

ارزیابی و مقایسه کارایی روش‌های کمی فرکتال و فازی در تحلیل وضعیت تکتونیکی زاگرس شمال غرب

ابوالقاسم گورابی^{۱*}، سید محمد زمانزاده^۲، مجتبی یمانی^۳، پریسا پیرانی^۴

۱- استادیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۲- دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۳- استاد ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۴- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

دریافت: ۹۸/۱۱/۲۸..... پذیرش: ۹۹/۷/۹

چکیده

ماهیت پیچیده فرایندهای زمین‌ساختی عامل ایجاد توپوگرافی و همچنین ابعاد مناظر طبیعی زمین را نمی‌توان با ساختارهای کلاسیک، مانند هندسه اقلیدسی یا منطق ارسطویی، ارزیابی نمود. برای این منظور، تحلیل فرکتالی آبراهه‌ها و شکستگی‌ها با استفاده از روش شمارش جعبه‌ای برای تعیین بلوغ ساختاری زاگرس شمال غرب انجام گرفت. همچنین با کمک معیارهای مرتبط با مورفوتکتونیک، پتانسیل فعالیت تکتونیکی منطقه با روش عدم قطعیت فازی مشخص و نتایج این دو روش با کانون‌های سطحی زلزله مقایسه شدند. مناطق دارای بعد فرکتالی بالای گسل و پایین زهکشی فعالیت تکتونیکی بیشتری دارند. طبق این تحقیق، محدوده A یعنی غرب کرمانشاه، دارای بالاترین بعد فرکتالی (۱/۳۲) گسل و بعد فرکتالی کمتر برای شبکه زهکشی (۱/۴۳۲) است و شواهد لرزه‌ای از جمله زلزله اخیر کرمانشاه با ۷/۳ ریشتر نیز پویا بودن آن را تأیید می‌کند. محدوده E که رو به فروافتادگی دزفول است، کمترین بعد فرکتالی گسل (۱/۰۷) و بیشترین بعد فرکتالی شبکه زهکشی (۱/۴۷۰) را دارا است. با این حال گسل‌های مدفون نقش مهمی در تولید زلزله در شمال این محدوده دارند. هم‌پوشانی مربع‌های فرکتالی با گاماهای مختلف در مدل فازی تا حد زیادی تأییدکننده نتایج بود و محدوده A در این مدل نیز بالاترین پتانسیل فعالیت تکتونیکی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تکتونیک، زاگرس شمال غرب، فرکتال، فازی.



۱- مقدمه

مانند بسیاری از پدیده‌ها و فرایندهای طبیعی، فرایندهای زمین‌ساختی که عامل ایجاد توپوگرافی و مناظر طبیعی زمین هستند، بسیار پیچیده‌اند؛ اما در عین پیچیدگی نظم خاصی دارند و به همین سبب پژوهش‌های زیادی صرف مطالعه و درک نظم این فرایندها شده است. ماهیت پیچیده و بعضاً غیرقابل پیش‌بینی پدیده‌های طبیعی را نمی‌توان با ساختارهای کلاسیک بررسی اشیا، مورد ارزیابی قرار داد. در این تحقیق، بر آن هستیم که درمقابل منطق کلاسیک از منطق فازی، و درمقابل هندسه کلاسیک از هندسه فرکتال برای تحلیل مورفوتکتونیک زاگرس شمال غرب استفاده کنیم. بر این اساس، خطوط الگوی زهکشی و بردارهای گسلی محدوده زاگرس شمال غرب را استخراج نموده و با استفاده از روش فرکتالی بهنجاری یا ناهنجاری الگوی گسیختگی پوسته با شبکه‌های آبراهه‌ای که بیانگر پویایی یا آرامش تکتونیکی است، بررسی نموده‌ایم. از طرف دیگر با کمک معیارهای مرتبط با مورفوتکتونیک، پتانسیل فعالیت تکتونیکی منطقه با روش عدم قطعیت فازی را مشخص نموده ایم. مقایسه نتایج این دو روش با کانون‌های زلزله نیز در جهت بررسی نتایج بسیار مفید خواهد بود. بدیهی است نتایج این‌گونه تحقیقات و مشخص نمودن مناطق فعال در برنامه‌ریزی آمایش منطقه‌ای مفید هستند. در مطالعات مشابه، شولر و همکاران^۱ (۲۰۰۱) به تعیین ابعاد فرکتالی چندین آبخیز با شبکه زهکشی متراکمی و مقایسه آن‌ها با پراکندگی شبکه زهکشی در سایر مطالعات به مقایسه اختلاف ابعاد فرکتالی آبخیزهای مختلف و آزمون تغییرپذیری آن‌ها، در نهایت تعیین خودتشابهی^۲ یا خودتمایلی^۳ آبخیزهای مختلف مورد بررسی پرداختند. باس^۴ (۲۰۰۲م)، برای بررسی تپه‌های ماسه‌ای از مدل‌های شبیه‌سازی چشم‌انداز تپه‌های ماسه‌ای از طریق الگوریتم‌های ترکیب پوشش گیاهی و با روش فرکتال استفاده کرده و کنش میان پوشش گیاهی و فرایندهای انتقال ماسه را مدل‌سازی نموده است. آنجلس و همکاران^۵ (۲۰۰۴م) با استفاده از دو روش شمارش جعبه‌ای و مجاورت، بُعد فرکتالی را برای ۹ کانال جزرومدی برآورد کرده تا میزان کنترل ژئومورفولوژیکی خصوصیات شبکه کانال‌های جزرومدی در مصب باهیا بلانکا در آرژانتین را به دست آورد. بی و همکاران^۶ (۲۰۱۲م)، خصوصیات فرکتالی لندفرم‌ها را در اوردوس بلاک و مناطق اطراف را با استفاده از روش وایوگرام و مدل فرکتال سلولی بررسی

1. Schuller

2. Self-similarity

3. Self-affinity

4. Baas

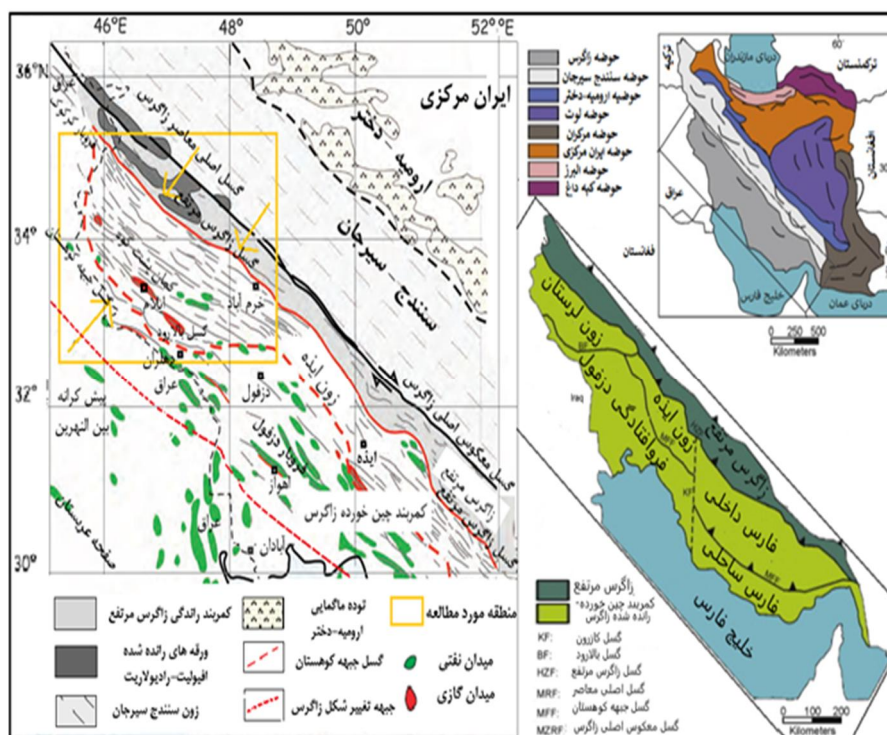
5. Angeles et al

6. Bi et al

کرده و حوضه‌های مختلف را از نظر بُعد فرکتالی مورد مقایسه قرار دادند. عدل و مهرنود (۱۳۸۳)، بُعد فرکتالی حوضه‌های آبخیز و رابطه آن با برخی از پارامترهای ژئومورفولوژیک و هیدرولوژیک حوضه را بررسی کردند. قدم‌پور و طالب بیدختی (۱۳۹۰)، با استفاده از روش شمارش جعبه‌ای بُعد فرکتالی رودخانه‌های پیچان‌رودی را محاسبه کردند. رضایی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۱)، تغییرات الگوی هندسی رودخانه قزل‌اوزن را با استفاده از تحلیل فرکتال مورد بررسی قرار دادند. علمی‌زاده و همکاران (۱۳۹۳)، نظریه فرکتال را در مورد ژئومورفولوژی رودخانه زرينه‌رود به کار بردند. کرم و صابری (۱۳۹۴)، بُعد فرکتالی را در حوضه‌های زهکشی بررسی و رابطه آن را با برخی خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوضه برای حوضه‌های آبریز شمال تهران تحلیل کردند. خلیفه سلطانی و همکاران (۱۳۹۵)، در تحلیلی با بررسی ابعاد فرکتالی گسل‌ها و آبراهه‌ها در جنوب غرب لنجان، روش مربع‌شمار را مورد استفاده قرار دادند و مناطق پویا را از نظر برخاستگی زمین‌ساختی مورد مقایسه قرار دادند. مهرنیا (۱۳۹۶) با ارزیابی زلزله ملارد (دی ماه) ۱۳۹۶ مکان رویدادهای لرزه‌ای را در ارتباط با لرزه‌خیزی غرب تهران از نظر هندسه فرکتالی ارزیابی نمود، نتایج نشان داد این زلزله بُعد مکانی معناداری روی گسل شمال تهران نداشته اما احتمال توزیع آن به سمت غرب وجود دارد. صدر و همکاران (۱۳۹۷)، ابعاد فرکتالی شکستگی‌ها و آبراهه‌های جنوب غرب قزوین را به روش فرکتال مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که بُعد فرکتالی بالاتر مؤید مناطقی با فعالیت نسبی بیشتر بوده و مشاهدات میدانی نیز در تأیید آن است.

منطقه مورد مطالعه در غرب ایران و در پهنه ساختاری زاگرس قرار دارد. زون زاگرس شامل واحدهای زاگرس چین‌خورده (خارجی) و مرتفع (داخلی) است. زاگرس چین‌خورده دربرگیرنده رسوبات هم‌شیبی است که حاشیه قاره‌ای مشرق پلاتفرم عربستان بوده، چین‌خورده و در برخی نواحی به زیر زاگرس مرتفع کشیده شده‌اند. این نوار چین‌خورده، به سمت شمال شرق به یک منطقه رورانده منتهی می‌شود و در نتیجه زونی به شدت خردشده و گسلیده به صورت نواری باریک و کم‌عرض پدید آمده است (درویش‌زاده، ۱۳۷۰: ۱۹۸-۲۰۲). به عقیده مطیعی (۱۳۷۴) زاگرس چین‌خورده در همه‌جا ویژگی‌های زمین‌شناختی یکسان ندارد و دارای زیرپهنه‌های فروافتادگی کرکوک، آرک لرستان، پهنه ایذه، فروافتادگی دزفول، پهنه فارس، پس‌کرانه بندرعباس، و دشت آبادان است. زاگرس لرستان بخشی از زاگرس چین‌خورده است، مرز شمال شرقی آن محدود به مرز جنوبی زون راندگی‌ها، مرز شرقی آن منطبق بر خمش بالارود، مرز غرب - شمال غربی آن منطبق بر جنوبی‌ترین تاقدیس زاگرس است که تقریباً بر نوار مرزی ایران - عراق منطبق است. روند شمال غربی - جنوب شرقی، ساختار متشکل از تناوب تاقدیس‌های

بزرگ و کوچک، فروریختگی‌های گرانشی، فروریزی، زمین‌لغزه‌های بزرگ، برخورداری از سه خطواره شمالی - جنوبی مرتبط با گسل‌های پی‌سنگ و نیز تاقدیس‌هایی متشکل از گروه بنگستان در جنوب و سازند امیران و گـرو در شمال از ویژگی‌های حاکم بر منطقه زاگرس لرستان هستند (آقابات، ۱۳۸۳: ۲۵) (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی برگرفته از (صحرانیان و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۰۵؛ ورگس و همکاران، ۲۰۱۱: ۷۴)

۲- مباحث نظری و چهارچوب مفهومی

هندسه اقلیدسی یا هندسه کلاسیک، اشیای فیزیکی قابل توصیف با استفاده از خطوط، دایره، بیضی و ... را با بُعد صحیح دربرمی‌گیرد. با این حال، الگوهایی در طبیعت یافت می‌شود که به طور قابل توجهی بسیار پیچیده هستند (شولر و همکاران، ۲۰۰۱: ۲). پدیده‌های ناهموار با

1 Sahraeyan et al
2 Verges et al

اشکال نامنظم و بی‌قاعده، از اصول هندسه اقلیدسی پیروی نمی‌کنند. هندسه‌ای که برای این پدیده‌ها و ابعاد ناصحیح آن‌ها به کار می‌رود، هندسه فرکتال^۱ نامیده می‌شود (تورکوت،^۲ ۱۹۹۷: ۱۲۱). در اندازه‌گیری خط ساحلی، محققان دریافتند با واحد اندازه‌گیری کوچکتر و دقیقتر، طول ظاهری ساحل طولانی‌تر به دست می‌آید در صورتی که برای یک شیء محصور غیرفرکتالی مانند یک دایره، طول کلی پیرامونی آن به یک عدد ثابت نزدیک خواهد شد (شولر و همکاران، ۲۰۰۱: ۲). واژه فرکتال اولین بار توسط مندلبروت^۳ ریاضیدان فرانسوی لهستانی‌الاصل در سال ۱۹۷۵ ابداع شد، وی این کلمه را از واژه لاتین فراکتوس^۴ گرفت تا بر ماهیت قطعه‌قطعه شونده که یکی از مشخصه‌های اصلی این فرم است، تأکید داشته باشد (کرم، ۱۳۸۹: ۷۳). هندسه فرکتالی به توصیف اشیایی می‌پردازد که خود متشابه یا متقارن هستند و صرف نظر از اینکه با چه دقتی یک شی فرکتالی را بررسی کنیم، درجه نوسان آن بدون تغییر باقی خواهد ماند (باس، ۲۰۰۲: ۳۱۱). بنابراین در فرکتال‌ها این بُعد فرکتال است که مهم است و نه مقیاس، زیرا در هر اندازه‌ای بُعد فرکتال حفظ می‌شود و بیانگر خاصیت اصلی فرکتال است. همین امر منجر به افزایش کاربرد فرکتال در علوم جدید شده است (فیلیپس^۵، ۲۰۰۲، ۱۴۴). استفاده از مدل‌های فرکتال در تعیین کمیت و توصیف مناظر ژئومورفولوژیکی به سرعت در ۱۵-۲۰ سال اخیر افزایش یافته است. مطالعات متعدد مشخص کردند که تحلیل‌های مورفومتریک کلاسیک، مناظر طبیعی پیچیده را به صورت ضعیفی توصیف می‌کنند، زیرا این تحلیل‌ها رابطه کمتری با شکل واقعی دارند (آنجلس و همکاران، ۲۰۰۴: ۲۶۴). بنابراین با تعیین بُعد فرکتال ساختارهای خطی مثل گسل‌ها، آبراهه‌ها و مسیر پر پیچ‌وخم رودخانه‌ها می‌توان بسیاری از خصوصیات آن‌ها (میزان جابه‌جایی، میزان تغییرات و ...) را تخمین زد و و تراکم این ساختارهای خطی را تعیین و با یکدیگر مقایسه نمود (تورکوت، ۱۹۹۷: ۱۲۱). استفاده از روش فرکتالی در بررسی بهنجاری یا نابهنجاری الگوی گسیختگی پوسته با شبکه‌های آبراهه‌ای از نظر بُعد فرکتالی مهم است؛ زیرا تغییرات آن‌ها به نوعی بیانگر پویایی یا آرامش تکتونیکی است (تورکوت، ۱۹۹۷؛ جکسون و لیدر^۶، ۱۹۹۴؛ هوویس^۷، ۱۹۹۶؛ هان و همکاران^۸، ۱۹۹۸).

از سوی دیگر، با ورود اندیشه‌های فضایی در ژئومورفولوژی، مفاهیم جدیدی مطرح شد و در

1. Fractals
2. Turcotte
3. Mandelbrot
4. Fractus
5. Phillips
6. Jackson & leeder
7. Hovius
8. Han et al



به‌کارگیری منطق‌فازی^۱ به‌جای منطق علمی در تحلیل‌ها و مبانی نظری و روش‌شناسی، تغییری بنیادی به‌وجود آمد (رامشت، ۱۳۸۹: ۱۱۳). منطق ارسطو اساس ریاضیات کلاسیک و منطق رایانه را تشکیل می‌دهد و نتایج آن، دو ارزشی است، صفر یا یک؛ اما هنگامی که درباره پدیده‌های دنیای واقعی صحبت می‌کنیم، منطق جدیدی نیاز است که دنیا را به‌جای دو ارزشی بودن، به‌صورت طیفی از واقعیت‌ها در بازه بسته صفر و یک ببیند (سعیدی و افشاریجو، ۱۳۸۹: ۶۱). منطق فازی^۲ قادر است بسیاری از مفاهیم و متغیرها و سیستم‌هایی را که نادقیق و مبهم هستند صورت‌بندی ریاضی بخشیده و زمینه را برای استدلال، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم آورد (پوراحمد و همکاران، ۱۳۸۶: ۳۴). این نظریه که نخستین بار توسط لطفی‌زاده دانشمند ایرانی‌الاصل دانشگاه کالیفرنیا در سال ۱۹۶۵ م مطرح شد، حوزه‌های بسیاری از علوم مختلف را فراگرفته است (امینی فسخودی، ۱۳۸۴: ۴۱). به عقیده لطفی‌زاده منطق فازی راه ساده‌ای را برای رسیدن به یک نتیجه قطعی و معین برپایه اطلاعات ورودی ناقص، خطادار، مبهم و دوپهلو فراهم می‌کند (نصراللهی و همکاران، ۱۳۹۰: ۷۷). در منطق کلاسیک، درجه عضویت برای همه اجزا در گروه یک قرار دارد و تمام اجزا ارزش مشابهی برای سیستم دارد؛ اما در منطق فازی، قطعیت موجود در منطق بولین وجود ندارد؛ زیرا به‌جای دو ارزشی بودن، ما طیفی از ارزش‌ها را در بازه بسته صفر و یک خواهیم داشت. با این طیف، می‌توان عدم قطعیت را به‌خوبی نمایش داد (سعیدی و افشاریجو، ۱۳۸۹: ۶۱). بنابراین، بسیاری از پدیده‌های پیچیده طبیعی را می‌توان با این روش بررسی نمود.

۳- روش تحقیق

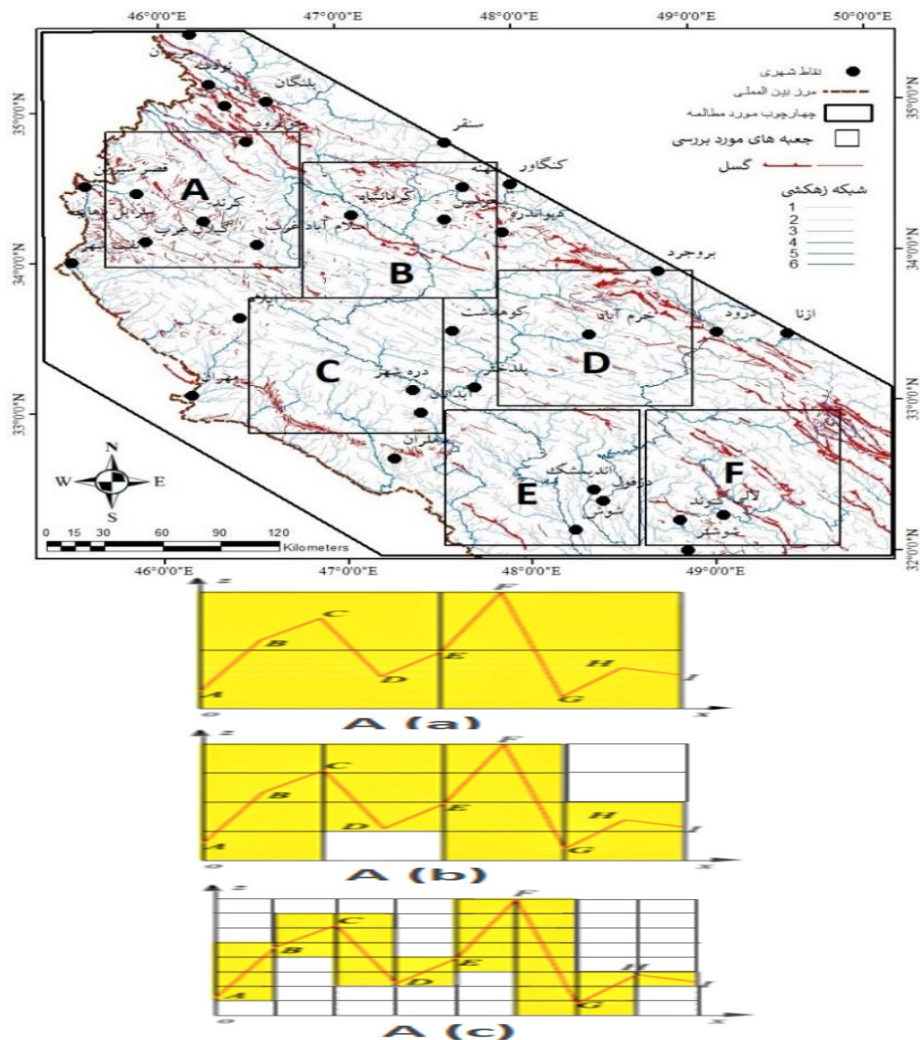
این پژوهش، به‌لحاظ هدف از نوع کاربردی و به‌لحاظ روش از نوع تحلیلی به‌شمار می‌رود. پس از انتخاب عوامل مؤثر، اطلاعات خطی و پهنه‌ای (گسل، محوره‌های ساختمانی، زمین‌لغزش)، از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰، اطلاعات ارتفاعی از DEM ۳۰ متر و داده‌های زمین‌لرزه از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران أخذ شد. برای ساخت شبکه زهکشی نیز از الحاقیه ARC Hydro در محیط Arc GIS استفاده گردید. ابتدا براساس اهمیت هر پارامتر، لایه‌های مختلفی از آن تولید و به‌عنوان داده‌های اصلی در مدل فازی به‌کارگرفته شدند. در بخش دیگر تحقیق، منطقه را به جعبه‌هایی هم‌اندازه به‌گونه‌ای که منطقه (به صورت طولی و عرضی) و همچنین گسل‌های اصلی زاگرس و گسل‌های جبهه کوهستان را تحت پوشش قرار دهند تقسیم نموده و

1. Fuzzy Logic
2. Fuzzy Logic

بعد فرکتالی شبکه زهکشی و گسل‌ها برای جعبه‌های مختلف محاسبه و با نتایج مدل فازی و درنهایت هر دو این روش‌ها با داده‌های زلزله منطقه مورد مقایسه قرار گرفت.

در روش فرکتالی، بعد فرکتالی پیچیدگی یک شیء فرکتالی را تعیین می‌کند، یک شیء با بعد فرکتالی پایین نسبت به شیء با بعد فرکتالی بالا کمتر پیچیده است (شولر و همکاران، ۲۰۰۱: ۲). مندل بروت (۱۹۸۲م)، معادلاتی برای محاسبه بعد فرکتال با استفاده از دو کمیت $N-S^1$ ارائه نمود. هاسدورف (۱۹۹۱م)، ابعاد فرکتالی که برای تمامی فرکتال‌ها مفید هستند را تعریف نمود. اگرچه بعد به اصطلاح هاسدورف می‌تواند برای هر فرکتالی تعریف شود، محاسبه دقیق آن مشکل است. برای جلوگیری از پیچیدگی‌های محاسباتی روش هاسدورف ۲ مدل ارائه شده است: مدل اول روش قطعه‌قطعه کردن خط برای محاسبه بعد فرکتالی است که به ریچاردسون (۱۹۶۱م) نسبت داده می‌شود. مدل دوم، روش شمارش جعبه‌ای^۲ نام دارد (شولر و همکاران، ۲۰۰۱: ۳) که حاصل هم‌پوشانی یک سری از شبکه‌های تشکیل‌یافته از مربع‌هایی با طول ضلع S روی عوارض خطی و شمارش تعداد خانه‌های N با اندازه S است (Number-Size) که یک مقطع خطی تعریف‌کننده عارضه را دربرمی‌گیرد. زمانی که اندازه جعبه‌ها کاهش می‌یابد، S نیز کاهش می‌یابد (رودریگز ایتورب و رینالدو^۳، ۱۹۹۷: ۲۳۷). علاوه بر این، زمانی که S کاهش می‌یابد، معادله بالا تخمین بهتری از بعد فرکتالی فراهم می‌کند. بسیار حائز اهمیت است که کوچکترین اندازه جعبه به‌صورتی انتخاب شود که کوچکترین عنصر خطی قابل مشاهده از عارضه را دربرگیرد. رابطه بین تعداد جعبه حاوی عارضه و طول ضلع جعبه از طریق تطبیق‌دادن رگرسیون خطی و محاسبه شیب خط مستقیم که همان بعد فرکتالی D است، محاسبه می‌شود (استروگاتز^۴، ۱۹۹۴: ۴۰۶). با توجه به مطالب ذکر شده، در این تحقیق طول ضلع تا حد ممکن (۱۲ مرحله) کاهش یافته است. شکل ۲ جعبه‌های پوشاننده منطقه و نیز نحوه شبکه‌بندی و جدول ۱ شبکه‌های پوشاننده منطقه را نشان می‌دهد.

1. Number-Size
2. Box counting
3. Rodríguez-Iturbe and Rinaldo
4. Strogatz



شکل ۲: توزیع جعبه‌های پوشاننده منطقه مطالعاتی و نحوه پوشش عارضه با جعبه‌ها (برای مثال جعبه A در اندازه‌های مختلف تا سه مرتبه تغییر یافته از (آی و همکاران، ۱۴۰۲: ۶۱۳).

پهنه‌های انتخاب شده دربرگیرنده مناطق شاخص گسلی و نیز لرزه‌ای به‌منظور ارائه یک الگوی طولی و عرضی از تغییرات ساختاری و مقایسه بهتر مدل‌ها می‌باشد.

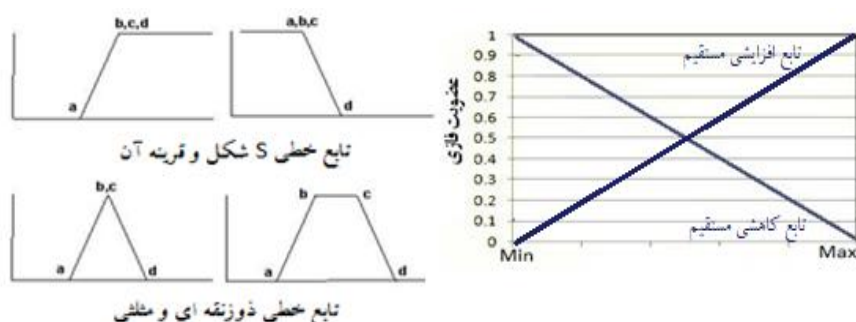
جدول ۱. ابعاد شبکه‌های پوشش داده شده روی منطقه

ردیف	رابطه نمایی	تعداد سطر و ستون	تعداد خانه‌ها	ابعاد ایزومتریک شبکه KM	مساحت هر خانه KM^2
۱		1×1	۱	۱۰۰	۱۰۰۰۰
۲	2^2	2×2	۴	۵۰	۲۵۰۰
۳	2^4	4×4	۱۶	۲۵	۶۲۵
۴	2^8	8×8	۶۴	۱۲/۵	۱۵۶/۲۵
۵	2^{16}	16×16	۲۵۶	۶/۲۵	۳۹/۰۶۲۵
۶	2^{32}	32×32	۶۹۵	۳/۱۲۵	۹/۷۶۵۶۲۵
۷	2^{64}	64×64	۱۶۰۸	۱/۵۶۲۵	۲/۴۴۱۴۰۶۲۵
۸	2^{128}	128×128	۳۳۷۶	۰/۷۸۱۲۵	۰/۶۱۰۳۵۱۵۶۳
۹	2^{256}	256×256	۶۸۶۷	۰/۳۹۰۶۲۵	۰/۱۵۲۵۸۷۸۹۱
۱۰	2^{512}	512×512	۱۳۸۲۷	۰/۱۹۵۳۱۲۵	۰/۰۳۸۱۴۶۹۷۳
۱۱	2^{1024}	1024×1024	۲۷۷۶۸	۰/۰۹۷۶۵۶۲۵	۰/۰۰۹۵۳۶۷۴۳
۱۲	2^{2048}	2048×2048	۵۵۵۸۵	۰/۰۴۸۸۲۸۱۲۵	۰/۰۰۲۳۸۴۱۸۶

در منطق کلاسیک، عضویت یک عنصر در یک مجموعه به صورت صفر (عدم عضویت) و یک (عضویت) بیان می‌شود؛ اما در منطق فازی، میزان عضویت یک عنصر در یک مجموعه، با مقداری در بازه یک (عضویت کامل) تا صفر (عدم عضویت کامل) تعریف می‌شود (لین و همکاران، ۱۹۹۶). یکی از روش‌های رایج برای استدلال فازی استفاده از روش ممدانی است. در این روش، از شرط منطقی اگر «A»، آنگاه «B» استفاده می‌شود (کلیر و یان^۱، ۱۹۹۵: ۱۸۵). وزن قواعد در این سیستم استنتاجی اهمیت بسزایی دارد (محبوبی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۵۱). درجه عضویت‌پذیری، اجتماع و اشتراک، متمم، ضرب، جمع و گامای توان‌های اساسی این مدل تلفیقی محسوب می‌شوند (پوراحمد و همکاران، ۱۳۸۶: ۳۴). درجه عضویت معمولاً با یک تابع عضویت بیان می‌شود که شکل تابع می‌تواند به صورت خطی، غیر خطی، پیوسته و یا ناپیوسته

1. Klir & Yuan

باشد (بونهام - کارتر^۱، ۱۹۹۴: ۲۹۱) توابع عضویتی که معمولاً بیشتر استفاده می‌شوند، عبارت‌اند از: S شکل، J شکل و خطی که در محیط GIS وجود دارند (شکل ۳: چپ) و علاوه بر این توابع، کاربر می‌تواند با توجه به نیاز خود، توابعی را تعریف نماید (متکان و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۲۶) (شکل ۳: راست). کاربرد منطق فازی در یک مسئله شامل سه مرحله: تبدیل مقادیر عددی به مجموعه‌ای از مقادیر فازی، اثرکردن مجموعه‌ای از قواعد استنتاجی (قانون‌های اگر - آنگاه) و بازگرداندن مقادیر فازی و تبدیل آن‌ها به مقادیر عددی است. در مدل فازی لایه‌هایی که با استفاده از پارامترهای اصلی تولید شدند به عنوان داده‌های اصلی با استفاده از تعریف نوع تابع (شکل ۳)، به صورت تابع خطی و با ابزار Raster calculator و Fuzzy membership در GIS به صورت مقادیر صفر تا یک فازی‌سازی (تعریف توابع عضویت برای پارامترها) شدند. سپس لایه‌های تولید شده، با استفاده از فرمول‌های ضرب، جمع و گامای فازی در ابزار Fuzzy overlay با یکدیگر همپوشانی می‌شوند.



شکل ۳: نمونه‌هایی از توابع عضویتی خطی (متکان و همکاران، ۱۳۷۸: ۱۲۶) و توابع کاهنده و افزایشنده مستقیم (ترسیم: نگارندگان)

در این روابط (دیاگرام پژوهش، شکل ۳)، $\mu_{combination}$ لایه حاصل از حداقل‌سازی در ضرب، و حداکثرسازی در جمع، μ_i تابع عضویت فازی برای نقشه i ام است و $i=1,2,\dots$ نقشه‌هایی هستند که تلفیق شده‌اند. در عملگر ضرب، مقادیر عضویت فازی در نقشه خروجی به سمت صفر میل می‌کند و در عملگر جمع مقادیر عضویت فازی در نقشه به سمت یک میل می‌کنند. جهت تعدیل حساسیت بالا و پایین این دو و به منظور دستیابی به نتیجه مناسب‌تر،

1. Bonham-Carter

عملگر گامای فازای استفاده شده است که انتخاب صحیح γ بین صفرویک (رابطه گاما در شکل ۴)، مقادیری را در خروجی به وجود می‌آورد که نشان‌دهنده سازگاری قابل انعطاف میان گرایش‌های کاهشی ضرب فازای و گرایش‌های افزایشی جمع فازای می‌باشد (بونهام - کارتر، ۱۹۹۴). در این تحقیق، میزان همبستگی بین بُعد فرکتالی جعبه‌ها و میانگین ارزش فازای هر جعبه، ملاک انتخاب نقشه گامای فازای بوده است.



شکل ۴. دیاگرام فرایند پژوهش (ترسیم: نگارندگان)



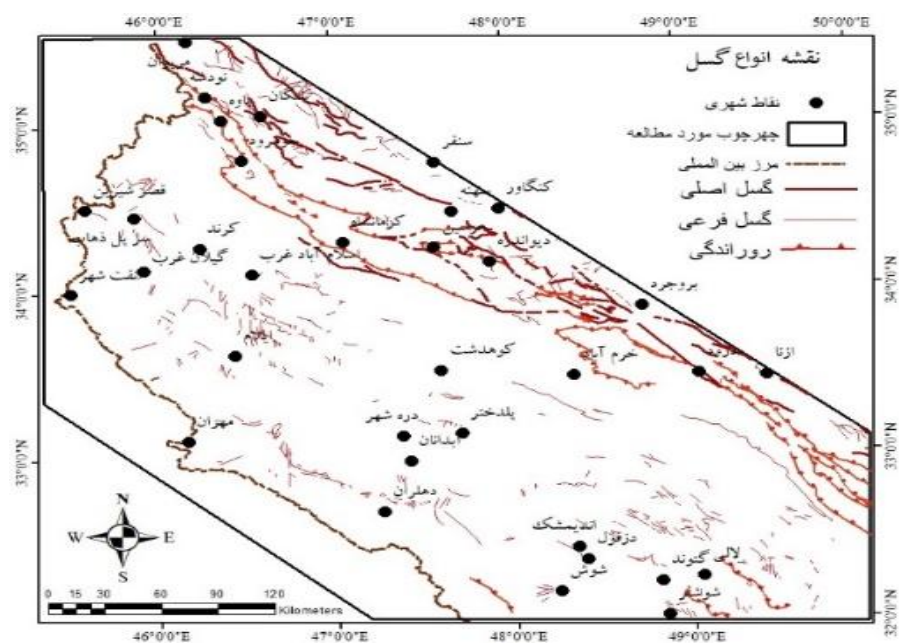
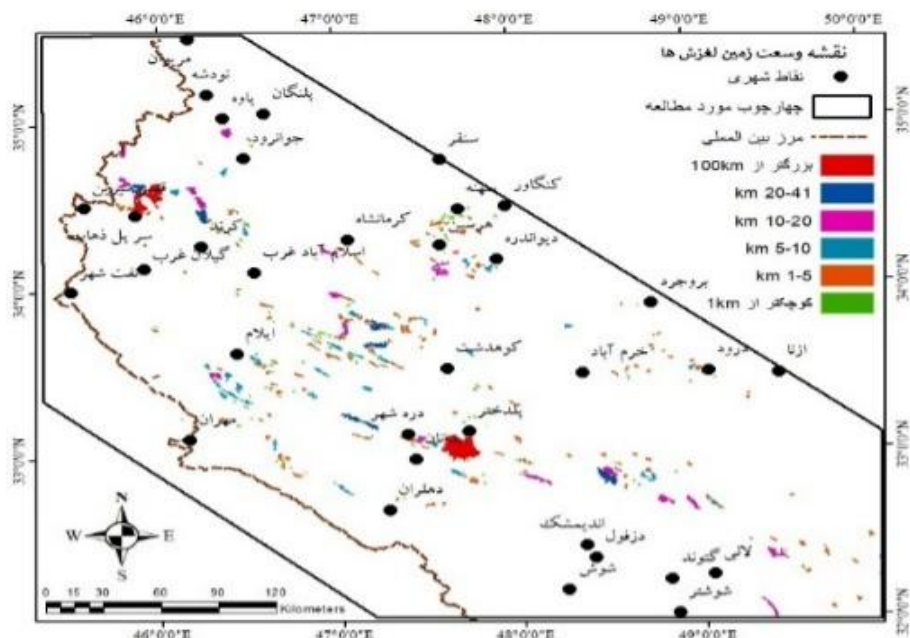
۴- تجزیه و تحلیل و یافته‌های تحقیق

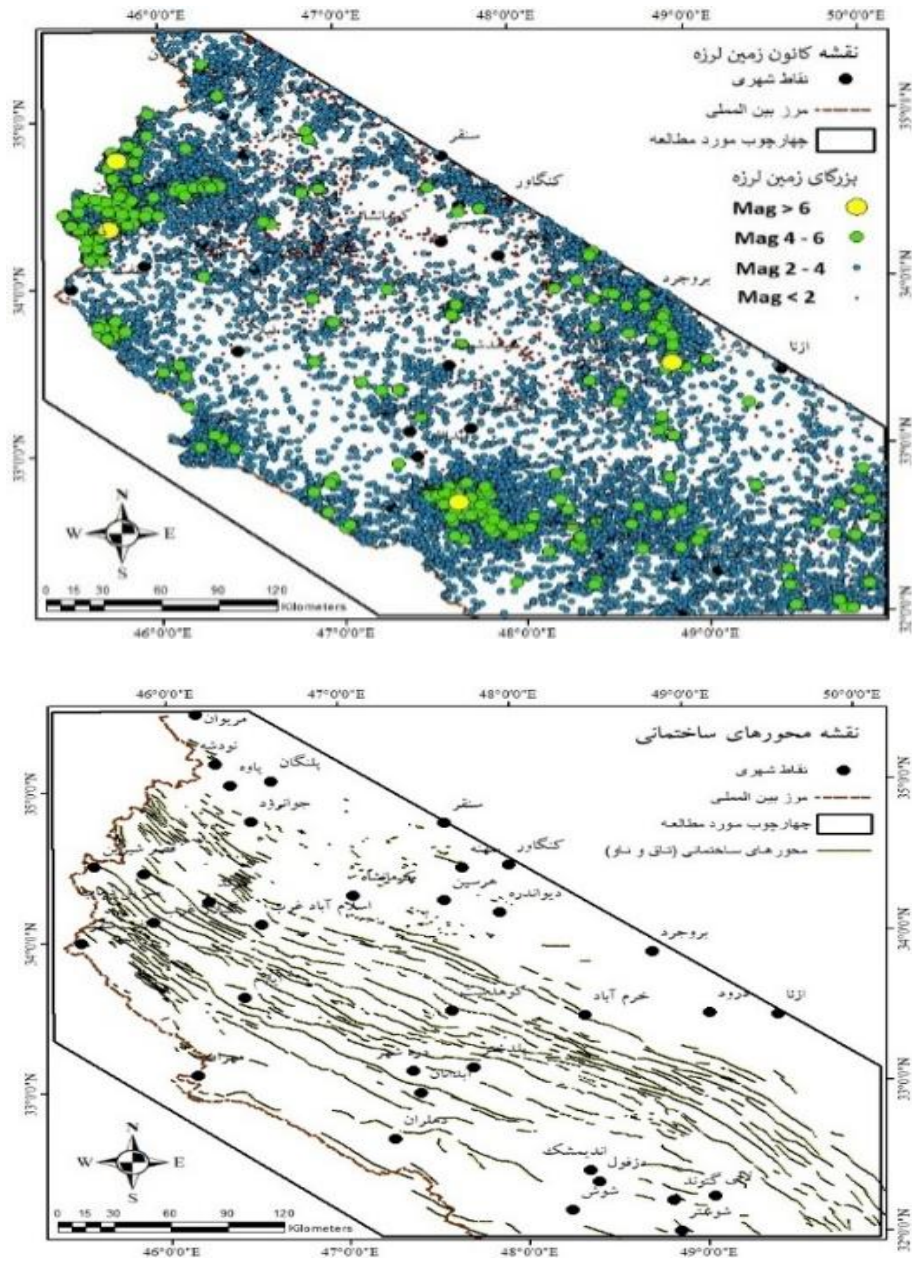
در بررسی تکتونیک منطقه، در قالب مدل پژوهش از عوامل دخیل در ارزیابی استفاده شد (شکل ۵). فشردگی ناشی از همگرایی شمال شرقی - جنوب غربی در غرب ایران، به صورت چین خوردگی‌های زاگرس نمود یافته است (آگارد و همکاران^۱، ۲۰۰۵: ۴۰۱). بنابراین، موقع محور طاق‌دیس‌ها و ناودیس‌ها به‌عنوان یک لایه منعکس‌کننده حداکثر اعمال نیرو در تحقیق به‌کار گرفته شده‌اند. همچنین ادامه این فشارها و فعال بودن زون گسلی زاگرس و گسل‌های آشکار و نهان منطقه (بربریان^۲، ۱۹۹۵: ۱۹۴)، سبب شده همه ساله شاهد زمین‌لرزه‌های کوچک و بزرگ و بعضاً مخرب در منطقه مطالعاتی باشیم که لزوم به‌کارگیری لایه گسل‌ها و کانون زمین‌لرزه را بیان می‌کند. از طرفی بین وقوع زمین‌لغزش و زمین‌لرزه، ارتباط وجود دارد؛ به‌عنوان نمونه درمورد زمین‌لغزه سیمره، یکی از بزرگ‌ترین لغزش‌های دنیا در دامنه شمالی رشته‌کوه کبیرکوه از زاگرس با وجود بحث‌ها پیرامون اینکه علت وقوع آن زمین‌لرزه بوده یا وقوع آن منجر به رخ دادن زمین‌لرزه شد، با توجه به وجود لرزش در زمان وقوع، بسیاری رویداد زمین‌لغزش و زمین‌لرزه را مرتبط دانسته‌اند (شایان، ۱۳۸۳: ۴۵). برخی از زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه‌ها ثبت شده‌اند از جمله زمین‌لرزه ۷/۳ ریشتری آبان ماه ۱۳۹۶ کرمانشاه که منجر به وقوع زمین‌لغزش در منطقه مله کبود در نزدیکی کانون زمین‌لرزه گردید (گورابی، ۲۰۱۹). با این حال، زمین‌لغزش‌هایی که وسعت کم‌تری دارند ممکن است ناشی از اقلیم باشند؛ بنابراین با طبقه‌بندی آن‌ها براساس وسعت، وزن زمین‌لغزش‌های کوچک‌تر کاهش داده شد. شبکه زهکشی نتیجه مستقیم فرایندهای فرسایشی است؛ اما در مناطق جوان فرایندهای تکتونیکی نقش مهمی دارند (تورکوت، ۱۹۹۷: ۱۹۴)؛ زیرا نرخ بالای بال‌آمدگی زمان کافی برای فرسایش کامل چشم‌انداز را به شبکه زهکشی نمی‌دهد (لیفتون و چیس^۳، ۱۹۹۲: ۱۱۰). بنابراین، این عامل به‌همراه شیب که متأثر از چین‌خوردگی و گسل‌ها است با وزنی کمتر از سایر عوامل، در تحقیق استفاده شد.

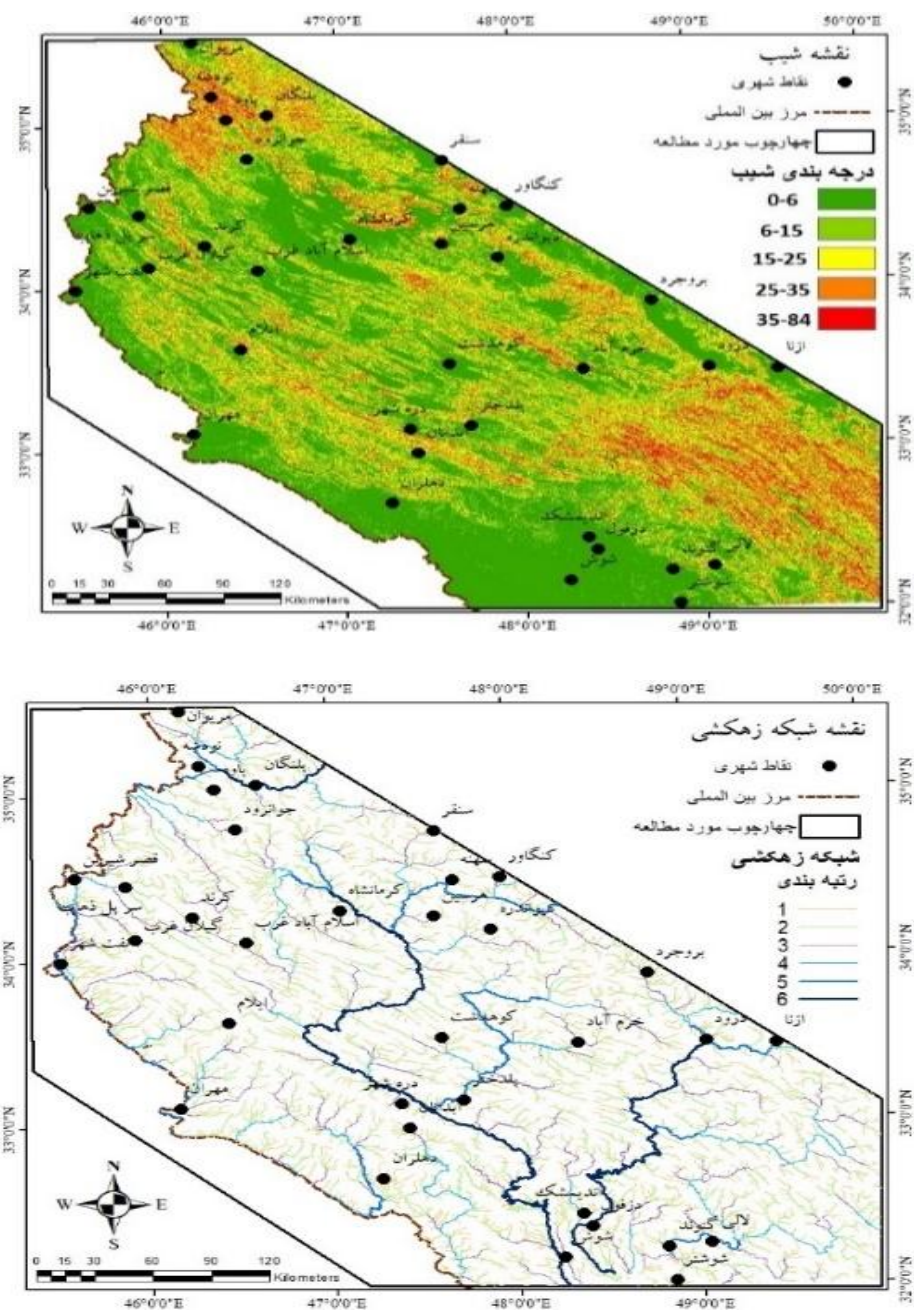
1. Agard et al

2. Berberian

3. Lifton & Chase



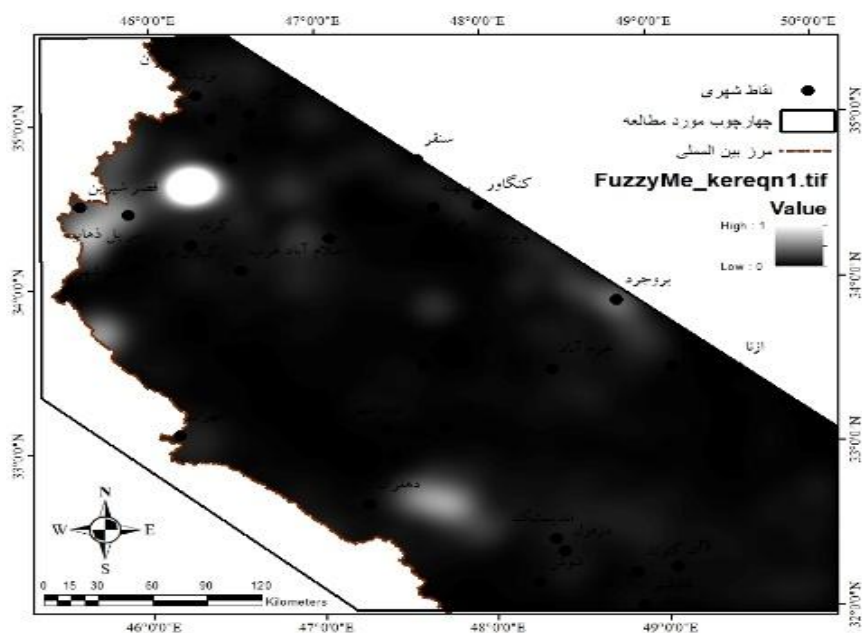




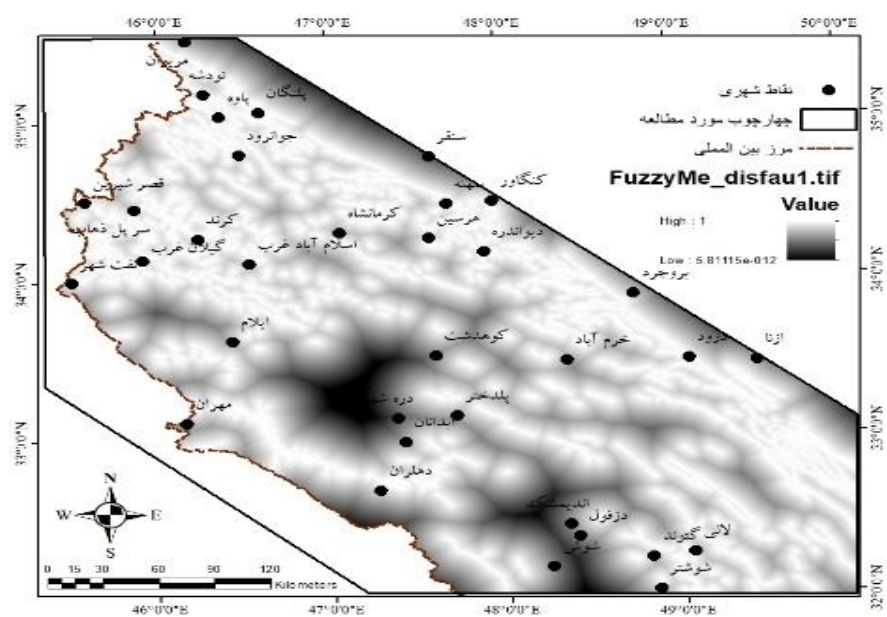
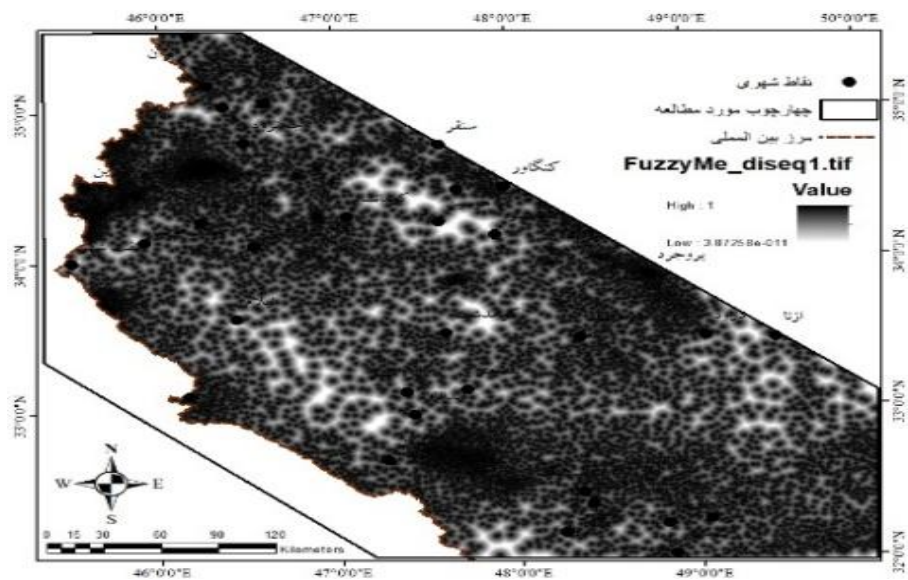
شکل ۵: لایه‌های اطلاعاتی اولیه استفاده شده در فرایند تحقیق



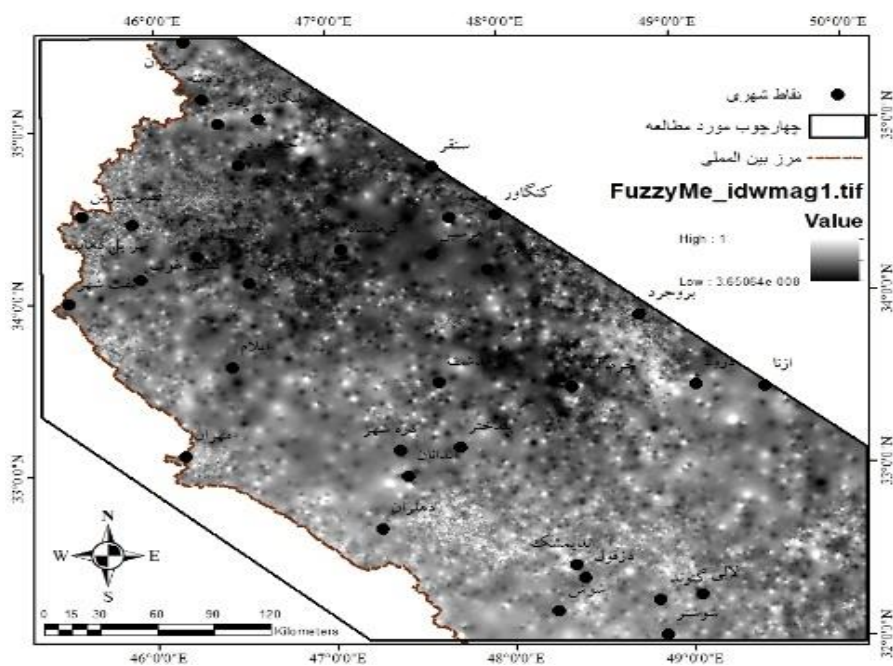
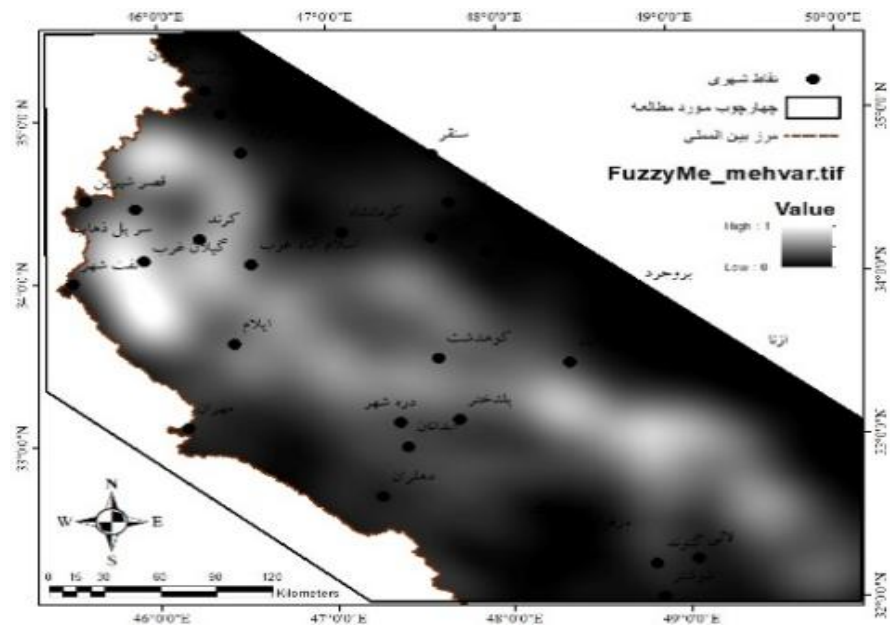
لایه‌های شکل ۵ به‌عنوان داده‌های اولیه استفاده و براساس آن‌ها طبق دیگرام پژوهش، لایه‌های اصلی پژوهش ساخته شد. افزایش وزن تأثیر یک لایه بر این اساس بوده که در ارزیابی تکتونیک، آن لایه از جهات مختلف در مدل وارد شده است، به این صورت که هم لایه فاصله‌ای آن ساخته شده است و هم تراکم و هم براساس ارزش‌های مختلف (فرضاً بزرگا و عمق درمورد کانون زلزله)، مورد درون‌یابی قرار گرفته است. لایه‌های حاصل شده با استفاده از توابع شکل ۳، فازی‌سازی شدند. به این صورت که به فواصل نزدیک به گسل‌ها، کانون‌های زلزله، زمین‌لغزش‌ها و محورهای ساختمانی، بیشترین ارزش داده شد؛ همچنین به تراکم‌های بالای گسل‌ها از نظر نوع گسل (اصلی و فرعی، عادی و راندگی)، محورهای ساختمانی از نظر نزدیکی محورها به یکدیگر، زمین‌لغزش‌ها از نظر وسعت زیاد، کانون‌های زلزله از نظر نزدیکی به یکدیگر و نیز تراکم زهکشی با تأکید بر آبراهه رتبه ۱، بیشترین ارزش اختصاص یافت، درون‌یابی عمق و بزرگای کانون‌های زلزله به‌گونه‌ای بوده که با کاهش عمق و افزایش بزرگا، ارزش بالاتری دریافت کردند و در آخر لایه شیب به‌صورت افزایشی، فازی‌سازی شدند که لایه‌های حاصله در شکل ۶، قابل مشاهده هستند. قسمت‌های تیره به‌سوی صفر و قسمت‌های روشن به‌سوی یک میل می‌کنند. درنهایت با همپوشانی آن‌ها، توان‌های مختلف گاما محاسبه شد.

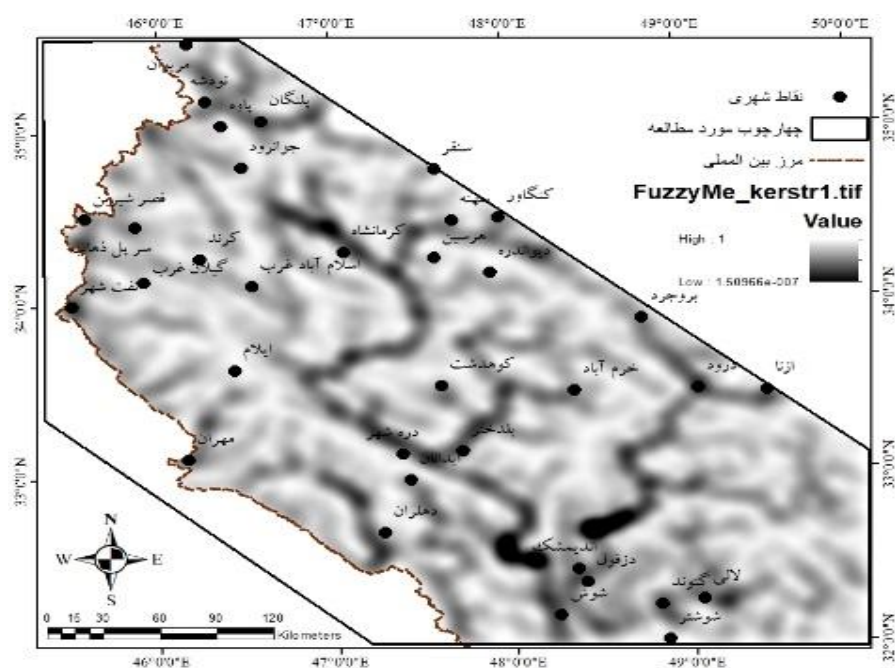
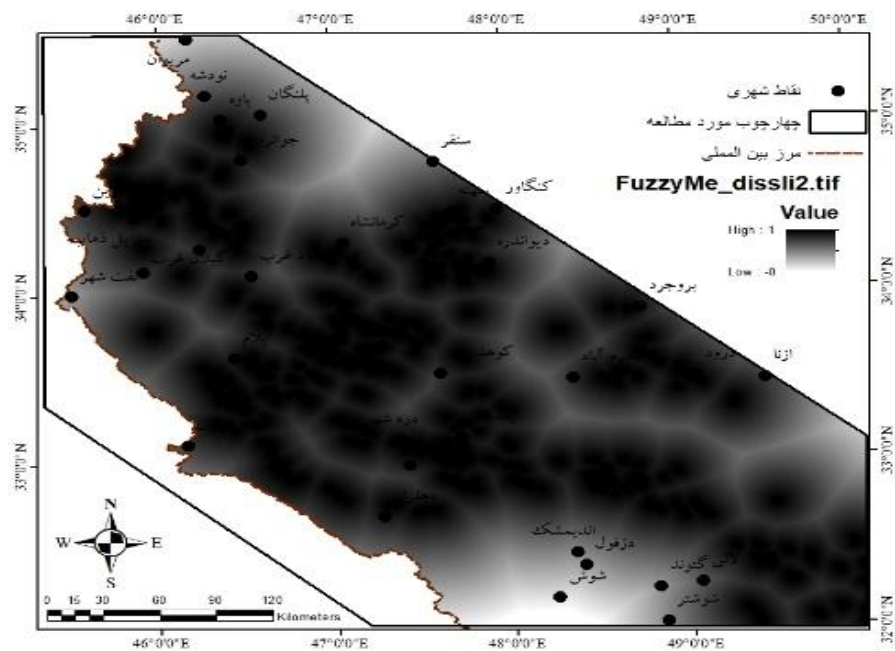


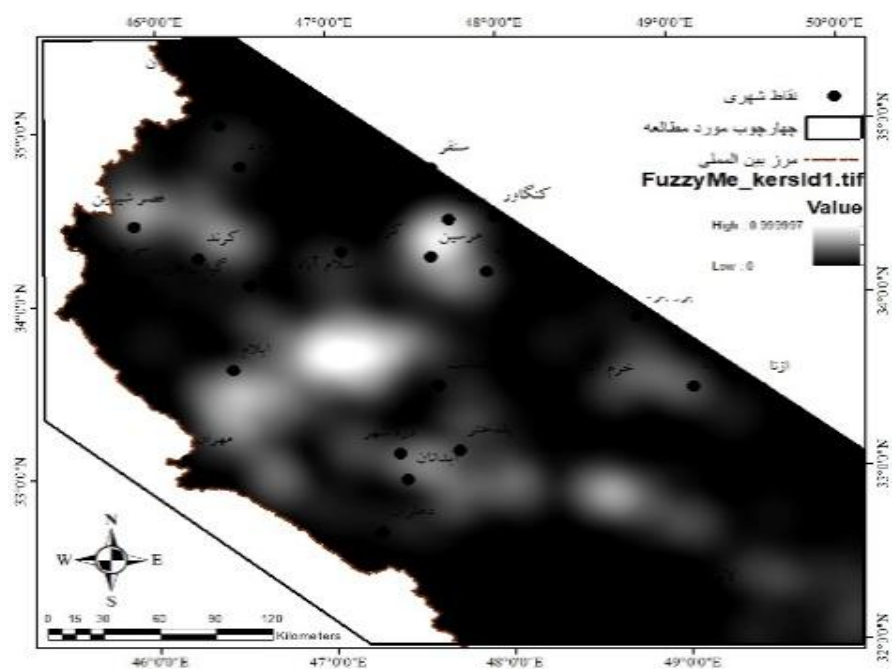
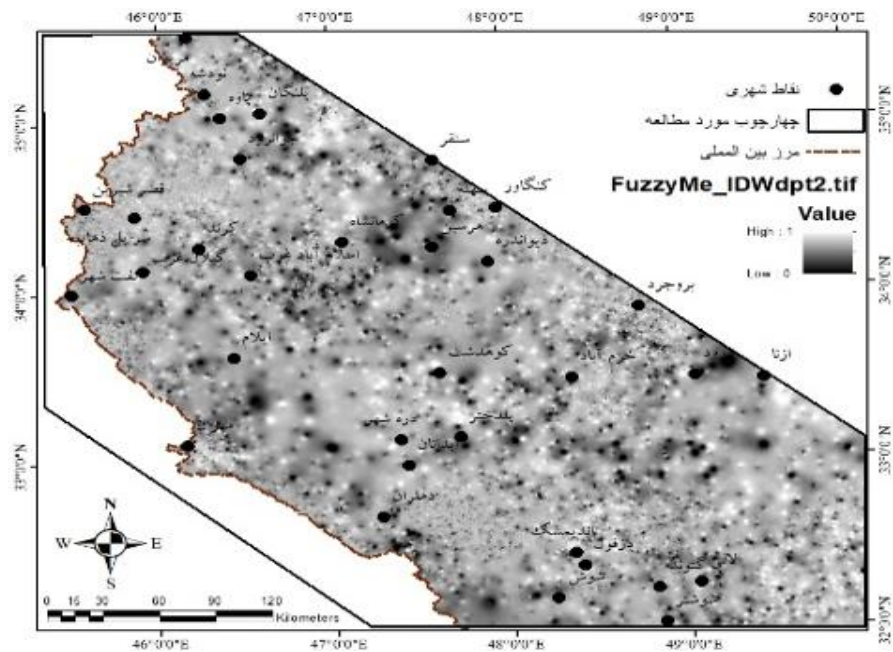
ارزیابی و مقایسه کارایی روش‌های کمی فرکتال..... ابوالفضل گورابی و همکاران

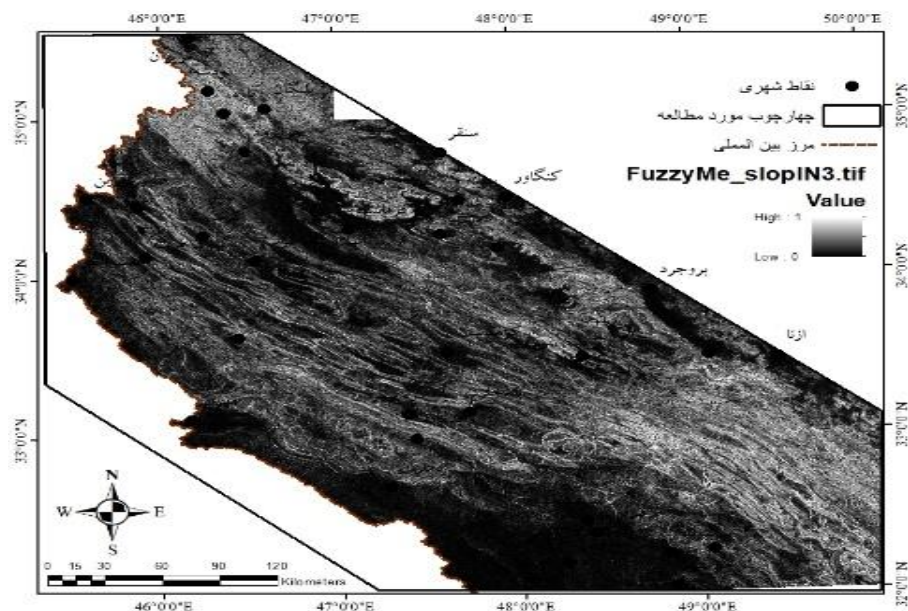


ارزیابی و مقایسه کارایی روش‌های کمی فرکتال... ابوالفضل گورابی و همکاران









شکل ۶. لایه‌های اطلاعاتی تحقیق (طبق ترتیب دیاگرام پژوهش در شکل ۴) تغییر یافته براساس توابع فازی (فازی‌سازی شده)

در قسمت دوم تحقیق، جدول ۲ نتایج حاصل از همپوشانی شبکه‌هایی با طول ضلع‌های مختلف روی عوارض خطی گسل و رودخانه و نیز نتایج حاصل از شمارش خانه‌های حاوی این عوارض در هریک از سطوح شبکه برای جعبه‌های مختلف را نشان می‌دهد.

در مرحله بُعد، طبق روش شمارش جعبه‌ای (دیاگرام پژوهش: شکل ۴)، طول شبکه به صورت معکوس ($1/S$) تبدیل شد و مقادیر لگاریتمی تعداد شبکه‌های حاوی عارضه (Number) و معکوس طول شبکه (Size) برای محاسبه بُعد فرکتالی عوارض خطی مورد نظر به‌دست آمد.

جدول ۳ این مقادیر را به‌همراه بُعد فرکتالی جزئی (Partial FD) برای گسل‌ها و جدول ۴ این مقادیر را برای شبکه‌های زهکشی جعبه‌های مختلف منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

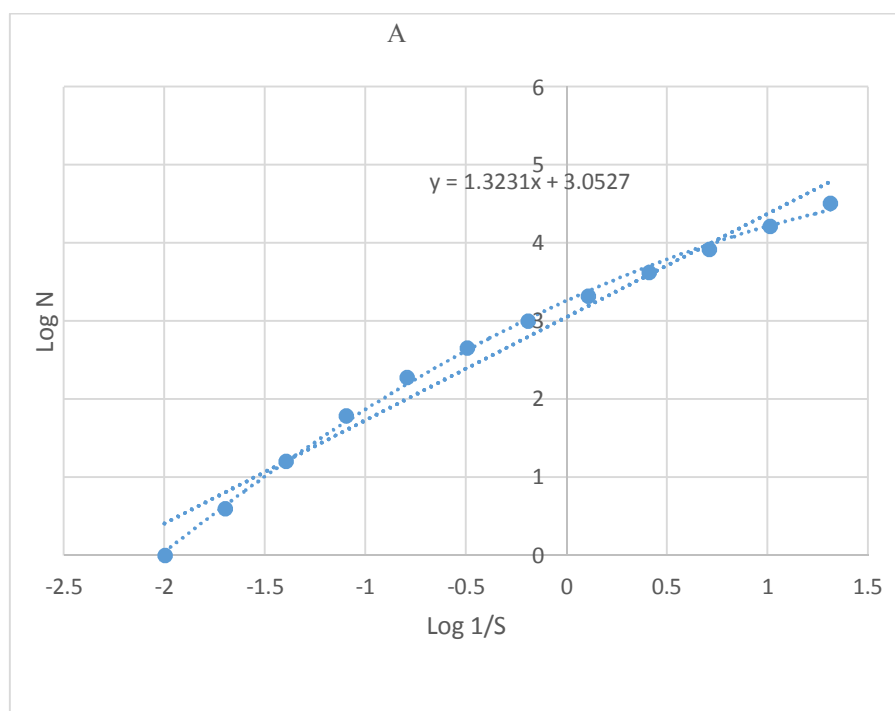
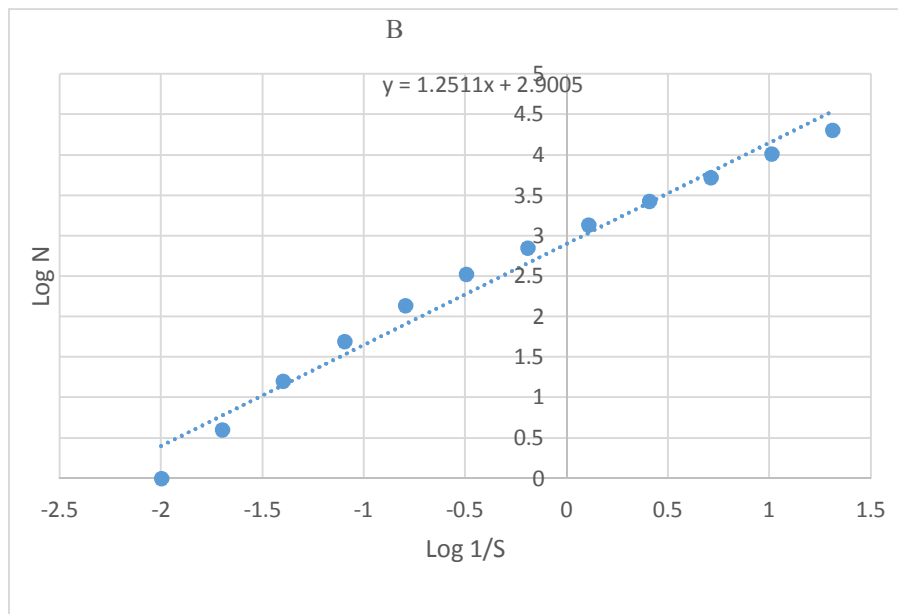
جدول ۲. طول شبکه و خانه‌های حاوی گسل و شبکه زهکشی در روش شمارش جعبه‌ای

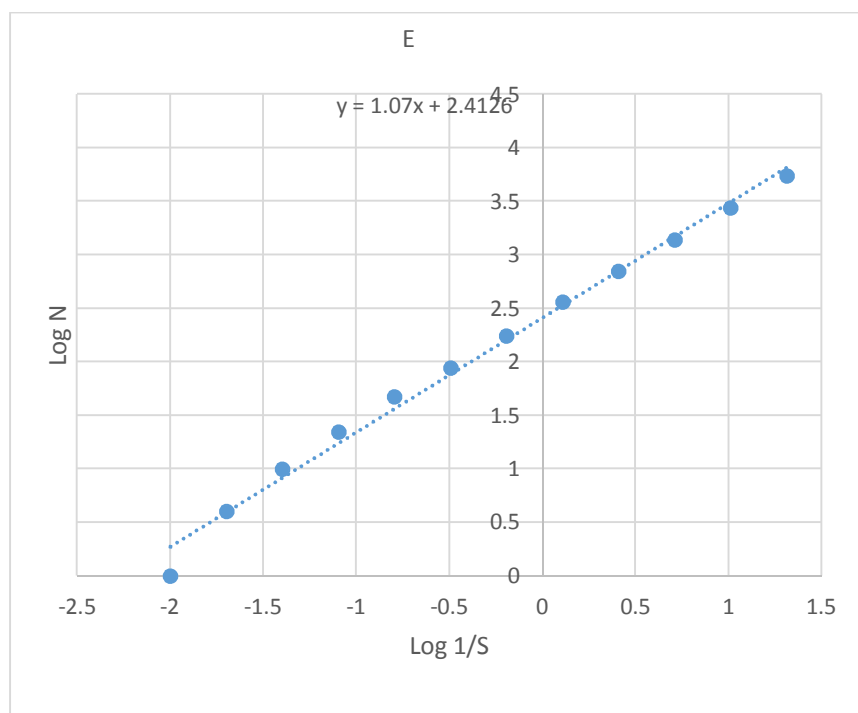
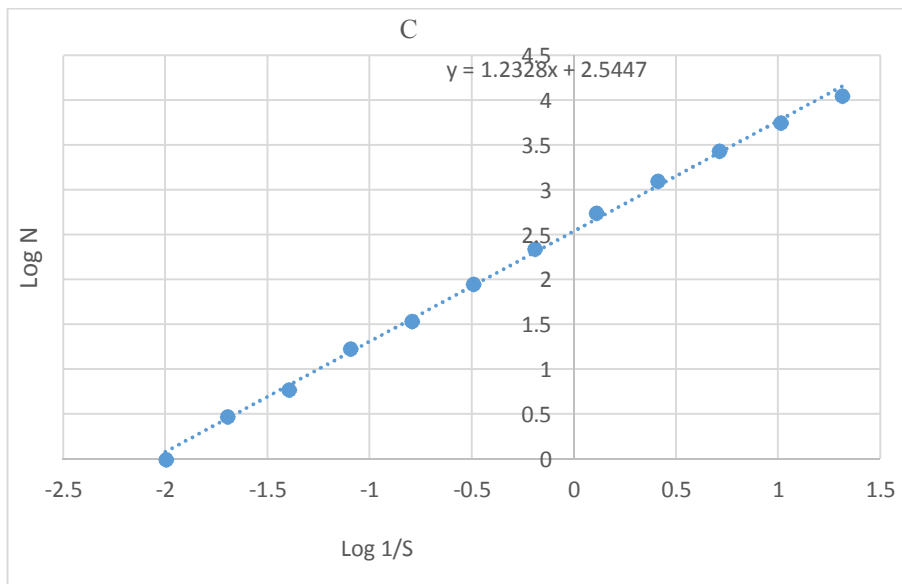
F		E		D		C		B		A		چهارچوب شبکه
خانه‌های حاوی رود	خانه‌های حاوی گسل	خانه‌های حاوی رود	خانه‌های حاوی گسل	خانه‌های حاوی رود	خانه‌های حاوی گسل	خانه‌های حاوی رود	خانه‌های حاوی گسل	خانه‌های حاوی رود	خانه‌های حاوی گسل	خانه‌های حاوی رود	خانه‌های حاوی گسل	طول شبکه KM (Size)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۰۰
۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۳	۴	۴	۴	۴	۵۰
۱۶	۱۶	۱۶	۱۰	۱۶	۱۶	۱۶	۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۲۵
۶۴	۵۰	۶۴	۲۲	۶۴	۴۰	۶۴	۱۷	۶۴	۵۰	۶۴	۶۲	۱۲/۵۰
۲۵۲	۱۲۱	۲۵۲	۴۷	۲۵۲	۹۸	۲۵۳	۳۵	۲۵۲	۱۳۸	۲۵۳	۱۹۲	۶/۲۵
۷۸۴	۲۸۶	۸۲۶	۸۸	۷۵۸	۲۴۱	۷۷۵	۹۰	۷۵۶	۳۳۸	۷۳۹	۴۶۱	۳/۱۳
۱۷۹۵	۶۴۶	۲۰۲۶	۱۷۶	۱۷۳۷	۵۸۴	۱۷۶۹	۲۲۴	۱۷۴۱	۷۰۹	۱۷۲۹	۱۰۱۸	۱/۵۶
۳۹۴۱	۱۳۸۲	۴۵۱۷	۳۶۲	۳۷۸۹	۱۲۷۲	۳۸۲۲	۵۶۴	۳۷۴۸	۱۳۶۷	۳۷۵۳	۲۱۲۵	۰/۷۸
۸۲۶۵	۲۷۹۶	۹۶۰۸	۷۰۲	۷۹۲۰	۲۷۸۸	۷۹۰۹	۱۲۸۴	۷۷۸۹	۲۶۸۹	۷۸۰۴	۴۲۳۶	۰/۳۹
۱۶۹۲۵	۵۶۲۱	۱۹۷۳۹	۱۳۸۶	۱۶۱۶۳	۵۶۴۳	۱۶۱۱۵	۲۷۴۳	۱۵۸۷۴	۵۲۸۰	۱۵۸۶۲	۸۳۳۴	۰/۲۰
۳۴۱۴۰	۱۱۱۸۰	۳۹۸۴۳	۲۷۴۹	۳۲۴۹۹	۱۱۲۷۱	۳۲۴۵۰	۵۶۶۸	۳۱۹۷۸	۱۰۳۶۲	۳۱۹۷۱	۱۶۵۴۹	۰/۱۰
۶۸۳۹۰	۲۲۳۲۵	۷۹۹۳۹	۵۴۶۸	۶۵۲۱۱	۲۲۵۴۶	۶۵۱۰۶	۱۱۳۹۰	۶۴۲۲۷	۲۰۴۳۵	۶۴۱۰۰	۳۲۹۳۷	۰/۰۵

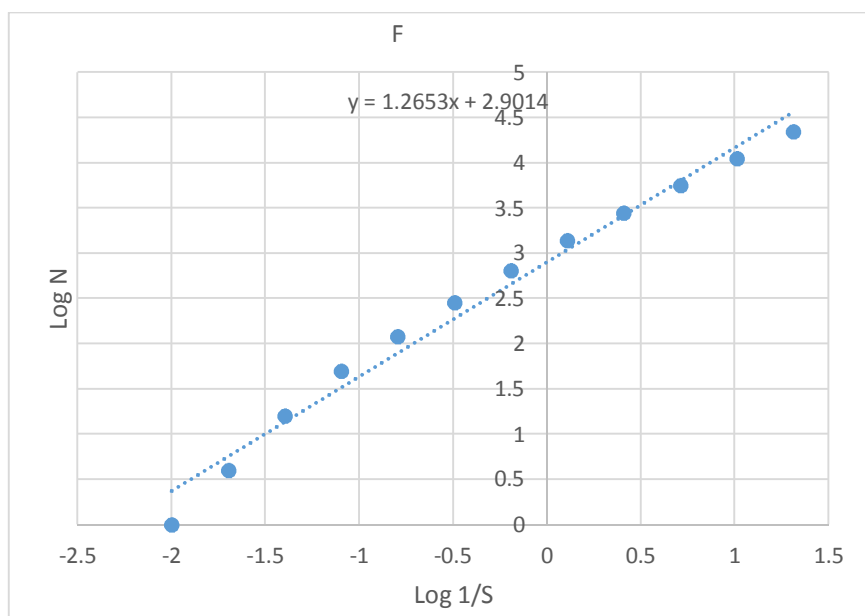
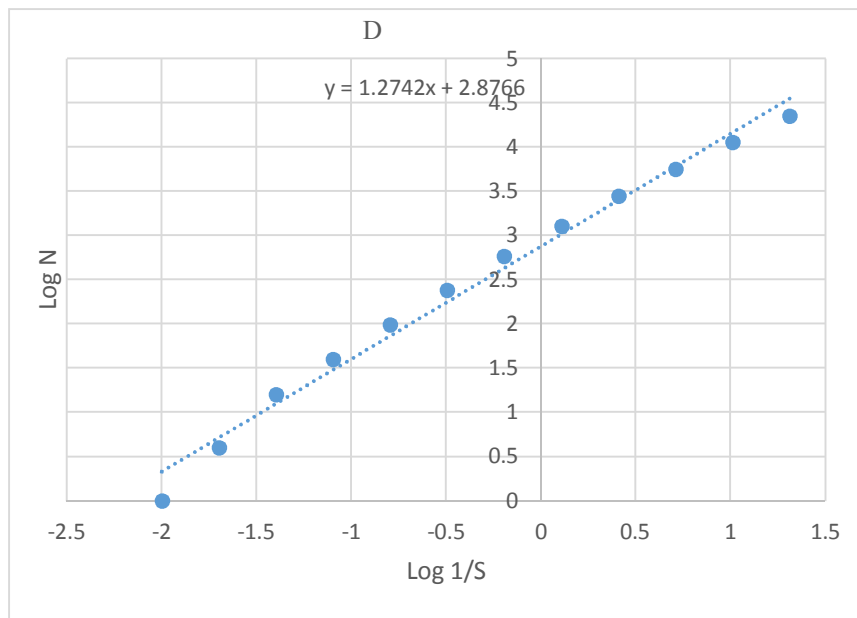


جدول ۳. لگاریتم معکوس طول شبکه (Size) و خانه‌های حاوی گسل (Number) و بُعد فرکتالی جزئی گسل‌ها (Partial FD)

F		E		D		C		B		A		چهارچوب شبکه
Partial FD	Log (N fault)	Partial FD	Log (N fault)	Partial FD	Log (N fault)	Partial FD	Log (N fault)	Partial FD	Log (N fault)	Partial FD	Log (N fault)	Log (1/size)
۲	۰	۲	۰	۲	۰	۱/۵۸	۰	۲	۰	۲	۰	-۲
۲	۰/۶۰	۱/۳۲	۰/۶۰	۲	۰/۶۰	۱	۰/۴۸	۲	۰/۶۰	۲	۰/۶۰	-۱/۷۰
۱/۶۴	۱/۲۰	۱/۱۴	۱	۱/۳۲	۱/۲۰	۱/۵۰	۰/۷۸	۱/۶۴	۱/۲۰	۱/۹۵	۱/۲۰	-۱/۴۰
۱/۲۸	۱/۷۰	۱/۱۰	۱/۳۴	۱/۲۹	۱/۶۰	۱/۰۴	۱/۲۳	۱/۴۶	۱/۷۰	۱/۶۳	۱/۷۹	-۱/۱۰
۱/۲۴	۲/۰۸	۰/۹۰	۱/۶۷	۱/۳۰	۱/۹۹	۱/۳۶	۱/۵۴	۱/۲۹	۲/۱۴	۱/۲۶	۲/۲۸	-۰/۸۰
۱/۱۸	۲/۴۶	۱	۱/۹۴	۱/۲۸	۲/۳۸	۱/۳۲	۱/۹۵	۱/۰۷	۲/۵۳	۱/۱۴	۲/۶۶	-۰/۴۹
۱/۱۰	۲/۸۱	۱/۰۴	۲/۲۵	۱/۱۲	۲/۷۷	۱/۳۳	۲/۳۵	۰/۹۵	۲/۸۵	۱/۰۶	۳/۰۱	-۰/۱۹
۱/۰۲	۳/۱۴	۰/۹۶	۲/۵۶	۱/۱۳	۳/۱۰	۱/۱۹	۲/۷۵	۰/۹۸	۳/۱۴	۱	۳/۳۳	۰/۱۱
۱/۰۱	۳/۴۵	۰/۹۸	۲/۸۵	۱/۰۲	۳/۴۵	۱/۱۰	۳/۱۱	۰/۹۷	۳/۴۳	۰/۹۸	۳/۶۳	۰/۴۱
۰/۹۹	۳/۷۵	۰/۹۹	۳/۱۴	۱	۳/۷۵	۱/۰۵	۳/۴۴	۰/۹۷	۳/۷۲	۰/۹۹	۳/۹۲	۰/۷۱
۱	۴/۰۵	۰/۹۹	۳/۴۴	۱	۴/۰۵	۱/۰۱	۳/۷۵	۰/۹۸	۴/۰۱	۰/۹۹	۴/۲۲	۱/۰۱
۳/۳۲	۴/۳۵	۲/۸۵	۳/۷۴	۳/۳۲	۴/۳۵	۳/۰۹	۴/۰۶	۳/۲۹	۴/۳۱	۳/۴۵	۴/۵۲	۱/۳۱







شکل ۷. بُعد فرکتالی گسل‌های جعبه‌های مختلف

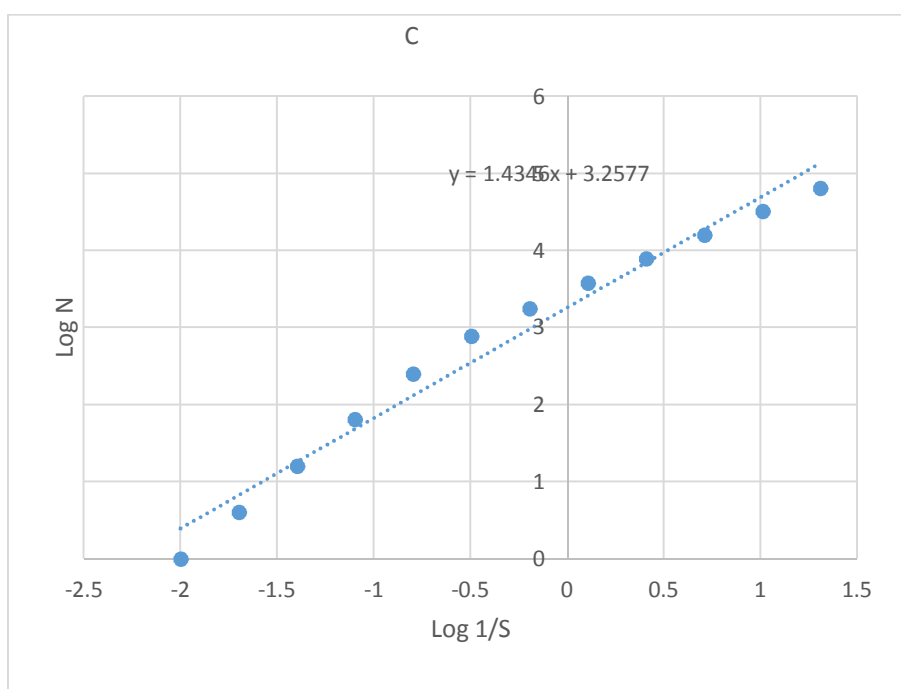
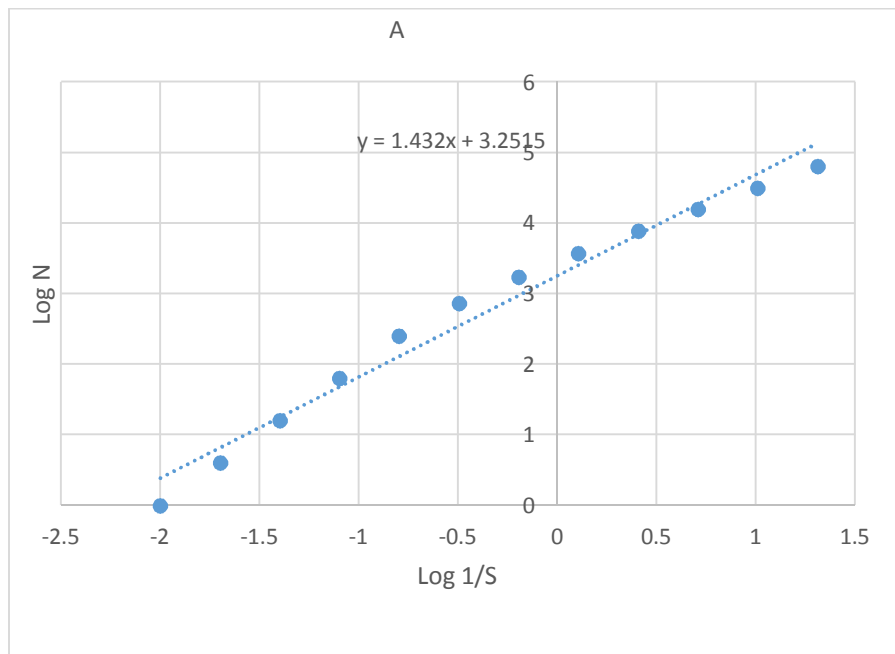


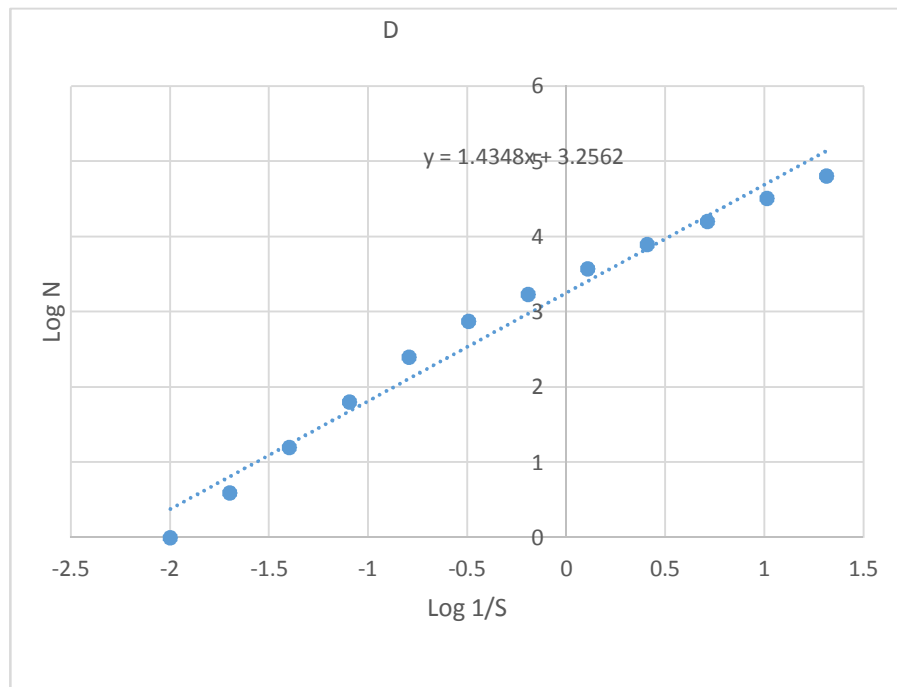
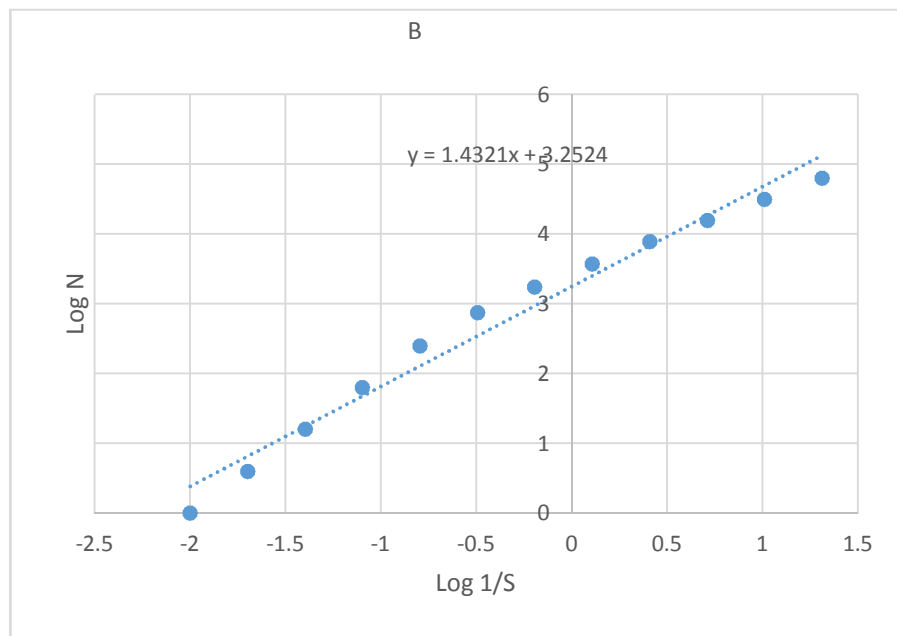
روش نامبر سائز گسل‌ها و تغییرات جزئی بُعد فرکتالی را نشان می‌دهد. هرچه این تغییرات به هم شبیه باشند مؤید وجود مؤلفه‌های متناظر و خود تشابه در روند تحولات زمین‌ساختی هستند. براساس تغییرات جزئی، بُعد سه جامعه قابل تشخیص است که برای هر جعبه از بالا به پایین با سه رنگ مختلف، مشخص شده‌اند. براساس شیب عمومی، خط رگرسیون که با استفاده از اکسل، محاسبه شده و کمیت کلی آن برای محدوده A، برابر با $1/32$ که بیشترین مقدار بین محدوده‌ها است و برای محدوده E، $1/07$ که کمترین مقدار و برای محدوده‌های B، C، D و F به ترتیب $1/25$ ، $1/23$ ، $1/27$ ، $1/26$ است، کلیه نقاطی که بُعد آن‌ها بزرگ‌تر از این مقادیر است خارج از نظم متناظر هستند؛ یعنی «جامعه زمینه‌ای» این تغییرات که در جعبه‌های C و E نسبتاً مغشوش به نظر میرسد (البته خیلی جزئی آشفته است) دارای بُعد جزئی متغیر بوده و همه آن‌ها بزرگ‌تر از مقادیر مذکور هستند. جامعه دوم «جامعه آستانه» با بُعد فرکتالی، حدود $0/9$ تا $1/1$ ظاهر می‌شود و چندین بار تکرار شده و مؤید پیدایش یک جامعه متناظر با کمینه تغییرات بُعد فرکتالی بوده و نشانگر کاهش آشفستگی و افزایش خواص فرکتال است. این جامعه موجب توسعه نسبتاً منظم و قانون‌مند گسل‌ها شده و می‌توان روند ظهور یا ازبین‌رفتن یک سامانه را پیش‌بینی کرد. به زبان ساده‌تر بهترین جامعه‌ای که به روش نامبر سائز به دست آمده و رفتار آن قابل‌پیش‌بینی است، همان جامعه‌ای است که بُعد فرکتال جزئی آن حدود $0/9$ است. جامعه سوم «جامعه نابهنجاری» که دارای افزایش ناگهانی بُعد عدد بزرگتر از یک است (بزرگ‌تر از ۳) که نشانه توسعه جامعه فرکتال در یک روند غیرخطی است. این مقدار آنومالی در A از همه بیشتر، D و F مقادیر آن برابر و در B و C در حال کاهش و در نهایت کمترین میزان آن مربوط به E است.

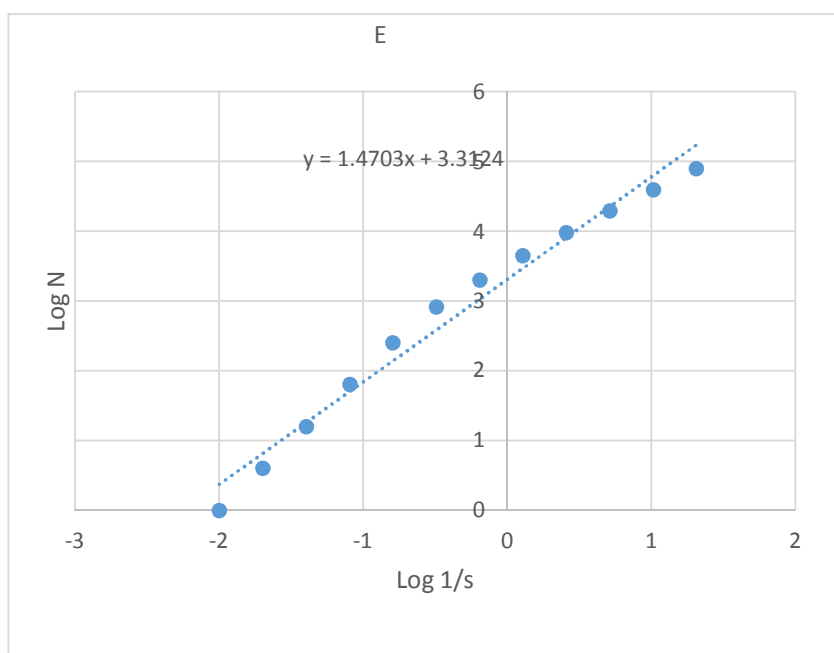
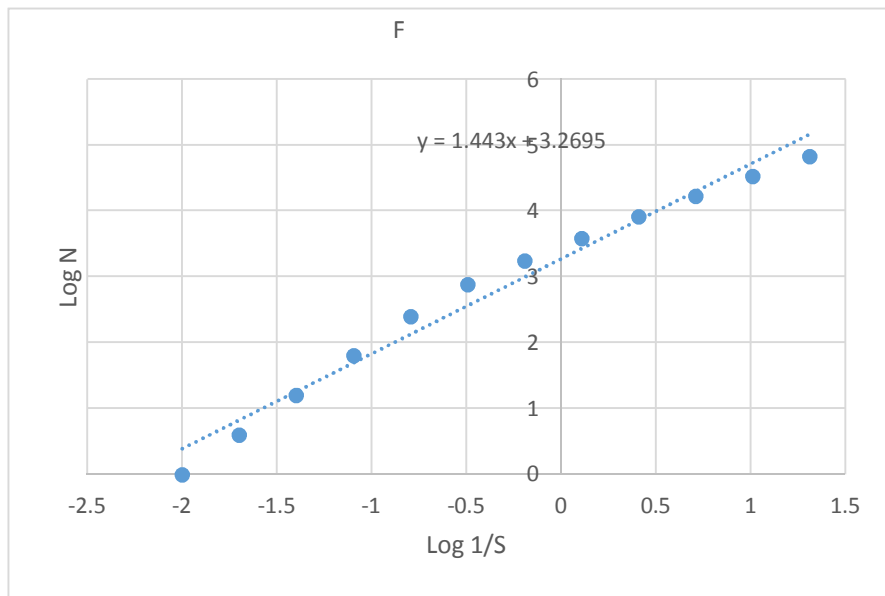
ارزیابی و مقایسه کارایی روش‌های کمی فرکتال..... ابوالفضل گورابی و همکاران

جدول ۴. لگاریتم معکوس طول شبکه (Size) و خانه‌های حاوی رودخانه (Number) و بُعد فرکتالی جزئی رودخانه (Partial FD)

F		E		D		C		B		A		چهارچوب شبکه
Partial FD	Log (N river)	Partial FD	Log (N river)	Partial FD	Log (N river)	Partial FD	Log (N river)	Partial FD	Log (N river)	Partial FD	Log (N river)	Log (1/size)
۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	-۲
۲	۰/۶۰	۲	۰/۶۰	۲	۰/۶۰	۲	۰/۶۰	۲	۰/۶۰	۲	۰/۶۰	-۱/۷۰
۲	۱/۲۰	۲	۱/۲۰	۲	۱/۲۰	۲	۱/۲۰	۲	۱/۲۰	۲	۱/۲۰	-۱/۴۰
۱/۹۸	۱/۸۱	۱/۹۸	۱/۸۱	۱/۹۸	۱/۸۱	۱/۹۸	۱/۸۱	۱/۹۸	۱/۸۱	۱/۹۸	۱/۸۱	-۱/۱۰
۱/۶۴	۲/۴۰	۱/۷۱	۲/۴۰	۱/۵۹	۲/۴۰	۱/۶۲	۲/۴۰	۱/۵۸	۲/۴۰	۱/۵۵	۲/۴۰	-۰/۸۰
۱/۲۰	۲/۸۹	۱/۲۹	۲/۹۲	۱/۲۰	۲/۸۸	۱/۱۹	۲/۸۹	۱/۲۰	۲/۸۸	۱/۲۳	۲/۸۷	-۰/۴۹
۱/۱۳	۳/۲۵	۱/۱۶	۳/۳۱	۱/۱۳	۳/۲۴	۱/۱۱	۳/۲۵	۱/۱۱	۳/۲۴	۱/۱۲	۳/۲۴	-۰/۱۹
۱/۰۷	۳/۶۰	۱/۰۹	۳/۶۵	۱/۰۶	۳/۵۸	۱/۰۵	۳/۵۸	۱/۰۶	۳/۵۷	۱/۰۶	۳/۵۷	۰/۱۱
۱/۰۳	۳/۹۲	۱/۰۴	۳/۹۸	۱/۰۳	۳/۹۰	۱/۰۳	۳/۹۰	۱/۰۳	۳/۸۹	۱/۰۲	۳/۸۹	۰/۴۱
۱/۰۱	۴/۲۳	۱/۰۱	۴/۳۰	۱/۰۱	۴/۲۱	۱/۰۱	۴/۲۱	۱/۰۱	۴/۲۰	۱/۰۱	۴/۲۰	۰/۷۱
۱	۴/۵۳	۱	۴/۶۰	۱	۴/۵۱	۱	۴/۵۱	۱/۰۱	۴/۵۰	۱	۴/۵۰	۱/۰۱
۳/۶۹	۴/۸۳	۳/۷۴	۴/۹۰	۳/۶۷	۴/۸۱	۳/۶۷	۴/۸۱	۳/۶۷	۴/۸۱	۳/۶۷	۴/۸۱	۱/۳۱



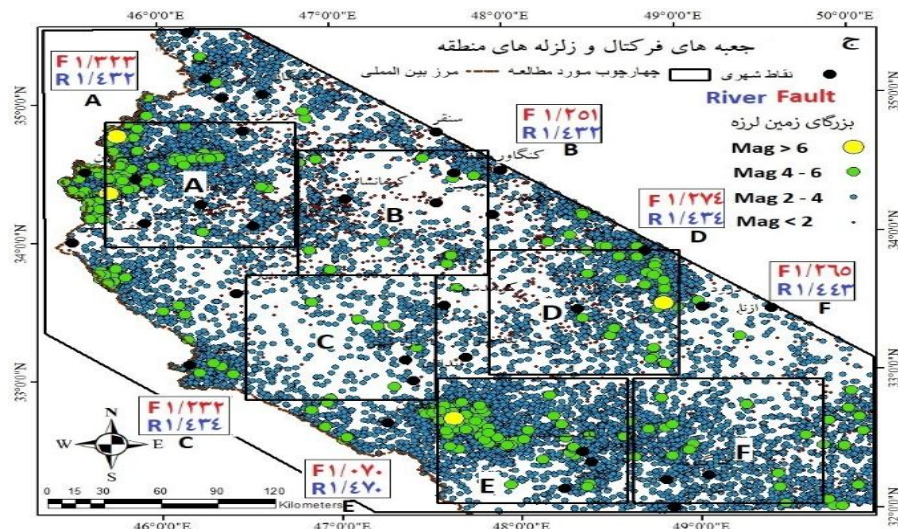




شکل ۸. بُعد فرکتالی شبکه زهکشی جعبه‌های مختلف

روش نامبر سائیز شبکه زهکشی نیز تغییرات جزئی بُعد فرکتالی را نشان می‌دهد و برای شبکه زهکشی نیز سه جامعه قابل تشخیص است. براساس شیب عمومی، خط رگرسیون که کمیت کلی آن برای محدوده‌های A تا D $1/43$ ، $1/47$ E و $1/44$ F است، کلیه نقاطی که بُعد آن‌ها بزرگ‌تر از این مقادیر است (جامعه زمینه‌ای) دارای بُعد جزئی متغیر بوده و آشفستگی در آن‌ها مشاهده نمی‌شود، جامعه دوم (آستانه‌ای)، با بُعد فرکتالی حدود ۱ تا $1/2$ ظاهر می‌شود و مؤید پیدایش یک جامعه با کمینه تغییرات بُعد فرکتالی بوده و نشانگر کاهش آشفستگی و افزایش خواص فرکتال است و جامعه سوم دارای افزایش ناگهانی بُعد عدد بزرگ‌تر از ۱ است که تا حدی نشانه توسعه جامعه فرکتال در یک روند غیرخطی است. لازم به ذکر است که پیدایش جوامع متناظر با خواص فرکتال و بُعد بزرگ‌تر از یک، نشان از گسترش محدود جامعه داشته و هنوز به مرزهای آشفستگی در ابعاد سطحی و حجمی نرسیده است. به عبارت دیگر، توزیع اجزای متناظر مرحله در مرحله طفولیت است و روند شکل‌گیری و توزیع هندسی زهکشی از یک روند ساده و متأثر از الگوهای خطی (مراحل آغازین توزیع غیرخطی پدیده‌ها) پیروی می‌کند. مهم ترین الگوی حاصل همان الگوی توزیع اجزای متناظر با بُعد فرکتالی حدود $0/9$ است که آغاز یک توزیع غیرخطی و ایجاد شرایط آشوبناک (اما قابل پیش‌بینی) را نوید می‌دهد.

برای انتخاب گامای مناسب، مقادیر میانگین ارزش فازی برای هر جعبه محاسبه و با مقادیر فرکتالی جعبه‌ها مقایسه شد (شکل ۹: الف). گامای $0/7$ بیشترین همخوانی را با داده‌های فرکتالی دارد و مقادیر گامای کمتر از آن با تفاوت کمی ثابت بود. نتایج همپوشانی مربع‌های مطالعاتی را با نتایج مدل فازی (گامای $0/7$) و کانون‌های زلزله نشان می‌دهد که مناطق A، B، D به ترتیب دارای ارزش فازی بالاتر هستند. منطقه E تنها در قسمت شمالی در محدوده گسل‌های جبهه کوهستان این تمرکز را نشان می‌دهد و سایر قسمت‌ها ارزش پایین دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تراکم زلزله‌هایی با بزرگی بین ۴-۶ و بیش از ۶ در محدوده A با بالاترین بُعد فرکتالی نسبت به سایر جعبه‌ها بیشتر است. در سایر جعبه‌ها نیز به ترتیب کاهش بُعد فرکتالی، شاهد کاهش زمین‌لرزه‌ها هستیم، تنها استثناء در این مورد جعبه E است که احتمال نقش گسل‌های مدفون در افزایش زلزله را نشان می‌دهد، چراکه بُعد فرکتالی گسل‌های آن کم‌ترین میزان و مقادیر فرکتالی زهکشی آن بالاترین رقم بین محدوده‌ها است. به عقیده بربریان (۱۹۹۵)، ارتباط زمین‌لرزه و زمین‌ساخت زاگرس پیچیده است، زیرا بیشتر زمین‌لرزه‌های زاگرس بدون گسلش سطحی هستند که وجود سازندهای تبخیری (گچسارن در منطقه مورد بحث) از عوامل مؤثر در کاهش انرژی و جلوگیری از گسلش سطحی است.



شکل ۹. رابطه بین مقادیر میانگین ارزش فازی و بُعد فرکتالی گسل‌ها (الف)، همپوشانی جعبه‌های بررسی فرکتالی با نتایج مدل فازی (ب) و کانون‌های زلزله (ج)

۵- نتیجه‌گیری

تحلیل فرکتالی آبره‌ها و شکستگی‌ها ابزار مؤثری در تعیین بلوغ ساختاری یک گستره است و نوعی نقشه پیش‌نشانگر زلزله را ارائه می‌دهد. مناطق دارای بُعد فرکتالی بالا برای گسل و پایین برای زهکشی فعالیت تکتونیکی بیشتری دارند (شهریاری و خطیب، ۱۳۷۶؛ فاتحی و همکاران، ۱۳۹۰؛ صدر و همکاران، ۱۳۹۷). طبق این تحقیق، محدوده A یعنی غرب کرمانشاه، در زاگرس چین‌خورده دارای بالاترین بُعد فرکتالی کلی (۱/۳۲) برای گسل و بُعد فرکتالی نسبتاً کمتر برای شبکه زهکشی (۱/۴۳۲) است. محدوده E که شمال آن در محدوده گسل جبهه کوهستان و جنوب آن فروافتادگی دزفول است، از این نظر عکس A است یعنی بُعد فرکتالی کلی گسل آن کمترین (۱/۰۷) و بُعد فرکتالی کلی شبکه زهکشی آن بیشترین (۱/۴۷۰) مقدار بین محدوده‌ها است. محدوده‌های D، F، B که در امتداد شکستگی اصلی زاگرس قرار گرفته‌اند، بُعد فرکتالی گسل نزدیک به هم دارند؛ اما از شمال به جنوب بُعد فرکتالی زهکشی آن‌ها افزایش می‌یابد که می‌تواند منعکس‌کننده تأثیر لیتولوژی باشد. محدوده C، بُعد فرکتالی پایین‌تری برای گسل و بالاتری برای زهکشی دارد. شواهد لرزه‌ای در مقایسه با سایر مناطق نیز آن را تأیید می‌کند و نشان‌دهنده بلوغ تکتونیکی آن است. بنابراین با توجه به نتایج بُعد فرکتالی،



منطقه A فعال‌ترین گستره از نظر تکتونیکی می‌باشد و شواهد لرزه‌ای نیز کاملاً آن را تأیید می‌کند از جمله زلزله اخیر در کرمانشاه که تلفات فراوانی به دنبال داشت. تعارض موجود در افزایش شواهد لرزه‌ای محدوده E را می‌توان به گسل‌های مدفون نسبت داد که نیازمند مطالعه دقیق است. در سایر محدوده‌ها تغییرات بُعد فرکتالی گسل با بزرگای زلزله همخوانی دارد. همپوشانی مربع‌های فرکتالی با توان‌های مختلف گاما در مدل فازی تا حد زیادی تأییدکننده نتایج بود به‌طوری که محدوده A در این مدل نیز بالاترین پتانسیل فعالیت تکتونیکی را نشان می‌دهد و پس از آن محدوده‌های F و B قرار دارند که آن‌ها نیز جزو محدوده‌هایی با بُعد فرکتالی بالا هستند. در اینجا نیز محدوده C، نسبت به سایر مناطق آرامش تکتونیکی بیشتری را تجربه می‌کند.

سپاسگزاری

این مقاله از رساله دکتری مصوب در دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران استخراج شده است و تحت حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) انجام شده است بدینوسیله از حمایت این صندوق تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- فهرست منابع

- Aghanbati, S.A. (2004). *Geology of Iran*. Geological Survey of Iran, 640.
- Ai, T., Zhang, R., Zhou, H.W., & Pei, J.L. (2014). "Box-counting method to directly estimate the fractal dimension of a rock surface". *Applied surface science*, 314, 610-621. DOI.org/10.1016/j.apsusc.2014.06.152
- Amini Fasoudi, A. (2005). "Application of Fuzzy Logic Inference to Regional Planning and Development Studies". *Science & Development*, (17), 39-61.
- Angeles.G., Perillo, G., & Pierini, J. (2004). "Fractal analysis of tidal channels in the Bahía Blanca Estuary (Argentina)". *Geomorphology*, 57(3-4), 263-274. DOI.org/10.1016/S0169-555X(03)00106-5
- Baas, A.C.W. (2002): Chaos, "Fractals and Self-Organization in Coastal Geomorphology: Simulating Dune Landscapes in Vegetated Environments". *Geomorphology*, 48 (1-3), 309-328. DOI.org/10.1016/S0169-555X(02)00187-3

- Berberian, M. (1995). "Masterblind thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics". *Tectonophysics*, 241, 193-224. DOI.org/10.1016/0040-1951(94)00185-C
- Bi, L., He, H., Wei, Z., & Shi, F. (2012). "Fractal properties of landforms in the Ordos Block and surrounding areas, China". *Geomorphology*, 175-176, 151-162. DOI.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.006
- Bonham-Carter, G. F. (1991). *Geographic Information System for Geoscientists: Modeling with GIS*, Pergamon, Ontario, PP. 291-300.
- Caram, A. (2010). "Chaos theory, fractal (fractal) and nonlinear systems in geomorphology". *Natural Geography*, 3(8), 67-82.
- Darvishzadeh, A. (1991). *Geology of Iran*. Amirkabir Publishing Institute, 902.-
- Agrad, P., Omrani, J., Jolivet, L., & Mouthereau. (2005). "Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation". *International Journal of Earth Sciences*, 94, 401-419. DOI 10.1007/s00531-005-0481-4
- Fatehi, M., Mohjal, M., & Khatib, M.M. (2011). "Fractal analysis of faults and their relationship with earthquakes in the Neshan shear zone of Dehshir fault, west of Yazd province". *Earth Science Research*, 2(8), 36-45.
- Goorabi, A. (2019). "Detection of landslide induced by large earthquake using InSAR coherence techniques –Northwest Zagros", Iran". *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, In press, DOI.org/10.1016/j.ejrs.2019.04.002
- Han, Z., Zhang, P., Wu, L., & Hou, J. (1998). "Characters about the modern movement of North Qilianshan block". In: Department of Geology, Peking University, *Collection of International Conference on Geological Science in Peking University*. Seismological press, Beijing.
- Hovius, N. (1996). "Regular spacing of drainage outlets from linear mountain belts". *Basin Research*, 8(1), 29-44. DOI:10.1111/j.1365-2117.1996.tb00113.x
- Jackson, J., & Leeder, M. (1994). "Drainage systems and the development of normal fault: an example from Pleasant Valley Nevada". *Journal of Structural Geology*, 16(8), 1041-1059. DOI.org/10.1016/0191-8141(94)90051-5.



- Klir, G.J., & Yuan, B. (1995). "Fuzzy Sets Fuzzy Logic: Theory and Application. Upper Saddle River". *N.J. Prentice Hall PTR*. DOI:10.5860/choice.33-2786
- Lifton, N.A., & Chase, C.G. (1992). "Tectonic, climatic and lithologic influences on landscape fractal dimension and hypsometry: implications for landscape evolution in the San Gabriel Mountains, California". *Geomorphology*, 5, 77-114. DOI.org/10.1016/0169-555X(92)90059-W
- Lin, H., kao, J., Li, K., & Hwang, H.H. (1996). "Fuzzy GIS assisted landfill siting analysis. Proceedings of International Conference on Solid Waste Technology and Management". *System Theory. Brooklyn, NY: Polytechnic Press*. <http://hdl.handle.net/11536/19928>
- Mahboobi, H., AliMohammadi, A., Sharifi Kia, M. (2010). "Influence of Weight of Fuzzy Inference System Rules of Mamdani on Output Accuracy of Epithermal Gold Mineral Potential Map: Takab Region". *Space Planning and Planning (Teacher of Humanities)*, 14 (4), 111-136.
- Mandelbrot, B.B. (1982). *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman and Company, New York..
- Metkkan A.A., Shakiba, A., PoorAli S.H., & Nazimfar, H. (2008). "Locating suitable areas for landfill using GIS (Study Area: Tabriz City)". *Environmental Sciences*, 6(2), 121-131.
- Nasrollahi, Kh., Akbari, N., & Heidari, M. (2011). "Comparative Analysis of Ranking Methods in Measuring Development (Case Study: Khuzestan Provinces)". *Land Planning*, 3(4), 65-93.
- 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.
- PourAhmad, A., Habibi, K., MohammadZahrai, S., & NazariAdli, S. (2007). "Using Fuzzy Algorithms and GIS for Urban Equipment Location (Case Study: Babolsar City Landfill)". *Environmental Studies*, 33(42), 31-42.
- Ramesht, M.H. (2010). "Space in Geomorphology". *Space Planning and Planning (Teacher of Humanities)*, 14(4), 111-136.

- Richardson, L.F. (1961). *The problem of contiguity: An Appendix to Statistics of Deadly Quarrels*. General System Yearbook, 6, 139-187.
- Rodriguez-Iturbe, I., & Rinaldo, A. (1997). *Fractal River Basin (Chance and Self-Organization)*. Cambridge, Cambridge University Press. DOI:10.1063/1.882305
- Sadr, A.H., Alipour, R., & , Ghamarian, S. (1977). "Investigation of the Role of Active Tectonic Structures in Fractal Dimensions of Fractures and Waterways of Hasan Abad Fault (Southwest of Qazvin)". *Tectonics*, 2(5), 3-15.
- Saeedi, H., & Afsharijo, P. (2010). "Fuzzy logic in simple language". *Entrepreneur*, -(82), 61-64.
- Sahraeyan, M., Seif, H., Haddad, E. E., & Mohammadzadeh, N. (2015). "Sedimentology and Geochemistry of the Late Miocene–Pliocene Succession in the Fars Interior (SW Iran)". *Chemostratigraphy*, 103–129. DOI:10.1016/b978-0-12-419968-2.00005-4
- Schuller, D.J., Rao, A.R., & Jeong, G.D. (2001). "Fractal characteristics of dense stream networks". *Journal of Hydrology*, 243 (1-2), 1–16. DOI.org/10.1016/S0022-1694(00)00395-4
- Shahriari, S., & Khatib, M.M (1997). "Fractal analysis of the Nehbandan fault system". *Geosciences*, 6(23-24), 22-39.
- Shayan, S. (2004). "Geomorphological evidence in the Great Lakes Stratigraphy of Simare (Zagros Mountains) Zagros, Southwestern Iran". *Space Planning and Planning (Teacher of Humanities)*, 8(1), 45-70.
- Turcotte, D.L. (1997). *Fractal and Chaos in Geology and Geophysics*, Cambridge University Press. Cambridge. DOI:org/10.1017/CBO9781139174695
- Verges, J., Goodarzi, M.G.H., Emami, H., Karpuz, R., Efstathiou, J., & Gillespie, P. (2011). "Multiple detachment folding in Pusht-e Kuh arc, Zagros: Role of mechanical stratigraphy. Thrust fault-related folding". *The American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 94, p. 69–94. DOI:10.1306/13251333M942899