

ارزیابی و مقایسه دقت داده‌های گسلی و لرزه‌ای در تحلیل فرکتالی زمین‌ساخت زاگرس

شمال غرب

ابوالقاسم گورابی^۱؛ دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
سید محمد زمانزاده؛ دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
مجتبی یمانی؛ استاد ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
پریسا پیرانی؛ دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۷/۱۴

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۸

چکیده

تغییرات مکانی پارامترهای فرکتالی عامل مهمی برای بررسی وضعیت زمین‌ساختی است. در هندسه فرکتال، بعد فرکتال در هر مقیاسی، حفظ می‌شود که بیانگر خاصیت اصلی فرکتال است. در این تحقیق به منظور بررسی کارایی روش فرکتال در بررسی زمین‌ساخت زاگرس شمال غرب، به مقایسه و آزمون یکسان بودن نتایج ابعاد فرکتالی گسل‌ها در نقشه‌هایی با مقیاس‌های مختلف، و زمین‌لرزه‌هایی با طول دوره و جزئیات و مقیاس‌های مختلف بزرگا پرداخته شد. برای این منظور از ۶ لایه اطلاعاتی استفاده گردید و ابعاد فرکتالی آن‌ها به روش مربع‌شمار محاسبه و نتایج بعد فرکتالی آن‌ها مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. دو دسته داده گسلی مستقیماً و دو دسته داده زمین‌لرزه (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله و مؤسسه ژئوفیزیک) یکبار بدون تغییر و دیگر بار برای افزایش دقت با احتساب بزرگای کمال وارد محاسبات شدند. نتایج نشان می‌دهد که ابعاد هندسی گسل‌های منطقه فرکتالی است و تنها تفاوت در ثبت جزئیات گسل‌ها سبب تغییری جزئی در ترتیب مناطق فعال در دو مقیاس شده است و نتایج دو مقیاس تقریباً مشابه است. در مورد داده‌های لرزه‌ای نتایج داده‌های از ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰ که از تعداد کمتر زمین‌لرزه و مقیاس مختلف ثبت بزرگا برخوردارند تطبیقی با واقعیت نشان نمی‌دهند، در صورتی که می‌توان به نتایج ابعاد فرکتالی داده‌های زمین‌لرزه‌های منحصرأ سده ۲۰ که از نظر دقت و مقیاس ثبت بزرگا یکسان هستند، اعتماد نمود. نتایج آن، فعال‌ترین منطقه از نظر بعد فرکتالی را محدوده غرب کرمانشاه نشان می‌دهد و شاهد آن تمرکز زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای بالاتر به ویژه زمین‌لرزه اخیر کرمانشاه با بزرگای ۷/۳ است که تلفات فراوانی به دنبال داشت.

واژه‌های کلیدی: فرکتال، زمین‌ساخت، زاگرس شمال غرب، گسل، زمین‌لرزه.

مقدمه

هندسه اقلیدسی یا هندسه کلاسیک، اشیای فیزیکی قابل توصیف با استفاده از خطوط، دایره، بیضی و ... را با بعد صحیح دربر می‌گیرد. با این حال الگوهایی در طبیعت یافت می‌شود که به طور قابل توجهی بسیار پیچیده هستند (Schuller et al, ۲۰۰۱:۲). پدیده‌های ناهموار با 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. ابعاد هندسه فرکتال اعشاری هستند و محدودیتی برای اندازه‌گیری پدیده‌های طبیعی ایجاد نمی‌کنند و امکان مقایسه آن‌ها را فراهم می‌آورند (Turcotte, ۱۹۷۷:۱۲۱). در اندازه‌گیری خط ساحلی، محققان دریافتند در اندازه‌گیری با واحدی کوچکتر و دقیقتر، طول ظاهری ساحل طولانی‌تر است، در صورتی که برای یک شیء محصور غیر فرکتالی مانند یک دایره، طول کلی پیرامونی آن به یک عدد ثابت نزدیک خواهد شد (Schuller et al, ۲۰۰۱:۲). واژه فرکتال اولین بار توسط مندلبروت^۲ ریاضیدان در سال ۱۹۷۵ از واژه لاتین فراکتوس^۳ گرفته شد تا بر ماهیت قطعه قطعه 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 (Baas, ۲۰۰۲, ۳۱۱). بنابراین در فرکتال‌ها این بعد فرکتال است که مهم است و نه مقیاس، زیرا در هر اندازه‌ای، بعد فرکتال حفظ می‌شود و بیانگر خاصیت اصلی فرکتال است (Phillips, ۲۰۰۲, ۱۴۴). تغییرات مکانی پارامترهای فرکتالی عامل مهمی برای بررسی وضعیت زمین‌ساختی است. با تعیین بعد فرکتال ساختارهای خطی مثل گسل‌ها، می‌توان بسیاری از خصوصیات آن‌ها را تخمین زد و و تراکم این ساختارهای خطی را تعیین و با یکدیگر مقایسه نمود (Turcotte, ۱۹۷۷:۱۲۱). علاوه بر آن گسل‌های اصلی یا فرعی در مناطقی از طول خود که هندسه بی‌قاعده دارند، بیشتر دچار گسیختگی می‌شوند (Schwartz & Coopersmith, ۱۹۸۴: ۱۷). در نتیجه بدون در نظر گرفتن مقیاس، سیمای ناهموار سیستم‌های گسلی در گسل‌ها می‌تواند تابع هندسه فرکتالی بوده و این بی‌نظمی هندسی می‌تواند به صورت بعد فرکتالی بررسی شود (Sukmono et al, ۱۹۹۶:۵). این عامل با رفتار لرزه‌ای گسل نیز مرتبط است. زمین‌لرزه یکی از رخداد‌های همزاد با گسلش است (Bachmanov, et al, ۲۰۱۲: ۲۲۱) و جانمایی و تمرکز زمین‌لرزه‌ها در یک منطقه بیانگر تنش و آزاد شدن انرژی و به طور کلی مبین فعال بودن منطقه از نظر زمین‌ساختی است (بیت‌الهی، ۱۳۸۹: ۱). یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر به طور گسترده‌ای در تحلیل‌های لرزه‌خیزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، روش‌های فرکتالی هستند (میرعابدینی و همکاران، ۱۳۹۰: ۲). در تحلیل فرکتالی می‌توان گفت افزایش بعد فرکتالی بیانگر محیط مناسب برای تجمع انرژی و آزاد شدن آن در آینده است همچنین این تحلیل بیانگر عبور مسیرهای تنش در یک منطقه گسترده است که در برخورد با سطوح ضعیف (گسل‌های موجود) می‌توانند عامل حرکت آن‌ها و آزاد شدن انرژی باشد که نشان دهنده ناپایداری منطقه است (فاتحی و همکاران، ۱۳۹۰: ۳۹).

پس از انتشار کتاب مندل بروت در زمینه فرکتال (۱۹۸۲)، محققان متعددی سعی در بررسی مسائل مختلف با روش‌های فرکتالی نمودند از جمله ، کینگ (King, ۱۹۸۳) به کاربرد فرکتال در زمین‌ساخت پرداخت، و پس از او

۱. Fractals
۲. Mandelbrot
۳. Fractus

تورکوته (Turcotte, ۱۹۸۶) مفهوم فرکتال را مورد استفاده قرار داد و در کتاب خود (۱۹۹۲) به بسط آن در بررسی مسائل زمین‌ساختی به ویژه شبکه زهکشی، گسل و زمین‌لرزه پرداخت. هیراتا (Hirata, ۱۹۸۹) با استفاده از الگوریتم مربع شمار، خود تشابهی فرکتالی هندسه شکستگی سنگ‌ها بر اساس نقشه گسل‌ها را بررسی نمود و نتیجه گرفت که از مرکز ژاپن به اطراف بعد فرکتالی کاهش می‌یابد. بادری (Bodri, ۱۹۹۳) با استفاده از روش فرکتال، ژاپن مرکزی را از طریق روش‌های فراوانی-بزرگای توزیع زمین‌لرزه، توزیع کانون سطحی زمان شروع زمین‌لرزه و سیستم شکستگی گسل‌های منطقه بررسی کرد و نتایج حاکی از انطباق مناسب مقادیر فرکتالی این روش‌ها بود. لی و کوسنس (Lei & Kusunose, ۱۹۹۹) با کمک روش مربع شمار، ساختارهای فرکتالی مربوط به توزیع فضایی سه سیستم زمین‌شناسی (کانون‌های زمین‌لرزه، گسل‌های فعال، رودخانه‌ها) را مورد تحلیل قرار دادند و نتایج نشان داد که یک مقیاس مشخص مشترک ۱۳ کیلومتری، توزیع فضایی را به دو باند تقسیم می‌کند و در هر دو توزیع بصورت نمایی است. بهاتاچاریا و همکاران (Bhattacharya et al, ۲۰۰۴) با استفاده از مدل همپوشانی دو فرکتالی سعی نمودند مدلی از رخداد زمین‌لرزه را از طریق شبیه‌سازی و مقایسه با داده پس‌لرزه ارائه دهند و نتایج نشان داد که انتگرال تجمعی بزرگی پس‌لرزه‌ها در طول زمان، خطی مستقیم با شیب مشخص است که شیب آن با هندسه فرکتال سطح گسل که اغلب پس‌لرزه‌ها را تولید می‌کند، مرتبط است. گلوگن و همکاران (Gloaguen et al, ۲۰۰۷) بر مبنای داده‌های سنجش از دور راداری و مدل ارتفاع رقومی به استخراج گسل‌ها و تحلیل فرکتالی بخش جنوب شرقی ریفت کنیا پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد بعد فرکتالی ابعاد گسل‌ها با بعد فرکتالی حاصل از تصاویر سنجش از دور مشابه است و روش آن‌ها به درک تکامل سیستم گسل و طبقه‌بندی شدت تغییر شکل کمک می‌کند. ازترک (Ozturk, ۲۰۱۲) کانون‌های سطحی زمین‌لرزه‌های ترکیه را در یک دوره طولانی مدت از طریق بررسی مقادیر b و بعد فرکتالی مطالعه نمود و در نتیجه ترکیه را به ۵۵ منطقه تکنونیک تقسیم کرد و همبستگی منفی بین این دو مقدار را نشانه شدت نسبتاً بالای تنش و خوشه‌بندی زمین‌لرزه‌های قوی‌تر در منطقه دانست. پیلپلی و چووانگ (Pailoplee & Choowong, ۲۰۱۴) بعد فرکتالی و توزیع فراوانی-بزرگای ۱۳ منطقه منبع لرزه در جنوب شرق آسیا را با استفاده از مجموعه کامل داده‌های لرزه‌ای مورد بررسی قرار دادند و نتایج بیانگر تغییرات تنش لرزه‌ای در منطقه بود و در نتیجه مناطق با تنش تکنونیک بالا را مشخص نمودند. ستیاوان و ساپیه (Setyawan & Sapiie, ۲۰۱۹) در بررسی رابطه بین بعد فرکتالی توزیع فضایی مرکز پس‌لرزه‌ها و گسل فعال سوماترا با استفاده از روش مربع شمار، بعد فرکتالی این گسل و همبستگی مثبت را مشخص نموده و ۱۵ زمین‌لرزه را از طریق پس‌لرزه با گسل سوماترا مرتبط دانستند. هویی و همکاران (Hudi et al, ۲۰۲۰) منطقه لرزه‌ای تایوان را از نظر مشخصات چند فرکتالی توزیع فضایی-زمانی زمین‌لرزه‌ها مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج آن‌ها نشان داد منحنی زمانی چندفرکتالی، قبل و بعد از زمین‌لرزه‌های بزرگ تغییر می‌کند، همچنین مکانسیم‌های کانونی و ساختاری زمین‌شناسی در عمق صفر تا نه کیلومتری پیچیده‌تر هستند و نیز بین مقادیر فرکتالی b و همبستگی مثبت وجود دارد.

همانطور که گفته شد پدیده‌های فرکتالی مستقل از مقیاس هستند یعنی همیشه در هر مقیاسی جزئیاتی برای مشاهده دارند و اگر بخشی از آن‌ها را بزرگ‌نمایی کنیم جزئیات آن تا بی‌نهایت مشابه با پدیده اصلی خواهند بود. در این تحقیق فرکتالی بودن گسل‌های منطقه در مقیاس‌های مختلف و داده‌های لرزه‌ای با جزئیات مختلف مورد بررسی

زمین‌ساخت و لرزه‌زمین‌ساخت ایران تحت تأثیر دو بلوک مقاوم توران (متعلق به صفحه اوراسیا) در شمال شرق و عربی در جنوب غرب است (Jackson & Mckenzie, ۱۹۹۵: ۱۸۵) (شکل ۱: الف) ، بنابراین زمین‌ساخت فعال و دگرشکلی آن تحت تأثیر حرکت رو به شمال صفحه عربی نسبت به اوراسیا است اما با توجه به توزیع زمین‌لرزه‌ها، دگرشکلی فعال در آن یکسان توزیع نشده است. اندازه‌گیری‌های جدید کل کوتاه‌شدگی را حدود ۲۰ میلیمتر تخمین زده‌اند که ۱۰ میلیمتر آن در زاگرس توزیع شده است (Vernant, ۲۰۰۴: ۱۷۷, ۳۸۱). همگرایی شمالی-جنوبی صفحه عربی-اوراسیا منطبق بر زاگرس شمال‌غربی است (Blanc et al, ۲۰۰۳: ۴۰۱). فعالیت گسل‌های معکوس و امتدادلغز نوار زاگرس را در زمره مناطق فعال لرزه‌خیز ایران قرار داده است (Hessami et al, ۲۰۰۱: ۵). گسل اصلی معکوس زاگرس و گسل اصلی عهد حاضر مرز شمالی لرزه‌خیزی در زاگرس را تشکیل می‌دهد (Mirzaei et al, ۱۹۹۷: ۱۶).

ب) روش کار

این پژوهش به لحاظ هدف، از نوع کاربردی و به لحاظ روش از نوع تحلیلی به‌شمار می‌رود. در این تحقیق از دو دسته داده استفاده شده است: داده‌های زمین‌لرزه با بزرگای مختلف که توسط مقیاس‌های مختلف بزرگای ثبت شده‌اند و مربوط به دوره طولانی‌تری هستند اما عمدتاً زمین‌لرزه‌های بزرگ (با بزرگای بیش از ۲) را در بر دارند (سایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی^۲) و داده‌های صرفاً زمین‌لرزه سده بیستم که از نظر مقیاس ثبت یکدست و از نظر تعداد رخداد از دقت بالایی برخوردارند (دریافت مستقیم از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران). همچنین گسل‌های منطقه در دو مقیاس مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند؛ مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ و مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ که در هر دو دسته بخشی از نقشه‌ها توسط سازمان نقشه‌برداری و بخشی توسط شرکت نفت تهیه شده‌اند. بدیهی است جزئیات درج شده در گسل‌های برداشت شده توسط این دو ارگان اندکی متفاوت هستند و تا حدودی نتایج را تحت تأثیر قرار خواهند داد، با این وجود در ارائه یک الگوی کلی از تغییرات ابعاد فرکتالی پدیده‌های زمین‌ساختی منطقه کمک‌کننده خواهند بود. برای انجام این تحقیق، ابتدا لایه گسل‌های منطقه در محیط نرم افزار Arc Gis از نقشه‌های موجود استخراج شد، در مجموع منطقه مورد مطالعه از هشت نقشه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ و ۴۳ نقشه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تشکیل شده است. در مرحله بعد از روش مربع شمار برای محاسبه ابعاد فرکتالی گسل‌ها و زمین‌لرزه‌های منطقه استفاده شد.

• روش مربع شمار (برآورد پارامتر D)

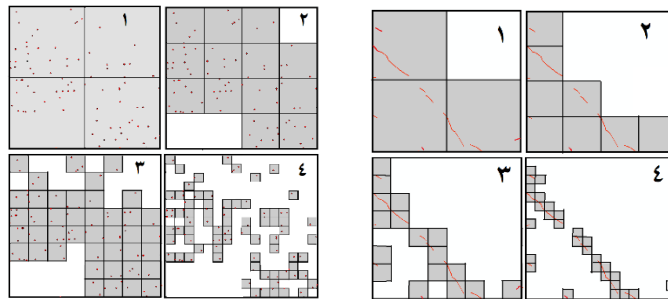
بعدفرکتالی پیچیدگی یک شیء فرکتالی را تعیین می‌کند، یک شیء با بعدفرکتالی پایین نسبت به شیء با بعد فرکتالی بالا کمتر پیچیده است (Schuller et al, ۲۰۰۱:۲). مندل بروت (۱۹۸۲) معادلاتی برای محاسبه بعدفرکتال با استفاده از دو کمیت $N-S^3$ ارائه نمود. هاسدورف (۱۹۹۱) ابعاد فرکتالی که برای تمامی فرکتال‌ها مفید هستند را تعریف نمود گرچه محاسبه دقیق آن مشکل است و برای جلوگیری از پیچیدگی‌های محاسباتی آن دو مدل ارائه شده است. مدل اول به ریچاردسون (Richardson, ۱۹۶۱) نسبت داده می‌شود. مدل دوم، روش شمارش جعبه‌ای نام دارد (Schuller et al, ۲۰۰۱:۳). که حاصل همپوشانی یک سری از شبکه‌های تشکیل یافته از مربع‌هایی با طول ضلع S بر روی عوارض و شمارش تعداد خانه‌های N با اندازه S است (Number-Size) که عارضه را دربر می‌گیرند.

^۱ <http://irsc.ut.ac.ir>

^۲ <http://www.iiees.ac.ir/fa/eqcatalog/>

^۳ Number-Size

زمانی که اندازه جعبه‌ها کاهش می‌یابد، S نیز کاهش می‌یابد (Rodriguez-Iturbe & Rinaldo, 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 به صورتی انتخاب شود که کوچکترین عنصر قابل مشاهده از عارضه را در بر بگیرد. رابطه بین تعداد جعبه حاوی عارضه و طول ضلع جعبه از طریق تطبیق دادن رگرسیون خطی و محاسبه شیب خط مستقیم که همان بعد فرکتالی D است، محاسبه می‌شود (۴۰۶: Strogatz, ۱۹۹۴). تعداد سطر و ستون هر شبکه در این تحقیق به صورت رابطه‌نمایی از عدد ۲ تقسیم‌بندی یافته (۲، ۲، ۲، ۲، ۲، ۲، ۲، ۲، ۲، ۲، ...)، به این شکل که تعداد خانه‌ها به صورت ضربی از عدد ۴ افزایش می‌یابند (۱، ۴، ۱۶، ۶۴، ۲۵۶ و ...). همچنین بزرگترین ابعاد ایزومتریک شبکه ۱۰۰ کیلومتر است که هر بار برای شبکه بعدی نصف خواهد شد. (۱۰۰، ۵۰، ۲۵، ۱۲/۵ و ...) (جدول ۲). در این تحقیق طول ضلع تا حد ممکن کاهش یافته است شکل ۲ نحوه شبکه‌بندی تا چهار مرحله را برای گسل و زمین‌لرزه و همچنین نحوه شمارش خانه‌های واجد گسل و رومرکز زمین‌لرزه را نشان می‌دهد.

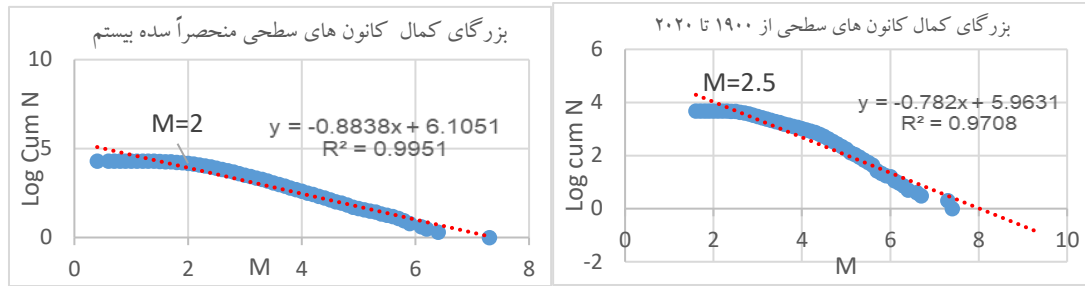


شکل ۲. الگوریتم مربع شمار و مراحل پیاده‌سازی آن روی گسل‌ها و کانون‌های زمین‌لرزه

مهم‌ترین پارامتر در بررسی لرزه‌خیزی، بزرگای کمال^۱ (M_c) یا بزرگی آستانه^۲ (M_{th}) است یعنی حداقل بزرگایی که داده‌های بالاتر از آن در کاتالوگ (مجموعه داده‌ها) کامل هستند است که می‌توان آن را با توجه به تغییر شیب نمودار فراوانی-بزرگای زمین‌لرزه‌ها به دست آورد. تصور بر این است که تغییر شیب یا افت تعداد رویدادهای لرزه‌ای در برابر بزرگی زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای کوچک‌تر از بزرگای کمال، به علت عدم گزارش رویدادهای لرزه‌ای باشد (Wiener & Wyss, ۲۰۰۰: ۸۵۹). این بزرگا محدود داده‌هایی که بهتر است مورد تجزیه و تحلیل فرکتالی قرار گیرند را نشان می‌دهد (میرعابدینی و همکاران، ۱۳۹۰: ۷-۱). به این منظور ابتدا داده‌های رومرکز براساس تعداد وقوع به بزرگا، مرتب و سپس فراوانی تجمعی وقوع هر دسته بزرگا محاسبه شده و به صورت لگاریتمی در برابر بزرگا قرار گرفت. محل شکست یا تغییر شیب در نمودار داده‌های ترسیم شده بیانگر بزرگای کمال یا بزرگای آستانه داده‌های لرزه‌ای است (شکل ۳).

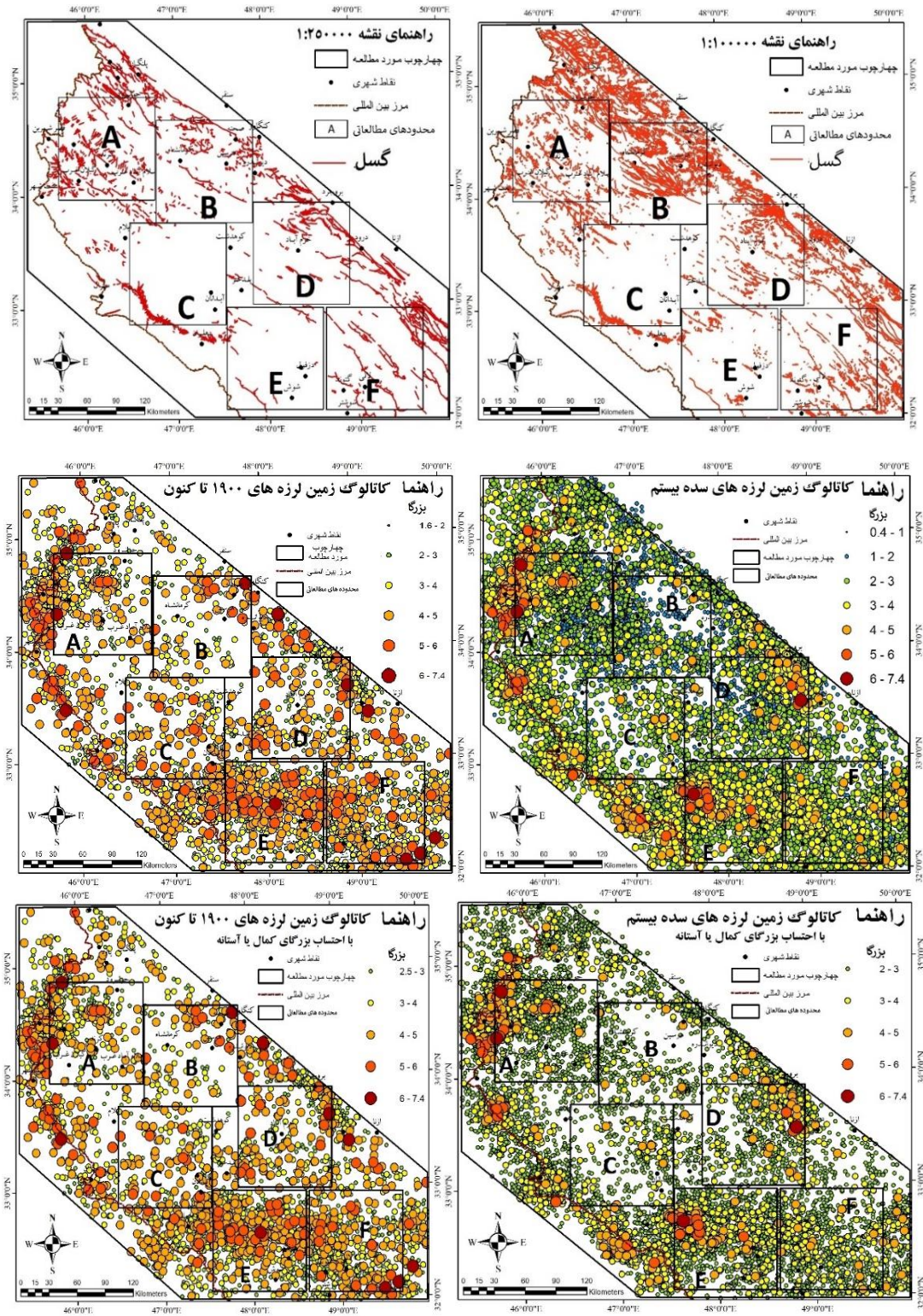
^۱. Magnitude of completeness

^۲. Magnitude of threshold

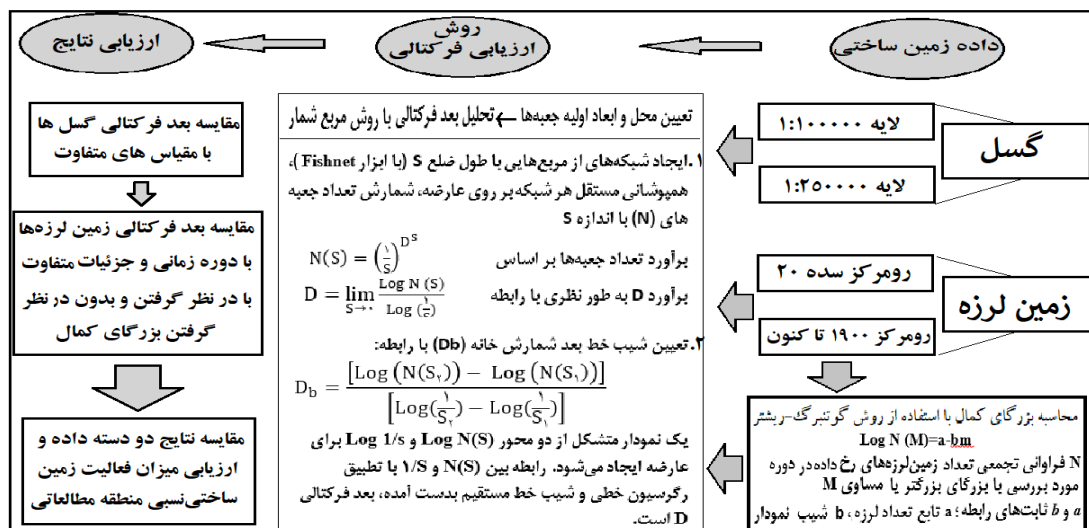


شکل ۳. برآورد بزرگای کمال یا بزرگای آستانه داده‌های لرزه‌ای (سمت راست: داده‌های سایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله؛ سمت چپ: داده‌های مؤسسه ژئوفیزیک)

شکل ۵ داده‌های مورد استفاده در تحلیل فرکتالی منطقه را نشان می‌دهد: گسل‌های با دو مقیاس مختلف، داده‌های زمین‌لرزه ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰ (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله) و منحصراً سده بیستم (مؤسسه ژئوفیزیک)، با و بدون احتساب بزرگای کمال. تمامی این مراحل در دیاگرام تحقیق (شکل ۴) نشان داده شده است.



شکل ۴. داده‌های مورد استفاده در فرایند تحقیق و توزیع جعبه‌های پوشاننده منطقه مطالعاتی (پهنه‌های انتخاب شده در برگزیده مناطق شاخص گسلی و نیز لرزه‌ای به منظور ارائه یک الگوی طولی و عرضی از تغییرات گسلی و لرزه‌ای و مقایسه بهتر داده‌ها می‌باشد)



شکل ۵. دیاگرام فرایند پژوهش (ترسیم: نگارندگان)

شرح و تفسیر نتایج

با توجه به دیاگرام تحقیق (شکل ۵) محاسبات ابعاد فرکتالی برای لایه‌های مورد استفاده در تحقیق (شکل ۴) صورت گرفت. جدول ۲ نتایج حاصل از همپوشانی شبکه‌هایی با طول ضلع‌های مختلف بر روی گسل‌های با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و رومکز زمین‌لرزه‌های از ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰ با و بدون احتساب بزرگای کمال و نیز نتایج حاصل از شمارش خانه‌های حاوی این عوارض در هر یک از سطوح شبکه برای جعبه‌های مختلف را نشان می‌دهد (همین مراحل برای گسل‌های با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ و رومکز زمین‌لرزه‌های سده بیست با و بدون احتساب بزرگای کمال نیز صورت پذیرفته است و برای پرهیز از اطاله کلام به ذکر نتایج نهایی آن‌ها اکتفا شده است).

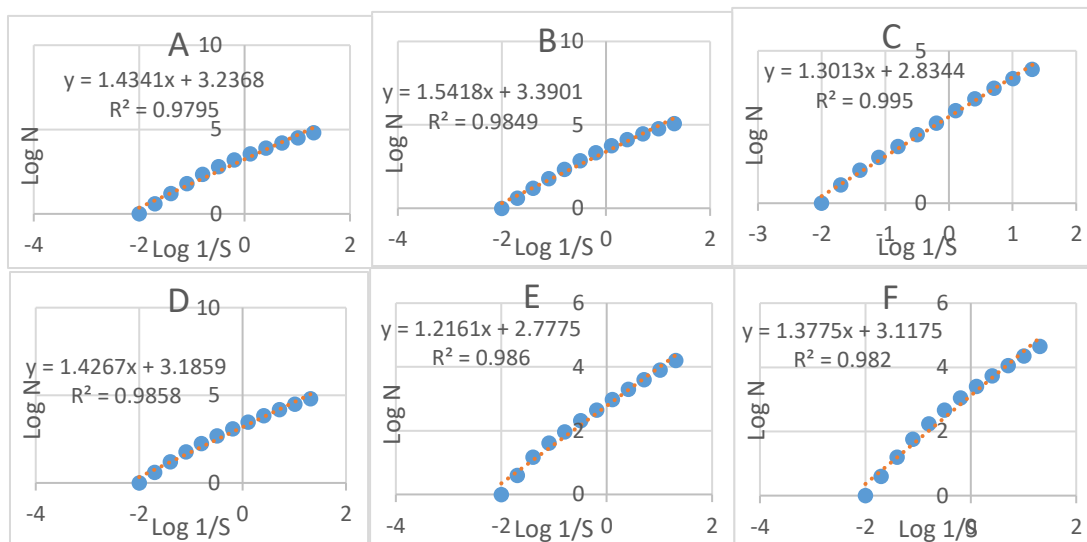
جدول ۱. تعداد خانه‌های (Number) حاوی خطوط گسلی (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) و رومکز زمین‌لرزه با و بدون احتساب بزرگای کمال

(Mc) (از ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰) در هر سطح شبکه پوشش داده شده روی مناطق مطالعاتی A-F

طول شبکه پدیده	۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۲/۵۰	۶/۲۵	۳/۱۲	۱/۵۶	۰/۷۸	۰/۳۹	۰/۲۰	۰/۱۰	۰/۰۵	A
۱	۴	۱۶	۶۳	۲۲۱	۶۳۳	۱۵۷۱	۳۶۶۸	۷۸۴۵	۱۵۹۸۵	۳۱۸۶۷	۶۳۴۴۴		
۱	۴	۱۶	۵۶	۱۳۶	۲۶۳	۴۰۲	۵۰۸	۵۴۲	۵۶۰	۵۶۸	۵۶۸		
۱	۴	۱۶	۵۶	۱۳۲	۲۵۷	۳۸۲	۴۷۴	۵۰۳	۵۱۸	۵۲۶	۵۲۶		
۱	۴	۱۶	۵۹	۲۱۵	۷۲۷	۲۱۷۹	۵۷۴۰	۱۳۴۷۷	۲۹۱۳۲	۵۹۳۵۵	۱۱۸۹۰۳		
۱	۴	۱۶	۴۹	۸۸	۱۱۲	۱۲۱	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵	-	-		
۱	۴	۱۶	۴۹	۸۷	۱۱۰	۱۱۹	۱۲۳	۱۲۳	۱۲۳	-	-		
۱	۴	۱۲	۳۲	۷۳	۱۷۶	۴۲۳	۱۰۹۴	۲۶۵۵	۵۹۱۲	۱۲۲۳۸	۲۴۴۶		
۱	۴	۱۶	۵۸	۱۲۵	۱۷۳	۱۹۴	۲۰۲	۲۰۲	۲۰۲	-	-		
۱	۴	۱۶	۵۷	۱۲۲	۱۶۷	۱۸۷	۱۹۵	۱۹۵	۱۹۵	-	-		
۱	۴	۱۶	۵۸	۱۷۷	۴۸۲	۱۲۱۷	۲۹۴۲	۶۸۱۴	۱۴۸۲۹	۳۰۵۵۸	۶۱۷۹۱		
۱	۴	۱۶	۶۰	۱۵۱	۲۳۳	۳۱۴	۳۶۸	۳۷۸	۳۷۹	۳۷۹	-		

-	-	۳۵۶	۳۵۶	۳۴۸	۳۰۰	۲۲۲	۱۴۵	۶۶	۱۶	۴	۱	رومکز با Mc
۱۵۸۴۲	۷۹۶۳	۴۰۰۹	۱۹۹۳	۹۵۷	۴۴۹	۲۰۶	۹۲	۴۱	۱۵	۴	۱	گسل
-	۹۲۵	۹۲۲	۹۱۷	۹۰۸	۷۸۱	۵۰۰	۲۲۱	۶۴	۱۶	۴	۱	رومکز بی Mc
۸۹۷	۸۹۷	۸۹۴	۸۸۹	۸۸۰	۷۵۶	۴۹۰	۲۲۰	۶۴	۱۶	۴	۱	رومکز با Mc
۴۴۸۱۱۲	۲۲۴۹۶	۱۱۲۸۶	۵۴۳۳	۲۵۳۱	۱۱۱۸	۴۶۸	۱۷۲	۵۸	۱۶	۴	۱	گسل
-	۵۸۲	۵۸۲	۵۸۱	۵۷۴	۵۴۲	۴۲۱	۲۰۶	۶۴	۱۶	۴	۱	رومکز بی Mc
-	۵۶۲	۵۶۲	۵۶۱	۵۵۴	۵۲۳	۴۰۹	۲۰۴	۶۴	۱۶	۴	۱	رومکز با Mc

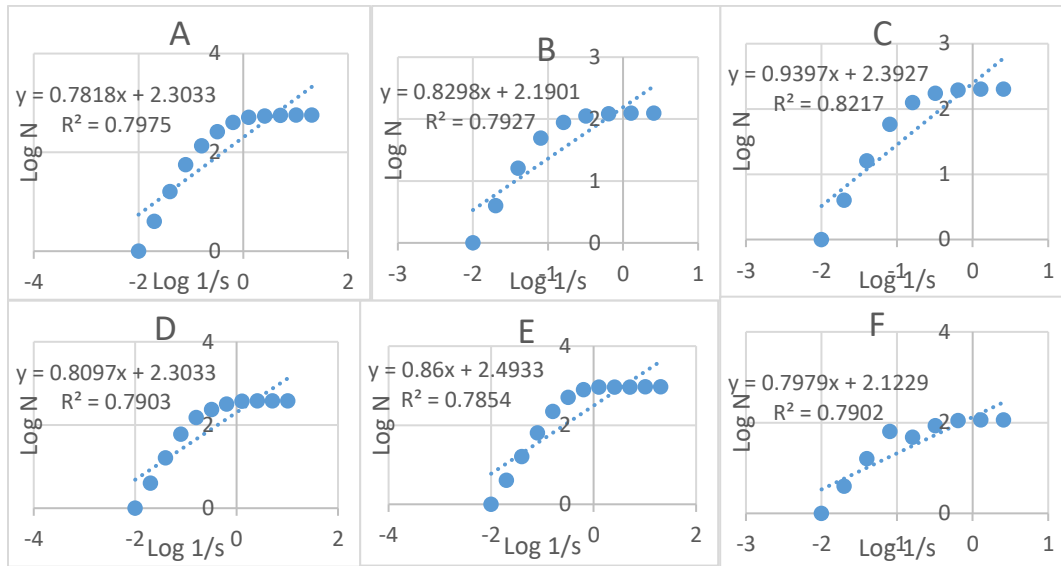
در مرحله بعد طبق روش شمارش جعبه‌ای (دیاگرام پژوهش: شکل ۴)، طول شبکه (سطر اول در جدول ۲ که برای داده‌های گسلی و لرزه‌ای یکسان در نظر گرفته شده است) به صورت معکوس ($1/S$) تبدیل شد و مقادیر لگاریتمی آن و نیز مقادیر لگاریتمی تعداد شبکه‌های حاوی عارضه (Number) (سطور دوم تا چهارم در جدول ۲) برای محاسبه بعد فرکتالی به دست آمد. شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نمودارهای به دست آمده برای ابعاد فرکتالی کلی داده‌های جدول ۲ را نشان می‌دهد. بعد جزئی فرکتالی نیز با محاسبات رابطه ۲ (دیاگرام پژوهش شکل ۴) به دست می‌آید و بر اساس کمیت کلی بعد فرکتال (ضرایب X در شکل‌های ۶، ۷ و ۸) نقاطی که بعد آن‌ها بزرگتر از این مقادیر باشد، خارج از نظم متناظر هستند (جامعه زمینه^۱)، جامعه دوم با بعد بزرگتر از این مقدار، جامعه آستانه^۲ است و موید پیدایش یک جامعه متناظر با کمینه تغییرات بعد فرکتالی و نشانگر کاهش آشفستگی و افزایش خواص فرکتال است. برای گسل‌ها جامعه زمینه بین ۲ تا ۱/۴۴ را در برمی‌گیرد و جامعه آستانه بین ۰/۹۹ تا ۱ است که یک جامعه فرکتالی با تکرار مؤلفه‌ها است. در مورد رومکز زمین‌لرزه‌ها ارقام بعد فرکتالی قبل و بعد از بزرگای کمال به استثنای محدوده D مشابه هستند. در این محدوده بعد فرکتالی پس از محاسبه بزرگای کمال کاهش می‌یابد. جامعه زمینه بین ۲ تا ۰/۸۳ متغییر است. بالاترین مربوط به D و پایین‌ترین مربوط به B می‌باشد. جامعه آستانه نیز به سمت صفر میل می‌کند.



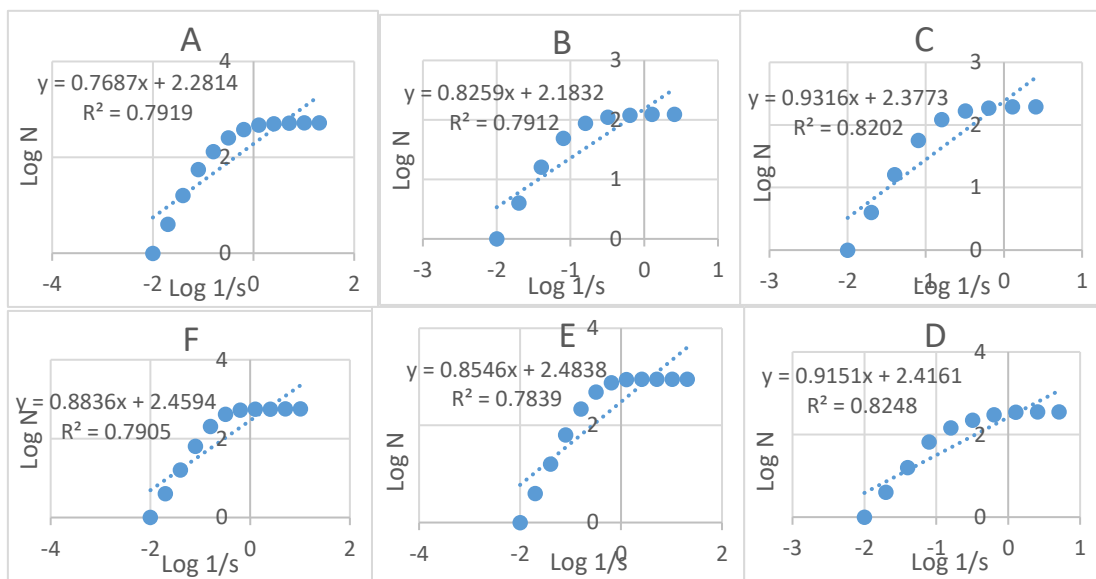
شکل ۶. نمودار Log/Log معکوس طول ضلع و تعداد خانه‌های حاوی گسل

^۱ Background population

^۲ Thershold population



شکل ۷. نمودار Log-Log معکوس طول ضلع شبکه و تعداد خانه‌های حاوی رومرکز زمین لرزه (۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰) بدون بزرگای کمال



شکل ۸. نمودار Log-Log معکوس طول ضلع شبکه و تعداد خانه‌های حاوی رومرکز زمین لرزه (۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰) با احتساب بزرگای کمال

در این تحقیق محدوده A در غرب کرمانشاه، عمدتاً در زاگرس چین‌خورده واقع شده است، محدوده‌های B، D، F به ترتیب از شمال به جنوب در امتداد شکستگی اصلی زاگرس قرار گرفته‌اند. محدوده B شمال‌ترین قطعه است و بین دو گسل اصلی و گسل زاگرس مرتفع قرار دارد. محدوده D به طور مساوی بین دو زون چین‌خورده و رورانده واقع است. منطقه F، یعنی جنوبی‌ترین بخش و منطقه پیوند گسل‌های اصلی زاگرس و گسل جبهه کوهستان زاگرس است و قسمتی از زون ایذه را در بر دارد. منطقه C یعنی حاشیه غربی درجات پایین‌تری از تراکم گسل و فراوانی زمین‌لرزه را دارا است و انتهای غربی آن بخشی از گسل جبهه کوهستان است. منطقه E نیز در شمال در مسیر گسل بالارود قرار

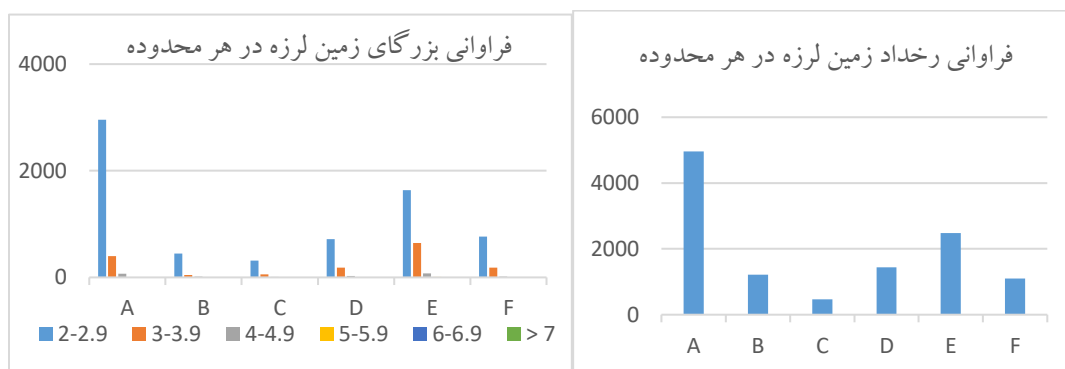
دارد و در جنوب مشرف بر فروافتادگی دزفول است. این قسمت نیز تراکم گسل به نسبت پایینی را نشان می‌دهد. جدول ۲ نتایج ابعاد فرکتالی کلی مربوط به داده‌های مختلف مورد استفاده در فرایند تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۲. ابعاد فرکتالی داده‌های مختلف مورد استفاده در تحقیق به تفکیک هر محدوده

داده چهارچوب	گسل ۱:۱۰۰۰۰۰	گسل ۱:۲۵۰۰۰۰	رومرکز سده ۲۰ بدون بزرگای کمال	رومرکز سده ۲۰ با بزرگای کمال	رومرکز ۱۹۰۰-۲۰۲۰ بی بزرگای کمال	رومرکز ۱۹۰۰-۲۰۲۰ بی بزرگای کمال
A	۱/۴۳۴۱	۱/۳۲۳۱	۱/۰۱۹۲	۱/۰۷۴۸	۰/۷۸۱۸	۰/۷۶۸۷
B	۱/۵۴۱۸	۱/۳۵۱۱	۰/۹۶۶۹	۰/۷۶۰۵	۰/۸۲۹۸	۰/۸۲۵۹
C	۱/۳۰۱۳	۱/۲۳۲۸	۰/۷۴۰۷	۰/۷۰۴۶	۰/۹۳۹۷	۰/۹۳۱۶
D	۱/۴۲۶۷	۱/۲۷۴۲	۰/۹۳۴۴	۰/۸۵۴۳	۰/۸۰۹۷	۰/۹۵۵۱
E	۱/۲۱۶۱	۱/۰۷	۰/۹۱۷۴	۱/۰۲۱۶	۰/۸۶	۰/۸۵۴۶
F	۱/۳۷۷۵	۱/۲۵۵۳	۰/۸۸۸۷	۰/۸۶۵۶	۰/۸۹۰۳	۰/۸۸۳۶

همانطور که از جدول ۲ قابل مشاهده است در بررسی گسل‌های منطقه ترتیب ابعاد فرکتالی در هر دو مقیاس نقشه‌های مورد استفاده مشابه است با این تفاوت که در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ محدوده A و در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ محدوده B دارای بالاترین بعد فرکتالی گسل است. نقشه‌های زمین‌شناسی این بخش (B) توسط سازمان زمین‌شناسی و با جزئیات بالای گسل و شکستگی و محدوده مجاور آن (A) توسط شرکت نفت تهیه شده است و این امر تفاوتی را در تراکم گسل‌ها ایجاد نموده است. صرف‌نظر از این دو محدوده، سایر محدوده‌ها به ترتیب بعد فرکتالی مقادیر بالا به پایین D، C، F، E هستند که به عبارتی بیانگر ترتیب فعال بودن آن‌ها از نظر مؤلفه‌های فرکتالی گسلی است. نتایج این دو مقیاس از نظر فعالیت گسل را می‌توان با نتایج ابعاد فرکتالی زمین‌لرزه‌ها مقایسه نمود. پارامتر D به عنوان یک اندازه‌گیری کمی از درجه عدم یکنواختی فعالیت لرزه‌ای برای سیستم‌های گسلی استفاده می‌شود و زمانی که زمین‌لرزه‌ها به طور فزاینده‌ای خوشه‌بندی می‌شوند، مقدار آن کاهش پیدا می‌کند. افزایش بعد فرکتالی بیانگر توزیع یکنواخت کانون زمین‌لرزه‌ها در سراسر یک منطقه و زمین‌ساخت فعال آن است (Öncel & Wilson, ۲۰۰۲: ۳۳۹). در مورد زمین‌لرزه‌ها همانطور که مشاهده می‌شود، فعال‌ترین محدوده (بالاترین بعد فرکتالی رومرکز) و آرام‌ترین محدوده (پایین‌ترین بعد فرکتالی رومرکز) در دو سری داده (سده بیستم و از ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰) کاملاً عکس یکدیگر هستند به این صورت که در بررسی زمین‌لرزه‌های از ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰ با و بدون در نظر گرفتن بزرگای کمال، فعال‌ترین منطقه C و آرام‌ترین منطقه A است که در بررسی زمین‌لرزه‌های سده بیستم این نتایج کاملاً تغییر می‌کنند و معکوس می‌شوند. این در حالی است که محدوده C به استثنای بخش جنوب شرقی تراکم گسل بسیار کمی را دارا است و در هر دو داده زمین‌لرزه‌های آن تراکم کمتری دارند، در حالی که محدوده A هم از نظر تراکم گسل در هر دو مقیاس مورد مطالعه و هم از نظر تراکم زمین‌لرزه و بزرگای زمین‌لرزه جزو فعالترین مناطق در گستره مورد مطالعه است. نتایج بررسی رومرکز زمین‌لرزه‌های سده بیست در هر دو روش با احتساب بزرگای کمال و بدون در نظر گرفتن آن، فعال‌ترین محدوده‌ها را A، E و D نشان می‌دهد. با مقایسه بعد فرکتالی گسل‌ها و زمین‌لرزه‌ها دو منطقه B و E از نظر تراکم گسل و زمین‌لرزه در نقطه مقابل یکدیگر قرار دارند. محدوده B تراکم بالای گسل و پایین زمین‌لرزه را دارا است و همچنین بزرگای زمین‌لرزه‌های

آن کوچکتر هستند در حالی که محدوده E تراکم پایین تری از گسل و شکستگی را نشان می‌دهد در حالی که تراکم و بزرگای رومرکز زمین‌لرزه‌های آن بالا است (که این امر را می‌توان با گسل‌های پنهان در این منطقه توجیه نمود که مسبب زمین‌لرزه‌های بسیاری بوده‌اند) (شکل ۹). می‌توان چنین تحلیل نمود که در هر مقیاس مورد استفاده، در صورتی که داده‌ها بصورت یکدست و دقیق و کامل ثبت شوند، نتایج ابعاد فرکتالی مقیاس‌های مختلف نقشه بایستی در تأیید یکدیگر باشند. همچنین هر چه داده‌های لرزه‌ای کامل‌تر باشند و از یک مقیاس برای ثبت آن‌ها استفاده شده باشد نتایج به واقعیت نزدیکتر و در تأیید نتایج قبل خواهد بود.



شکل ۹. تراکم و بزرگای رومرکز زمین‌لرزه‌ها در محدوده‌های مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور بررسی کارایی روش فرکتال در بررسی زمین‌ساخت زاگرس شمال غرب به مقایسه و آزمون یکسان بودن نتایج ابعاد فرکتالی در گسل‌های مقیاس‌های مختلف نقشه‌های زمین‌شناسی (۱:۲۵۰۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰۰۰) و زمین‌لرزه‌های با طول دوره، جزئیات و دقت‌های مختلف بزرگا مربوط به ارگان‌های مختلف (کانون سطحی زمین‌لرزه از ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله با و بدون احتساب بزرگای کمال، کانون سطحی زمین‌لرزه سده بیستم مؤسسه ژئوفیزیک با و بدون احتساب بزرگای کمال) از روش مربع‌شمار استفاده و بعد فرکتال (D) موارد ذکر شده مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج این تحقیق را می‌توان به شرح زیر ارائه نمود:

- تنها تفاوتی که سبب تغییر اولویت مناطق فعال شده در دو مقیاس گسلی مورد استفاده شده است، تفاوت در ثبت جزئیات گسل‌ها و شکستگی‌های ارگان‌های تهیه‌کننده آن‌ها (شرکت نفت و سازمان زمین‌شناسی) است. به عنوان مثال در نقشه‌های ۲۵۰ هزار، امتداد گسل در نقشه کرمانشاه (سازمان زمین‌شناسی) با ورود به ورق کوه‌دشت (شرکت نفت) قطع می‌شود و در نقشه‌های ۱۰۰ هزار نیز این موارد قابل مشاهده است. با این وجود گسل‌های منطقه در هر دو مقیاس، ابعادی فرکتالی دارند و فعال‌ترین منطقه از نظر گسلی، در مقیاس ۲۵۰ هزار محدوده A (غرب کرمانشاه در زاگرس چین‌خورده) و در مقیاس ۱۰۰ هزار محدوده B در همان راستا (محدوده پیرامون کرمانشاه در زاگرس شکسته) است؛
- در مورد داده‌های لرزه‌ای نتایج داده‌های ۱۹۰۰ تا کنون که از جزئیات کمتر و مقیاس مختلف ثبت بزرگا برخوردارند، تطبیقی با واقعیت نشان نمی‌دهند به صورتی که محدوده C (دارای تراکم پایین گسل و زمین‌لرزه) در اولویت اول و محدوده A (با تراکم بالای گسل و زمین‌لرزه) در آخر قرار گرفته است. این در حالی است که می‌توان به نتایج ابعاد فرکتالی زمین‌لرزه‌های سده ۲۰ که از نظر دقت و مقیاس ثبت یکسان

هستند، اعتماد نمود. در این داده‌ها نتایج ابعاد فرکتالی با و بدون احتساب بزرگای کمال فعال‌ترین منطقه را محدود A نشان می‌دهد. که با داده‌های گسلی دقیق‌تر مورد استفاده در تحقیق (مقیاس ۱۰۰ هزار) انطباق دارد؛

۳. می‌توان نتیجه گرفت که نه مقیاس (زیرا نتایج ابعاد فرکتالی در مقیاس‌های مختلف مشابه بوده است) بلکه دقت و یکدستی ثبت داده‌های گسلی و لرزه‌ای است که نتایج محاسبه بعد فرکتالی را تحت تأثیر قرار خواهد داد، بنابراین استفاده از داده دقیق‌تر به دستبازی به نتایج صحیح‌تر کمک خواهد نمود.

سیاسگزاری

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. بدین وسیله از حمایت این صندوق تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- آقابات، سید علی. ۱۳۸۳. زمین‌شناسی/ایران. چاپ اول. انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران.
- بیت‌الهی، علی؛ پانته‌آ معتمد. ۱۳۸۹. محاسبه پارامترهای لرزه‌خیزی برای منطقه البرز مرکزی. پژوهشنامه زلزله‌شناسی، ۱۳: ۸-۱.
- درویش‌زاده، علی. ۱۳۷۰. زمین‌شناسی/ایران. چاپ اول. نشر دانش امروز (وابسته به انتشارات امیرکبیر)، تهران.
- فانجی، محمد؛ محمد محجل و محمد مهدی خطیب. ۱۳۹۰. تحلیل فرکتالی گسل‌ها و ارتباط آن‌ها با زمین‌لرزه‌ها در پهنه برش پانه‌ای شکل گسل دهشیر. پژوهش‌های دانش زمین، ۴: ۳۶-۴۵.
- کرم، امیر. ۱۳۸۹. نظریه آشوب، فرکتال و سیستم‌های غیر خطی در ژئومورفولوژی. فصلنامه جغرافیای طبیعی، ۳: ۸۲-۶۷.
- میرعابدینی، مریم‌سادات؛ مریم‌آقی‌آتابای و عزیز رحیمی چاکدل. ۱۳۹۰. بررسی خصوصیات فرکتالی زمانی زمین‌لرزه‌های ناحیه بلده (البرز مرکزی). سی‌امین‌گردهمایی علوم زمین، ۱ تا ۳ اسفند ۹۰، وزارت صنعت معدن و تجارت، سازمان زمین‌شناسی، ۱-۷.

Angeles, G., G. Perillo and J. Pierini. ۲۰۰۴. Fractal analysis of tidal channels in the Bahía Blanca Estuary (Argentina). *Geomorphology*, ۵۷: ۲۶۳-۲۷۴. DOI ۱۰,۱۰۱۶/S۰۱۶۹-۵۵۵X(۰۳)۰۱۰۶-۵.

Baas, A.C.W. ۲۰۰۲. Chaos, Fractals and Self-Organization in Coastal Geomorphology: Simulating Dune Landscapes in Vegetated Environments. *Geomorphology*, ۴۸: ۳۰۹-۳۲۸. DOI ۱۰,۱۰۱۶/S۰۱۶۹-۵۵۵X(۰۲)۰۱۸۷-۳

Berberian, M. ۱۹۹۵. Masterblind thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*, ۲۴۱: ۱۹۳-۲۲۴. DOI ۱۰,۱۰۱۶/۰۰۴۰-۱۹۵۱(۹۴)۰۱۸۵-C

Bhattacharya, P., B.K. Chakrabarti and Kamal. ۲۰۱۱. A fractal model of earthquake occurrence: Theory, simulations and comparisons with the aftershock data. *Journal of Physics: Conference Series*, ۳۱۹: ۱-۳۷. DOI ۱۰,۱۰۸۸/۱۷۴۲-۶۵۹۶/۳۱۹/۱/۰۱۲۰۰۴

Blanc, E. J. P., M. B. Allen, S. Inger, and H. Hassani. ۲۰۰۲. Structural styles in the Zagros simple folded zone, Iran. *Journal of the Geological Society (London)*, ۱۶۰: ۴۰۱-۴۱۲. DOI ۱۰,۱۱۴۴/۰۰۱۶-۷۶۴۹۰۲-۱۱۰

Bodri, B. ۱۹۹۳. A fractal model for seismicity at Izu-Tokai region, central Japan. *Earth Sciences*, ۱: ۵۳۹-۵۴۶. DOI ۱۰,۱۱۴۲/S۰۲۱۸۳۴۸X۹۳۰۰۵۶۳

Hessami, K., H.A. Koyi, and C.J. Talbot. ۲۰۰۱. The significance of strike-slip faulting in the basement of the Zagros fold and thrust belt. *Journal of petroleum Geology*, ۲۴: ۵-۲۸. DOI ۱۰,۱۱۱۱/j.۱۷۴۷-۵۴۵۷,۲۰۰۱.tb۰۰۶۵۹.x

- Hirata, T. ۱۹۸۹. Fractal dimension of fault systems in Japan: Fractal structure in rock fracture geometry at various scales. *pure and applied geophysics*, ۱۳۱: ۱۵۷-۱۷۰. DOI ۱۰,۱۰۰۷/BF۰۰۸۷۴۴۸۵
- Hui, C., C. Cheng, L. Ning, and J. Yang. ۲۰۲۰. Multifractal Characteristics of Seismogenic Systems and b Values in the Taiwan Seismic Region. *International Journal of Geo-Information*, ۹: ۱-۱۵. DOI ۱۰,۳۳۹۰/ijgi۹۰۶۰۳۸۴
- Jackson, J., and D. Mckenzie. ۱۹۸۴. Active tectonics of the Alpine-Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, ۷۷: ۱۸۵-۲۶۴. DOI ۱۰,۱۱۱۱/j.۱۳۶۵-۲۴۶۶X.۱۹۸۴.tb۰۱۹۳۱.x
- Lei, X., and K. Kusunose. ۱۹۹۹. Fractal structure and characteristic scale in the distributions of earthquake epicentres, active faults and rivers in Japan. *Geophysical Journal International*, ۳۹: ۷۵۴-۷۶۲. DOI ۱۰,۱۰۴۶/j.۱۳۶۵-۲۴۶۶X.۱۹۹۹,۰۰۹۷۷.X
- Mandelbrot, B.B. ۱۹۸۲. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman and Company, New York..
- Masoudi, P., Y. Asgarinezhad, and B. Tokhmechi. ۲۰۱۵. Feature selection for reservoir characterisation by Bayesian network. *Arabian Journal of Geosciences*, ۸: ۳۰۳۱-۳۰۴۳. DOI ۱۰,۱۰۰۷/s۱۲۵۱۷-۰۱۴-۱۳۶۱-۷.
- Mirzaei, N., M. Gao, and Y.T. Chen. ۱۹۹۷. Seismicity in major seismotectonic provinces of Iran. *Earthquake Research in China*, ۴: ۱۶-۲۶.
- Öncel, A.O., and T. Wilson. ۲۰۰۲. Space-time correlations of seismotectonic parameter and examples from Japan and Turkey preceding the izmit earthquake. *Bulletin Seismological Society of America*, ۹۲: ۳۳۹-۳۵۰. DOI ۱۰,۱۷۸۵/۰۱۲۰۰۰۰۸۴۴
- Ozturk, S. ۲۰۱۲. Statistical correlation between b-value and fractal dimension regarding Turkish epicentre distribution. *Earth science research*, ۱۶: ۱۰۳-۱۰۸.
- Pailoplee, S., and M. Choowong. ۲۰۱۴. Earthquake frequency-magnitude distribution and fractal dimension in mainland Southeast Asia. *Earth Planet and Space*, ۶۶: ۱-۱۰. DOI ۱۰,۱۱۸۶/۱۸۸۰-۵۹۸۱-۶۶-۸
- Richardson, L.F. ۱۹۶۱. The problem of contiguity: An Appendix to Statistics of Deadly Quarrels. *General System Yearbook*, ۶: ۱۳۹-۱۸۷.
- Rodriguez-Iturbe, I., and A. Rinaldo. ۱۹۹۷. *Fractal River Basin (Chance and Self-Organization)*. Cambridge University Press, Cambridge. DOI ۱۰,۱۰۶۳/۱,۸۸۲۳۰۵
- Schuller, D.J., A.R. Rao and G.D. Jeong. ۲۰۰۱. Fractal characteristics of dense stream networks. *Journal of Hydrology*, ۲۴۳: ۱-۱۶. DOI ۱۰,۱۰۱۶/S۰۰۲۲-۱۶۹۴(۰۰)۰۰۳۹۵-۴
- Schwartz, D., and K. J. Coopersmith. ۱۹۸۴. Fault Behavior and Characteristic Earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Faults, *Journal of Geophysics Research*. ۸۹: ۵۶۸۱-۵۶۹۸. DOI ۱۰,۱۰۲۹/JB۰۸۹iB۰۷p۰۵۶۸۱
- Setyawan, B., and B. Sapiie. ۲۰۱۹. Correlation between the fractal of aftershock spatial distribution and active fault on Sumatra. *Natural hazards and earth system sciences*, ۱۹(۱۱). DOI ۱۰,۵۱۹۴/nhess-۲۰۱۹-۲۱۵
- Strogatz, S.H. ۱۹۹۴. *Nonlinear Dynamics and Chaos*. Perseus Books publication, New York.
- SukMono, S., M. T. Zen, W. G. A. Kadir, L. Hendrajaya, D. Santoso, and J. Dubios. ۱۹۹۶. Fractal Geometry of the Sumatra Active Fault System and its Geodynamical Implications. *Journal of Geodynamic*, ۲۲: ۱-۹. DOI ۱۰,۱۰۱۶/۰۲۶۴-۳۷۰۷(۹۶)۰۰۱۵-۴
- Turcotte, D. L. ۱۹۸۶. Fractals and Fragmentation. *Geophysics Research*, ۹۱: ۱۹۲۱-۱۹۲۶. DOI ۱۰,۱۰۲۹/JB۰۹۱iB۰۲p۰۱۹۲۱
- Turcotte, D.L. ۱۹۷۷. *Fractal and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge. DOI ۱۰,۱۰۱۷/CBO۹۷۸۱۱۳۹۱۷۴۶۹۵
- Vernant, P., F. Nilforushan, D. Hatzfeld, M. Abassi, C. Vigney, F. Mason, H. Nankali, J. Martinod, M. Ashtiany, R. Bayer, F. Tavakoli, and J. Chery. ۲۰۰۴. Present day crustal deformation and plate kinematics in Middle East constrained by GPS measurements in Iran and north Oman. *Geophysical Journal International*, ۱۵۷: ۳۸۱-۳۹۸. DOI ۱۰,۱۱۱۱/j.۱۳۶۵-۲۴۶۶X.۲۰۰۴,۰۲۲۲۲.X

Wiemer, S., and M. Wyss. ۲۰۰۰. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, ۹۰: ۸۵۹-۸۶۹. DOI ۱۰.۱۷۸۵/۰۱۱۹۹۹۰۱۱۴.