودخانه‌ای و نسبت انشعاب. ج) مقایسه بین بعد فرکتال تراکم زهکشی و تراکم زهکشی. د) رابطه‌ی همبستگی بین مساحت و بعد فرکتال تراکم زهکشی، ح) رابطه‌ی همبستگی بین نسبت انشعاب و بعد فرکتال انشعاب رودخانه‌ای. خ) رابطه‌ی همبستگی بین مساحت و بعد فرکتال نسبت انشعاب.

نتیجه‌گیری

در شکل‌گیری و تکامل شبکه‌های آبراهه‌ای در بستر یک حوضه آبریز که به عنوان یک هویت ژئوسیستمی شناخته می‌شوند، پیدایش الگوهای شاخه درختی نتیجه پاسخ‌های غیرخطی جریانات رسوب و رواناب به ویژگی‌های ذاتی و بیرونی حوضه می‌باشد که این پاسخ‌ها در قالب تراکم و تعداد شاخه‌های فرعی و میزان انشعاب آن‌ها در یک سیستم آبریز بروز می‌کنند. 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، عملکردهای منحصر به‌فردی را در طی بلوغ یک حوضه‌ی آبریز به نمایش می‌گذارند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، ابعاد فرکتال در حوضه‌های مورد مطالعه، متأثر از ویژگی‌های زمین شناسی و فیزیوگرافی می‌باشند که این ارتباط نیز در پژوهش‌های مشابه نیز تأیید و اثبات شده است همچنین ارتباط مستقیمی بین ابعاد فرکتالِ نسبت انشعاب با تعدادشاخه‌های حوضه‌های مورد مطالعه وجود دارد، به‌طوری‌که با افزایش تعداد شاخه‌های حوضه‌های آبریز، بعد فرکتال نسبت انشعاب نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین، نتایج تحلیل‌های حاصل از مقایسه بعد فرکتالِ تراکم زهکشی با تراکم زهکشی، و مقایسه‌ی بین بعد فرکتالِ نسبت انشعاب با مساحت حوضه‌ها، روابط معکوسی را نشان می‌دهد که بر این اساس، حوضه‌های دارای بیشترین تراکم زهکشی و حداکثر مساحت، حداقل بعد فرکتال تراکم زهکشی و حداقل بعد فرکتال نسبت انشعاب را دارا می‌باشند و بالعکس. از دیدگاه ترمودینامیک، این نتایج اثبات‌کننده‌ی بعد فرکتال کوچک‌تر در حوضه‌های پیرتر با تکامل لندفرم‌های جریانی و همچنین ابعاد فرکتالی بزرگ در حوضه‌های جوان با سطوح انرژی بالاتر و بی‌نظمی بیشتر هستند. بنابراین وجود ارتباط معنادار بین پارامترهای بعد فرکتال و خصوصیات هیدرومتری و مورفومتری ژئوسیستم‌های رودخانه‌ای، از ویژگی‌های ابعاد فرکتال است که در حوضه‌ی دانش ژئومورفولوژی، مسائلی از این دست نیازمند تحقیقات بیشتر است.

منابع

ـ رامشت، محمدحسین (۱۳۸۲)، **نظریه کیاس در ژئومورفولوژی**، جغرافیا و توسعه، شماره‌ی ۱، صص ۳۶-۱۳.

ـ زاهدی، مجید و مریم بیاتی‌خطیبی (۱۳۹۲)، **هیدرولوژی**، انتشارات سمت، چاپ سوم.

ـ سپهر، عادل (۱۳۹۳)، **ژئوسیستم‌های نامتعادل: تحلیل قوانین لیاپانوف در شکل‌گیری الگوها**، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره‌ی ۲۵، صص ۶۴-۵۱.

ـ علمی‌زاده، هیوا؛ ماه‌پیکر، امید و مریم سعادتمند (۱۳۹۳)، **بررسی نظریه فرکتال در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای (مطالعه موردی: زرینه‌رود)**، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال سوم، شماره‌ی ۲، صص ۱۴۱-۱۳۰.

ـ کرم، امیر (۱۳۸۹)، **نظریه‌ی آشوب، فرکتال (برخال) و سیستم‌های غیرخطی در ژئومورفولوژی**، فصل‌نامه‌ی جغرافیای طبیعی، شماره‌ی ۸، صص۸۲-۶۷.

-Baas, A.C.W. (2002), **Chaos, Fractals and Self-Organization in Coastal Geomorphology: Simulating Dune Landscapes in Vegetated Environments**, Geomorphology 48, PP. 309-328.

-Guillermo R.A., Gerardo M.E. Perillob,c, M. Cintia Piccoloa,b, Jorge O. Pierinib (2004), **Fractal Analysis of Tidal Channels in the Bahía Blanca Estuary (Argentina)** , Geomorphology 57, PP. 263-274.

-Jin, D., Chen, H., Guo, Q. (1997), **A Preliminary Study on Non-Linear Properties of Channel Longitudinal Profiles**, Acta Geographica Sinica 52 (2), PP. 154–162.

-Khanbabaei, Z., A. Karam and G. Rostamizad, (2013), **Studying Relationships between the Fractal Dimension of the Drainage Basins and Some of Their Geomorphological Characteristics**, International Journal of Geosciences 4,PP. 636-642.

-Kim, J.C. & Jung, K., (2015), **Fractal Tree Analysis of Drainage Patterns**, Water Resources Management 29, PP. 1217-1230.

-Kong, F., Ding, G., (1991), **The Implications of the Fractal Dimension Values of Lineaments**, Earthquake 5, PP. 33–37.

-Lisi B.,H, Honglin., W. Zhanyu and S. Feng, (2012), Fr**actal Properties of Landforms in the Ordos Block and Surrounding Areas**, China, Geomorphology 175–176, 15November 2012, PP. 151-162.

-Mandelbrot, B., (1967), How **Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-similarity and Fractional Dimension**, Science, 156, PP. 636–638.

-Movahed, M., Hermanis, E., (2008), **Fractal Analysis of River Flow Fluctuations**, Physica A 385, PP. 915–932.

-Papanicolaou A.N. (Thanos), A. Tsakiris, Strom, (2012), **The Use of Fractals to Quantify the Morphology of Cluster Microforms**, Geomorphology 139-140, PP. 91-108.

-Pelletier, J.D., (1999), **Self-organization and Scaling Relationships of Evolving River Networks**, Geophys.J. Res. 104, PP. 7259–7375.

-Pelletier, J.D., (2007), **Fractal Behavior in Space and Time in a Simplified Model of Fluvial Landform Evolution**, Geomorphology 91, PP. 291–301.

-Pellionisz, A., (1989), **Neural Geometry: Towards a Fractal Model of Neurons, Models of Vrain Function**, Cambridge University Press Cambridge, PP. 453-464.

-Robert, A., (1988), **Statistical Properties of Sediment Bed Profiles in Alluvial Channels**, Mathematical Geology 20, PP. 205–225.

-Shen , X.H., L.J. Zou, G.F. Zhang, N. Su, W.Y. Wu, S.F. Yang., (2001), **Fractal Characteristics of the Main Channel of Yellow River and Its Relation to Regional Tectonic Evolution**, Geomorphology 127, PP. 64-70.

-Turcotte, D.L., (2007), **Self-organized Complexity in Geomorphology: Observations and Models**, Geomorphology, 91, PP. 302-310.