

ارزیابی همبستگی آماری و مکانی بین پارامترهای لرزه‌خیزی و بی‌هنجاری بوگه در ایران

سید ناصر هاشمی^{*}

^۱استادیار زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۰)

چکیده

در این تحقیق، همبستگی آماری و مکانی بین متغیرهای معرف بی‌هنجاری گرانی بوگه و پارامترهای لرزه‌خیزی در گستره ایران مورد ارزیابی قرار گرفته است. به این منظور، داده‌های بی‌هنجاری بوگه و لرزه‌خیزی این گستره در بازه زمانی ۱۹۷۵-۲۰۲۱، بررسی شده است. در این راستا، ابتدا ناحیه مورد مطالعه به چهارگوش‌هایی با ابعاد ۰/۵ در ۰/۵ درجه جغرافیایی تقسیم بندی شده و سپس متغیرهای معرف لرزه‌خیزی و بی‌هنجاری بوگه برای هر سلول محاسبه شد. با استفاده از نرم افزارهای آماری، ضریب همبستگی پیرسون بین این متغیرها تعیین شده و سپس مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. همچنین، نقشه‌های معرف الگوی توزیع مکانی این متغیرها تهیه شده است. در ادامه، نمودارهای واریوگرام برای هر متغیر ترسیم شده و این نمودارها مورد تحلیل و تفسیر قرار گرفت. با تفسیر نمودارهای واریوگرام، ارتباط و همبستگی مکانی این متغیرها مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس یافته‌های این تحقیق می‌توان چنین گفت که همبستگی قابل توجه و معنادار مشاهده شده بین متغیر بیشینه تغییرات بی‌هنجاری بوگه و متغیرهای معرف لرزه‌خیزی، بخصوص متغیرهای مرتبط با فراوانی رخداد زلزله‌ها، نشان می‌دهد تغییرات بی‌هنجاری گرانی بوگه می‌تواند از عوامل مؤثر بر رخداد زلزله‌ها در این گستره به شمار آید. همچنین، می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که نیروهای گرانی و بخصوص نیروهای ناشی از عدم تعادل ایزوستازی، می‌توانند نقش مهمی در رخداد زلزله‌های این گستره، ایفا نمایند.

کلمه‌های کلیدی: لرزه زمین ساخت؛ تحلیل مکانی؛ پارامترهای لرزه‌خیزی؛ بی‌هنجاری‌های گرانی؛ همبستگی مکانی

۱ مقدمه

فلات ایران به دلیل جایگاه زمین شناختی و زمین ساختی آن از لرزه خیز ترین نواحی کره زمین محسوب می شود. این فلات از ناهمواری توپوگرافی زیادی برخوردار است که با وجود رشته کوه هایی عظیم مانند زاگرس و البرز، تغییرات بی هنجاری های گرانی و ایزوستازی در این گستره بسیار مشهود است. محققان زیادی به مطالعه تغییرات بی هنجاری های گرانی در گستره ایران پرداخته اند و برخی نیز به ارتباط بین این بی هنجاری ها و فعالیت لرزه خیزی در این ناحیه اشاره نموده اند (بن ونوتی و کاپوتو، ۱۹۸۲؛ دهقانی و ماکریس، ۱۹۸۳؛ زمانی و هاشمی، ۲۰۰۰؛ خان و کاکرابوتب، ۲۰۰۷؛ جیمزمنانت و همکاران، ۲۰۱۲؛ بورا و همکاران، ۲۰۱۸). بی هنجاری گرانی بوگه با انجام تصحیحات لازم بر روی اندازه گیری های به عمل آمده به طور مستقیم از ایستگاه های زمینی، بدست می آید و به خوبی تغییرات ناحیه ای چگالی درون زمین را به تصویر می کشد (ملیک و همکاران، ۲۰۱۲). این بی هنجاری همچنین می تواند به وضوح تغییرات ضخامت پوسته در نواحی مختلف را نشان دهد، به گونه ای که نواحی با ضخامت پوسته ای زیاد با بی هنجاری بوگه منفی و نواحی با ضخامت پوسته ای کم، بی هنجاری بوگه مثبت از خود نشان می دهند. این ویژگی ژئوفیزیکی می تواند در مقیاس های ناحیه ای برای ارزیابی تغییرات عمقی ویژگی های زمین شناختی مورد استفاده قرار گیرد. تحقیقات صورت گرفته گویای این واقعیت است که نقش گسل های بزرگ مقیاس پی سنگی در تغییرات بی هنجاری های گرانی و بویژه بی هنجاری بوگه، انکارناپذیر است. جاکوبی و اسمیلد (۲۰۰۹) مفاهیم پایه و اساسی در گرانی سنجی و تفسیر بی هنجاری های گرانی را به تفصیل ارائه داده اند.

در این مقاله کوشش شده است ضمن بررسی تغییرات مکانی بی هنجاری گرانی بوگه و پارامترهای معرف لرزه خیزی در گستره ایران، ارتباط بین این دو دسته متغیرها،

هم با استفاده از روش های ساده آماری کلاسیک و هم با استفاده از روش زمین آماری تحلیل واریوگرام ها، مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

عوامل و نیروهای بسیاری در رخداد زلزله و لرزه خیزی یک ناحیه مؤثر است. اگرچه اعتقاد بر آن است که عمده نیروهای دخیل در فرایند لرزه خیزی نواحی فعال کره زمین از زمین ساخت صفحه ای و حرکت صفحات زمین ساختی ناشی می شوند، لیکن بی هنجاری های گرانی، عدم تعادل گرانی و ایزوستازی در یک ناحیه می تواند باعث یک سری حرکات عمودی شود که می تواند در رخداد زلزله مؤثر واقع شود. پیرامون این موضوع سؤالات فراوانی ذهن محققان را به خود مشغول داشته است که از جمله می توان به این موارد اشاره نمود: آیا بین لرزه خیزی و رخداد زلزله ها و وضعیت بی هنجاری های گرانی در نواحی فعال لرزه خیز کره زمین ارتباطی وجود دارد؟ آیا تغییرات شدید و ناگهانی بی هنجاری های گرانی و از جمله بی هنجاری بوگه می تواند نشان از وجود گسل های پی سنگی پنهان باشد و آیا لرزه خیزی ناشی از آنها قابل تشخیص است؟

در دهه های اخیر، محققان زیادی به بررسی و مطالعه الگوی تغییرات مکانی بی هنجاری های گرانی و ارتباط این بی هنجاری ها با عوامل ساختاری بزرگ مقیاس ناحیه ای و از جمله با لرزه خیزی نواحی مختلف دنیا پرداخته اند. مکنزی (۱۹۷۲) با بررسی توزیع مکانی رومرکز زلزله ها، اشاره ای کوتاه به ارتباط بین وضعیت توپوگرافی و لرزه خیزی در گستره ایران نموده است. جیمزمنانت و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی سه بعدی ساختار سنگ کره و تحلیل داده های بی هنجاری گرانی بوگه در ناحیه برخوردی اوراسیا - عربی پرداختند و تغییرات ضخامت پوسته در این ناحیه را بر اساس این داده ها مورد بررسی قرار دادند. کاپوتو و همکاران (۱۹۸۴، ۱۹۸۵) با مدل سازی و شبیه سازی تنش های افقی حاصل از تغییرات توپوگرافی و عدم تعادل ایزوستازی در ناحیه آبنین (ایتالیا)، و تأثیر آن در

باعث ایجاد بی‌هنجاری گرانی شود. به همین دلیل، در مواردی که گسل‌ها پنهان باشند و آثاری از گسیختگی سطحی آنها در سطح مشاهده نشود، مطالعه تغییرات بی‌هنجاری گرانی می‌تواند منجر به تشخیص و حتی در مواردی تعیین ویژگی‌های گسل‌های پنهان شود. به همین جهت، تحلیل داده‌های گرانی و تفسیر و مدل‌سازی آنها در شناخت ساختار پوسته و کشف ساختارهای زیر سطحی بزرگ مقیاس، از جمله گسل‌های پی‌سنگی، اهمیت زیادی دارد. در این راستا و در بررسی ارتباط بین گسلش و تغییرات بی‌هنجاری‌های گرانشی در سال‌های اخیر مطالعات فراوانی صورت گرفته است. عبدالرحمان و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از روش‌های آماری به مدل‌سازی داده‌های گرانی به منظور تخمین عمق و زاویه شیب گسل‌های مدفون از دیدگاه تئوری پرداختند که نتایج ایشان، همخوانی خوبی با داده‌های گرانی در ناحیه مصر به عنوان نمونه، نشان داد. همچنین، گوش و همکاران (۲۰۱۵) و گوش (۲۰۱۹) نیز به کمک تفسیر داده‌های بی‌هنجاری گرانی به شناسایی مکان گسل‌های رانده در شمال شرق هند و نواحی اطراف پرداختند که نتایج ایشان نیز حاکی از قابلیت بالای تحلیل داده‌های گرانی در کشف و شناخت گسل‌ها است.

در رابطه با پیشینه مطالعات مرتبط با این تحقیق، زمانی و هاشمی (۲۰۰۰) با استفاده از روش‌های آماری دومتغیره کلاسیک به ارزیابی همبستگی بین توپوگرافی، بی‌هنجاری‌های گرانی و لرزه‌خیزی در ایران پرداختند و با تفکیک گستره ایران به سلول‌هایی با ابعاد ۱ در ۱ درجه جغرافیایی، ارتباط بین متغیرهای مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند و چنین نتیجه گرفتند که در این گستره ارتباط معناداری بین پارامترهای لرزه‌خیزی و توپوگرافی و بی‌هنجاری‌های گرانی وجود دارد. در این تحقیق، که می‌توان آن را ادامه کار زمانی و هاشمی (۲۰۰۰) دانست، کوشش شده است ضمن استفاده از جدیدترین داده‌های لرزه‌خیزی ایران، و

افزایش تنش برشی بیشینه ناحیه (بوژه برای اعماق کمتر از ۵ کیلومتر)، نشان دادند که بزرگترین زلزله‌های رخ داده در ناحیه به مناطقی اختصاص می‌یابد که دارای بیشترین تنش برشی و همچنین بیشترین گرادیان بی‌هنجاری گرانی هستند. این یافته می‌تواند مؤید نقش ایزوستازی و تغییرات توپوگرافی در رخداد زلزله و فعالیت لرزه‌خیزی باشد. ژان و همکاران (۲۰۱۱) اذعان کردند که قبل از رخداد زلزله‌های بزرگ در چین و در حد فاصل زمان ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۵ تغییرات قابل ملاحظه‌ای در میدان گرانی مناطق اطراف رومکز زلزله‌ها مشاهده شده است و بالا بودن بی‌هنجاری بوگه در مناطق با فعالیت لرزه‌خیزی شدید توسط برخی محققان از جمله، پامو کچو و همکاران (۲۰۲۱) گزارش شده است. همچنین، توینگ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی ارتباط بین بی‌هنجاری گرانی و لرزه‌خیزی در ناحیه بالای پرداختند. سرکاری نژاد و همکاران (۲۰۱۳) ارتباط بین لرزه‌خیزی و بی‌هنجاری‌های گرانی در ناحیه زاگرس را با استفاده از روش‌های زمین‌آماري مورد مطالعه قرار دادند. استفاده از روش‌های زمین‌آماري از جمله روش مدل‌سازی واریوگرام‌ها برای تحلیل تغییرات مکانی متغیرهای ناحیه‌ای بسیار معمول بوده است و محققان بسیاری برای بررسی نحوه تغییرپذیری مکانی متغیر بی‌هنجاری‌های گرانی در مقیاس‌های مختلف از این روش کمک گرفته‌اند (نوروس و همکاران، ۱۹۹۷؛ هاشمی و کولیوند، ۱۳۹۷). هاشمی و عسکری (۱۳۹۱) با استفاده از مدل‌سازی واریوگرام‌ها، ناهمسانگردی الگوی توزیع بی‌هنجاری‌های گرانی بوگه در زاگرس را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که روند ناهمسانگردی این متغیر به خوبی با راستای غالب گسل‌های بزرگ مقیاس این ناحیه تطابق نشان می‌دهد و ارتباط بین گسل‌خوردگی ناحیه و توزیع بی‌هنجاری‌های گرانی بوگه مشهود است.

عملکرد گسل‌ها، بوژه گسل‌های بزرگ مقیاسی که جابجایی قائم قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌کنند، می‌تواند

ایران) به همراه مهمترین پهنه های ساختاری ایران نشان داده شده است. گستره ایران از نظر ویژگی های زمین ساختی و لرزه خیزی یکنواخت نیست. مهمترین پهنه های ساختاری و لرزه زمین ساختی ایران عبارتند از: زاگرس، البرز، شرق مرکز ایران، کپه داغ و مکران (شکل (۱)).

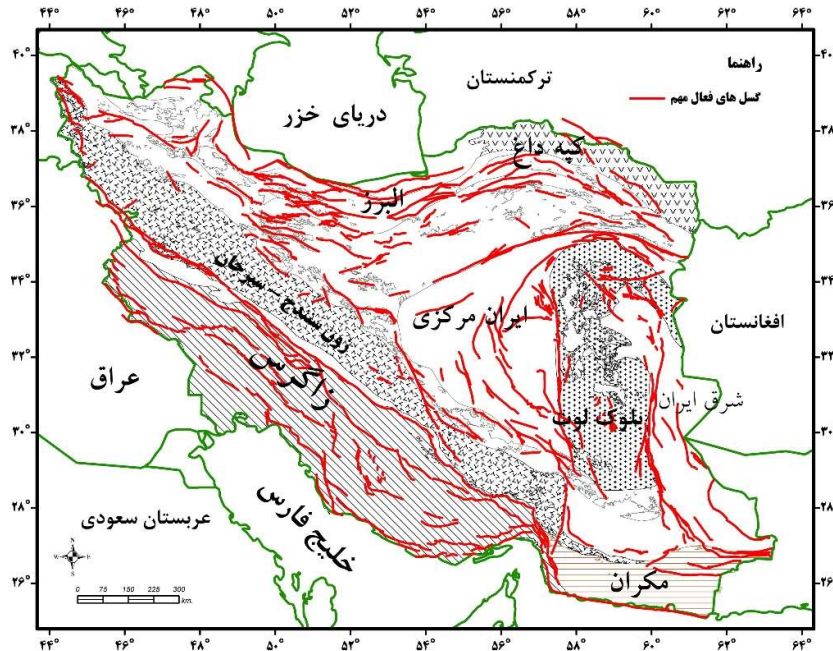
هر یک از این پهنه ها دارای ویژگی های خاص و منحصر بفرد خود از دیدگاه زمین ساختی، لرزه خیزی و ساختار پوسته ای هستند که باعث شده رفتار لرزه زمین ساختی آنها کاملاً از هم متمایز گردد. با وجود این تمایز آشکار، با توجه به حجم کلی داده های موجود، امکان بدست آوردن نتایج معنادار و قابل اعتماد از بررسی هر یک از این پهنه ها به صورت مجزا وجود ندارد و به همین دلیل تصمیم گرفته شد در این تحقیق کل گستره ایران (شکل (۱))، به عنوان یک ناحیه واحد در این بررسی آماری و زمین آماری مطالعه شود.

ناهمواری های ایران که به شکل رشته کوه های معروفی مانند زاگرس، البرز و کپه داغ قابل مشاهده هستند (شکل (۱))، حاصل دگرشکلی طولانی مدت این ناحیه بوده و تحت اثر فرایندهای زمین ساختی، ایزوستازی و فرسایش، شکل گرفته است. این گستره همچنین با فعالیت گسل های فعال بسیاری همراه است که حاصل فعالیت آنها رخداد زلزله های بزرگی است که باعث شده است ایران یکی از لرزه خیزترین نواحی دنیا محسوب شود. گسل های فعال واقع در گستره ایران دارای ویژگی های هندسی و سازوکارهای متفاوتی هستند. اغلب این گسل های فعال و لرزه زا دارای سازوکاری فشاری همراه با مؤلفه ی امتدادلغزی هستند (حسامی و همکاران، ۲۰۰۳).

همچنین داده های دقیق گرانی این ناحیه، با تفکیک گستره ایران به سلول های کوچکتر (با ابعاد ۰/۵ در ۰/۵ درجه جغرافیایی) و همچنین استفاده از روش های تحلیل مکانی، ارزیابی دقیق تری از ارتباط بین لرزه خیزی و بی‌هنجاری های گرانی در ایران، صورت گیرد.

۲ زمین ساخت و لرزه خیزی ایران

فلات ایران با توجه به موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی خود، در طول تاریخ زمین شناسی شاهد وقایع زمین ساختی متعددی بوده است که حاصل آن ناهمواری های شاخص این گستره به همراه لرزه خیزی و گسلش فعال قابل توجه آن است. این فلات به عنوان بخشی از کمربند لرزه ای آلپ- هیمالیا، از غرب اروپا شروع شده و تا جنوب شرق آسیا امتداد دارد (اشتوکلین، ۱۹۶۸؛ مکنزی، ۱۹۷۸). فلات ایران در محل برخورد صفحه های عربی، هند و اوراسیا واقع شده است. تنش های وارد شده به پوسته ایران در نتیجه تلاقی این صفحه هاست که باعث شده است این فلات مستعد رخداد زلزله های بزرگی باشد. با وجود لرزه-خیز بودن کل پهنه ی ایران، بخش های مختلف این پهنه، ویژگی های لرزه خیزی متفاوتی دارند و با توجه به جایگاه زمین-ساختی آنها از رفتار لرزه ای مشابهی برخوردار نیستند. دگرشکلی های رخ داده در این گستره را می توان به همگرایی دو صفحه عربی و اوراسیا مرتبط دانست که بر اساس بررسی های به عمل آمده بر مبنای داده های GPS نرخ همگرایی این دو صفحه زمین ساختی در طول جغرافیایی ۵۰ درجه شرقی، حدود ۲۱ میلی متر در سال است که به سمت شرق این همگرایی افزایش می یابد (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴). در شکل (۱) محدوده مورد مطالعه در این تحقیق (گستره



شکل ۱. نقشه ساختاری و زمین ساختی گستره ایران که در آن پهنه های مختلف ساختاری ایران نمایش داده شده است (برگرفته همراه با تغییرات از اشتوکلین (۱۹۶۸) و بربریان (۱۹۷۶). اطلاعات گسل ها از حسامی و همکاران (۲۰۰۳) اقتباس شده است).

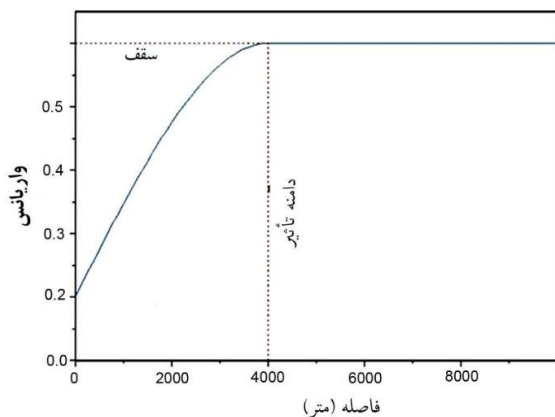
۳ مبانی نظری و روش تحقیق

در بسیاری از تحقیقات و پژوهش ها با مجموعه ای از متغیرها مواجه هستیم و برای ما یافتن ارتباط بین این متغیرها مهم و تعیین کننده است. در آمار کلاسیک، بدون در نظر گرفتن موقعیت مکانی و زمانی نقاط داده ای، به بررسی ارتباط بین دو یا چند متغیر پرداخته می شود. همبستگی بین متغیرها ممکن است دلیلی بر آن باشد که فرایندهایی یکسان آن متغیرها را کنترل می کنند. بسته به هدف از تحقیق، روش های متعددی برای بررسی ارتباط بین متغیرها توسط محققان ارائه شده است. در بین این روش ها، تحلیل همبستگی بین متغیرها از ساده ترین و پرکاربردترین روش ها در بررسی ارتباط بین متغیرها محسوب می شود. کمیت های مختلفی تحت عنوان ضریب همبستگی بین متغیرها در آمار کلاسیک معرفی شده است. ضریب همبستگی پیرسون معروف ترین ضریب در تعیین همبستگی بین دو متغیر کمی است. نحوه محاسبه این ضریب و همچنین اعتبارسنجی آن

در بسیاری از کتب مرجع آمار کلاسیک و زمین آمار به تفصیل آمده است (سوان و سانیدلندز، ۱۹۹۵؛ دیویس، ۲۰۰۲). کمیت ضریب همبستگی پیرسون وابسته به مقیاس داده ها نیست و دامنه تغییرات متغیرها چندان اثری بر این کمیت ندارد. از این جهت به خوبی می تواند در بررسی و تحلیل ارتباط بین متغیرها مورد استفاده قرار گیرد. مقدار ضریب همبستگی پیرسون بین ۱- و ۱ تغییر می کند. وقتی این مقدار به صفر نزدیک شود بدین معنی است که ارتباط معناداری بین دو متغیر مورد مطالعه وجود ندارد. از طرف دیگر هرچه مقدار قدر مطلق این ضریب به عدد یک نزدیکتر شود بدین معنی است که ارتباط قوی تری بین متغیرهای مورد مطالعه وجود دارد. مقادیر مثبت این ضریب ارتباط مستقیم و مقادیر منفی آن ارتباط معکوس بین متغیرها را نشان می دهد.

در تحقیقات آماری ضرورت دارد بررسی همبستگی و ارتباط آماری بین متغیرها با دقت و لحاظ نمودن معیارهای

استفاده در این تحقیق و همچنین بررسی شباهت بین آنها استفاده شده است. شکل کلی این نمودارها (شکل (۲)) چنین است که با افزایش فاصله گام، میزان واریانس متغیرهای مکانی افزایش می یابد و تا فاصله مشخصی (دامنه تأثیر) این افزایش واریانس ادامه می یابد. اما، از این فاصله به بعد، با افزایش فاصله گام، تغییری در واریانس متغیر دیده نمی شود و مقدار واریانس به حد سقف خود و یا اشباع شدگی می رسد. معمولاً در تفسیر نمودار واریوگرام از میزان شیب بخش اول نمودار می توان به میزان تغییرپذیری مکانی متغیر مورد نظر دست یافت و همچنین فاصله محدوده تغییرات، که از آن فاصله به بعد واریانس ثابت می ماند، نیز در تفسیر این نمودار کلیدی و مهم است. برای تشریح و مدل سازی رفتار واریوگرام ها، معمولاً سه مؤلفه مورد استفاده قرار می گیرد: دامنه تأثیر (Range)، حد آستانه یا سقف (Sill) و اثر قطعه ای (Nugget Effect). در شکل (۲)، نمونه ای از یک نمودار واریوگرام و اجزای آن نمایش داده شده است.



شکل ۲. نمونه ای از یک نمودار واریوگرام و اجزای تشکیل دهنده آن.

۴ داده ها

داده های مورد استفاده در این تحقیق شامل دو بخش است: بخش اول داده های مرتبط با بی هنجاری گرانی بوگه است

علمی صورت گیرد. معمولاً حجم داده ها و نوع آنها در تفسیر ضرایب همبستگی بین متغیرها باید لحاظ شود و از این جهت ضرایب همبستگی لازم است اعتبار سنجی شوند. از سوی دیگر، وقتی که داده ها از نوع مکانی باشند، روش های آمار کلاسیک به تنهایی نمی توانند رابطه دقیق بین متغیرها را به تصویر بکشند. در این موارد لازم است از روش های زمین آماری که موقعیت مکانی داده ها را نیز در تحلیل ها دخالت می دهند، استفاده شود. یکی از راه های موثر در شناخت تغییر پذیری مکانی متغیرها در علوم زمین و یافتن الگوی تغییرات مکانی این استفاده از روش های زمین آماری و به ویژه روش تحلیل واریوگرام است. واریوگرام یکی از مفیدترین ابزارهای زمین آماری در راستای نیل به این هدف می باشد که امکان تحلیل و تفسیر ساختار، مقیاس و شدت تغییرات مکانی متغیرهای ناحیه ای را فراهم می سازد (خسروی و اسمعیلی، ۱۳۹۴). از آنجا که در مطالعات علوم زمین، بسیاری از متغیرها تغییرات مکانی وابسته به جهت دارند، لذا می توان از بررسی و مقایسه واریوگرام های تهیه شده در جهات مختلف برای مطالعه الگوی جهتی تغییرات متغیرها استفاده نمود (دوچیچ، ۲۰۰۲). نمودار واریوگرام تغییرات واریانس یک متغیر ناحیه ای نسبت به فاصله گام را طبق معادله زیر نمایش می دهد:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(u_{(i)+h}) - Z(u_{(i)})]^2 \quad (1)$$

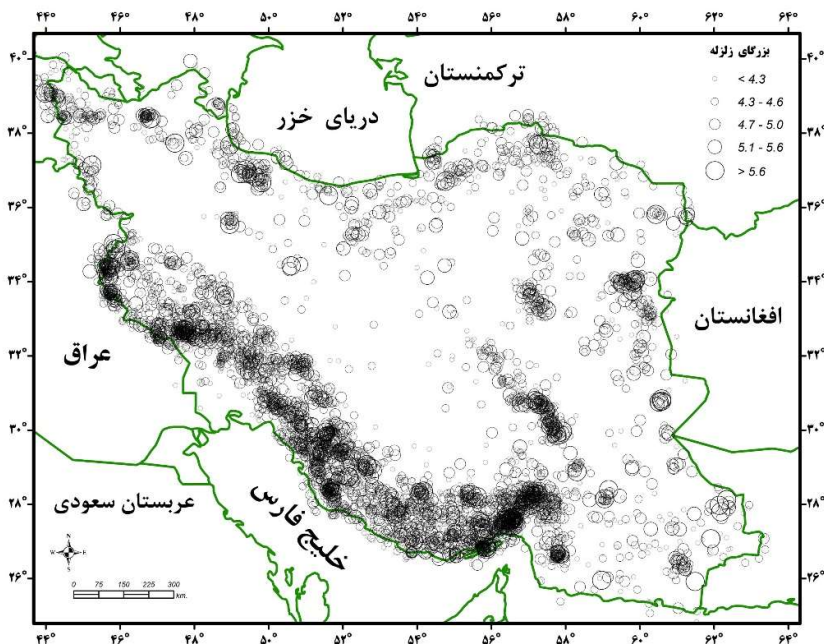
که در فرمول (۱) $\gamma(h)$ مقدار واریانس، $N(h)$ تعداد جفت داده هایی که در جدایش فاصله ای h برای محاسبه واریانس مورد استفاده قرار گرفته است، و $Z(u)$ نیز مقادیر متغیر ناحیه ای مورد مطالعه در موقعیت مکانی u است (وبستر و الیور، ۲۰۰۷). متغیرهای ناحیه ای بر حسب شدت و نحوه تغییرات مکانی مقادیر آنها، الگوهای متفاوتی از این نمودار را نشان می دهند. در این مقاله از نمودارهای واریوگرام برای ارزیابی نحوه تغییرپذیری متغیرهای مورد

از ۴/۰) را شامل می‌شود. اگرچه داده‌های دقیق‌تری از لرزه‌خیزی ایران (به ویژه از نظر بزرگ‌ها)، از پایگاه‌های داده‌های ملی، قابل دریافت است، لیکن به منظور رعایت همگنی زمانی و مکانی کاتالوگ داده‌ای مورد استفاده، افزایش بازه‌ی زمانی کاتالوگ داده‌ای، و همچنین امکان حذف زلزله‌های کوچک‌تر، تصمیم گرفته شد در این تحقیق از داده‌های بازبینی شده‌ی پایگاه داده‌ای ISC (با بازه‌ی زمانی بیش از ۴۶ سال) استفاده شود. نقشه توزیع رومرکز این زلزله‌ها نیز در شکل (۴) نمایش داده شده است.

که از برداشت‌های زمینی و بر روی تعداد ۸۱۷۶ ایستگاه (با دقت ۵ میلی‌گال) برداشت شده و از سازمان نقشه برداری کشور دریافت شده است. موقعیت مکانی این ایستگاه‌ها در ایران در شکل (۳) نشان داده شده است. توزیع مکانی این ایستگاه‌ها به خوبی کل‌گستره را پوشش می‌دهد و می‌تواند تصویر قابل قبولی از تغییر مکانی بی‌هنجاری در کل ایران را به ما بدهد. بخش دوم داده‌ها مرتبط با لرزه‌خیزی ایران است که شامل زلزله‌های رخ داده در این گستره است که از پایگاه داده‌ای ISC, ISC (2022) و در بازه زمانی آغاز سال ۱۹۷۵ تا پایان ماه مارس سال ۲۰۲۱ (به تعداد ۵۸۹۰ زلزله با بزرگی مساوی و بیش



شکل ۳. نقشه موقعیت ایستگاه‌های برداشت زمینی داده‌های گرانی‌سنجی (منبع داده‌ها: سازمان نقشه‌برداری کشور).



شکل ۴. نقشه رومرکز زلزله‌های استفاده‌شده در این تحقیق در بازه زمانی ۲۰۲۱-۱۹۷۵ با بزرگای مساوی و بیش از ۴/۰ (منبع داده‌ها: پایگاه داده ISC).

ژئوفیزیکی را مهیا سازد. در این راستا، ۶ متغیر کمی (دو متغیر مرتبط با بی‌هنجاری گرانی بوگه و ۴ متغیر مرتبط با لرزه خیزی ناحیه) برای هر سلول و با لحاظ کردن فاصله بافری ۰/۲۵ درجه از هر سلول، محاسبه و ثبت شد.

متغیرهای معرف لرزه خیزی مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از:

- مقدار ضریب لرزه خیزی a از رابطه گوتنبرگ - ریشتر (AV)

- مقدار ضریب لرزه خیزی b از رابطه گوتنبرگ - ریشتر (BV)

- تعداد زلزله‌های رخ داده در محدوده چهارگوش با بزرگی مساوی و بیش از ۴/۵ (NE)

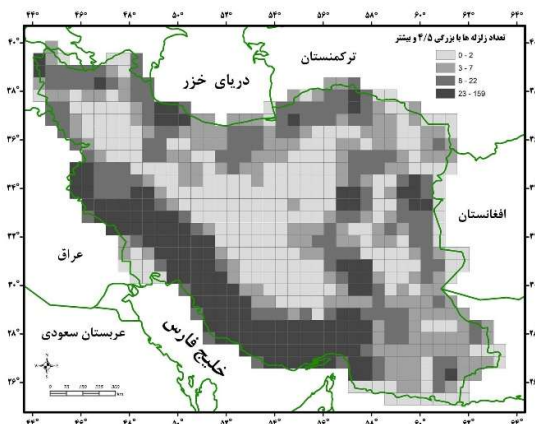
- بیشینه بزرگی زلزله‌های رخ داده در محدوده چهارگوش ها (MM)

همچنین، دو متغیر معرف بی‌هنجاری گرانی ناحیه ای بوگه نیز عبارتند از:

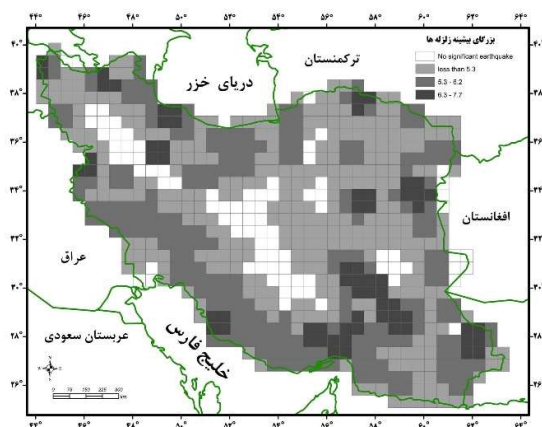
در این مقاله، با توجه به هدف تحقیق یعنی ارزیابی ارتباط بین لرزه خیزی و بی‌هنجاری گرانی بوگه در گستره ایران، و همچنین با توجه به اینکه برداشت مقادیر بی‌هنجاری‌های بوگه به صورت نقطه ای بوده و امکان تطبیق مکانی مستقیم با داده‌های لرزه خیزی را ندارند، تصمیم گرفته شد گستره مورد مطالعه به شبکه ای از ۶۸۲ چهارگوش (سلول) با ابعاد ۰/۵ در ۰/۵ درجه جغرافیایی تقسیم بندی شود. سپس، متغیرهای مورد نظر برای این مطالعه در محدوده این سلول‌ها محاسبه و تعیین شده و برای تحلیل‌های آماری و زمین آماری این مقادیر بدست آمده، به مرکز چهارگوش‌ها اختصاص داده شده است. این شیوه انجام تحقیق می‌تواند به طور قابل توجهی خطای عدم قطعیت مکانی زلزله‌ها و همچنین توزیع ناهمگن ایستگاه‌های برداشت زمینی داده‌های گرانی را کاهش داده و امکان ارزیابی دقیق تری از ارتباط بین این دو خصوصیت

گستره برخوردار است. در مجموع، نقشه‌های تهیه شده برای این متغیرها الگوهای نسبتاً مشابهی را نشان می‌دهند که می‌تواند نشان از همبستگی بالای این متغیرها باشد. از سوی دیگر، نقشه‌های ارائه شده در شکل (۶) نیز، مانند شکل (۵) و با همین رویکرد، توزیع مکانی بی‌هنجاری گرانی بوگه را در ایران نشان می‌دهد. نقشه الف در این شکل، میانگین این بی‌هنجاری را در محدوده تعریف شده برای سلول‌ها (با احتساب فاصله بافری ۰/۲۵ درجه‌ای) نشان می‌دهد و نقشه ب نیز حداکثر تغییرات این بی‌هنجاری در محدوده سلول‌ها را به نمایش می‌گذارد. نگاهی کلی به این دو نقشه و مقایسه آنها با نقشه‌های معرف توزیع لرزه‌خیزی در ایران نشان می‌دهد، شباهت قابل توجهی بین نقشه‌های توزیع بی‌هنجاری گرانی بوگه و نقشه‌های لرزه‌خیزی قابل مشاهده است. به طور خاص، این شباهت بین نقشه توزیع بیشینه بزرگای زلزله‌ها (شکل ۵ب)) و نقشه تغییرات بی‌هنجاری بوگه (شکل ۶ب)) واضح‌تر از سایر نقشه‌ها است. شباهت این الگوی توزیع مکانی متغیرها، خود می‌تواند دلیلی بر ارتباط و همبستگی بین متغیرها باشد. همچنین، مناطق با فعالیت لرزه‌خیزی بیشتر و بی‌هنجاری گرانی بوگه بالاتر، از نظر موقعیت مکانی همخوانی خوبی با موقعیت قرارگیری گسل‌های مهم ناحیه (شکل ۱)) نشان می‌دهند. از این جهت، مناطق

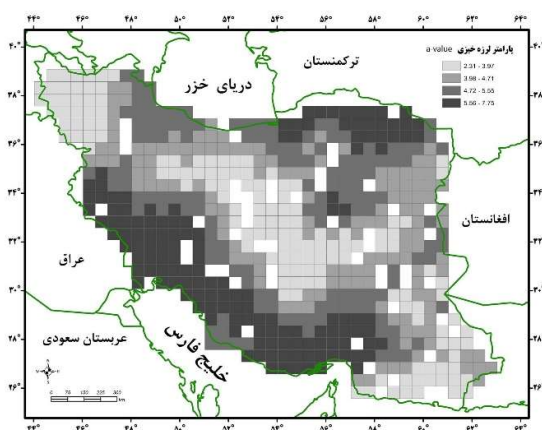
- متوسط بی‌هنجاری ناحیه‌ای بوگه در محدوده چهارگوش‌ها (AB) - تفاوت بیشینه و کمینه مقدار بی‌هنجاری ناحیه‌ای بوگه در محدوده چهارگوش‌ها (BR) - نقشه‌های توزیع مکانی این متغیرها در گستره ایران، در شکل‌های (۵) و (۶) نمایش داده شده است. در این تحقیق، از نرم‌افزار ArcGIS (10.8) برای نمایش نقشه‌ها و از نرم‌افزار Surfer (14.0) برای تهیه نمودارهای واریوگرام، کمک گرفته شده است. به منظور تهیه نقشه‌های توزیع مکانی متغیرها، ابتدا داده‌های لرزه‌خیزی هر چهارگوش با رعایت فاصله بافری ۰/۲۵ درجه‌ای از کاتالوگ داده‌ای جداسازی شده و سپس، با استفاده از نرم‌افزار Zmap پارامترهای لرزه‌خیزی a و b و سایر متغیرهای فوق‌برآورد شد. در نقشه‌های شکل (۵) توزیع مکانی متغیرهای مرتبط با لرزه‌خیزی ناحیه، با دسته‌بندی چهارگوش‌ها و با روش تقسیم‌بندی همگن چهارگوش‌ها (دسته‌های با تعداد اعضاء یکسان)، ارائه شده است. بر اساس این نقشه‌ها می‌توان مناطق با توان لرزه‌خیزی بالاتر را از نواحی با لرزه‌خیزی کمتر تفکیک نمود. بر این اساس مشاهده می‌شود، ناحیه زاگرس و البرز از لرزه‌خیزی بالاتری نسبت به سایر بخش‌های ایران برخوردارند و از طرف دیگر پهنه ایران مرکزی از لرزه‌خیزی کمتری در این



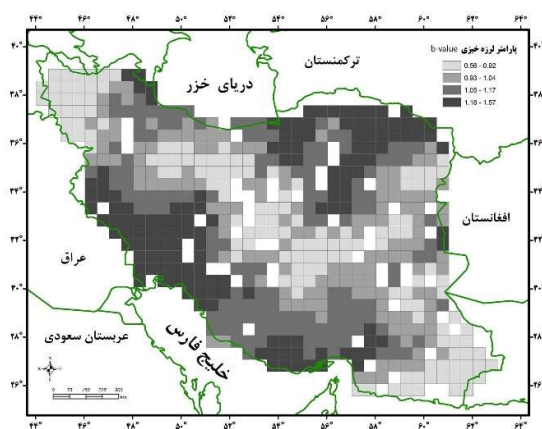
(الف)



(ب)

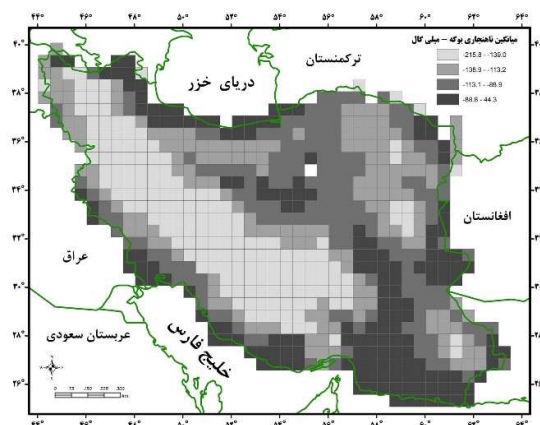


(ج)

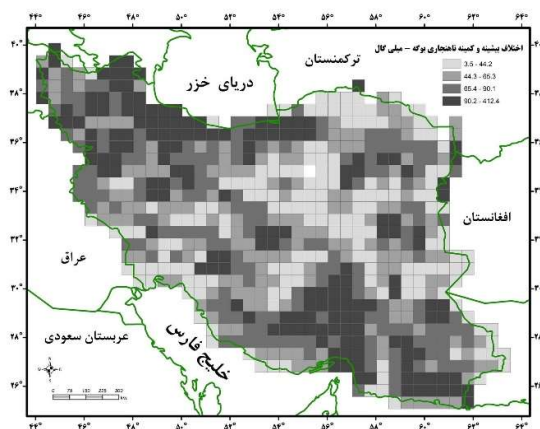


(د)

شکل ۵. نقشه‌های معرف الگوی توزیع مکانی چهار متغیر معرف لرزه‌خیزی در این تحقیق. الف) تعداد زلزله‌های رخ داده (NE) (ب) بیشینه بزرگای زلزله‌های رخ داده (MM) (ج) مقدار ضریب لرزه‌خیزی a از رابطه گوتنبرگ-ریشر (AV) (د) مقدار ضریب لرزه‌خیزی b از رابطه گوتنبرگ-ریشر (BV).



(الف)



(ب)

شکل ۶. نقشه‌های معرف الگوی توزیع مکانی دو متغیر معرف بی‌هنجاری بوگه در این تحقیق. (الف) متوسط بی‌هنجاری ناحیه‌ای بوگه (AB) (ب) تفاوت بیشینه و کمینه مقدار بی‌هنجاری ناحیه‌ای بوگه (BR).

بررسی شد. در جدول (۱) مقادیر ضرایب همبستگی پیرسون که بین ۶ متغیر مورد مطالعه در این تحقیق بدست آمده است، ارائه شده است. بر اساس تعداد نقاط داده ای (n=682)، حد بحرانی معناداری ضریب همبستگی پیرسون برای حد اطمینان ۹۹ درصد، به مقدار ۰/۱۴۶ تعیین می شود (سوان و ساندرلندز، ۱۹۹۵)، به این معنا که مقادیر بیشتر از ۰/۱۴۶+ و کمتر از ۰/۱۴۶- معنادار می باشند. در جدول (۱) مقادیر دارای اعتبار با علامت ستاره نمایش داده شده اند.

مقادیر ارائه شده در جدول (۱) نشان می دهد، متغیرهای معرف لرزه خیزی، دارای همبستگی مثبت معناداری هستند

با تغییرات بی‌هنجاری بوگه زیاد شاید نشانه ای از گسل های پنهان در این مناطق باشند که ممکن است از لرزه خیزی بالایی هم برخوردار باشند. موضوع عملکرد گسل های پنهان در گستره ایران و بویژه در ناحیه زاگرس قبلاً توسط برخی محققان از جمله بربریان (۱۹۹۵) مورد اشاره قرار گرفته است.

۵ تحلیل آماری و بحث

به منظور بررسی ارتباط آماری بین ۶ متغیر کمی مورد مطالعه در این تحقیق، مقادیر ضریب همبستگی پیرسون بین این متغیرها محاسبه گردید و درجه اعتبار این ضرایب نیز

نسبت به دو متغیر دیگر لرزه خیزی (یعنی BV و MM) به متغیرهای معرف بی هنجاری بوگه نشان می دهند. در بین دو متغیر معرف بی هنجاری گرانی بوگه نیز، متغیر BR با متغیرهای لرزه خیزی همبستگی بالاتری دارد.

بر اساس یافته های این بررسی آماری می توان چنین استدلال نمود که تغییر در مقدار بی هنجاری بوگه می تواند با لرزه خیزی ارتباط معناداری داشته باشد. شاید بتوان چنین گفت که تغییر در بی هنجاری گرانی، نیروهایی مؤثر بر رخداد زلزله ها را ایجاد می نماید. این ارتباط معنادار آماری، با متغیرهای نشان دهنده فراوانی رخداد زلزله ها (یعنی AV و NE) به طور قوی تری دیده می شود.

که با توجه به ماهیت مشابه این متغیرها، این نتیجه قابل انتظار است. دو متغیر معرف وضعیت بی هنجاری بوگه (AB, BR) تقریباً از هم مستقل بوده و همبستگی معناداری با هم ندارند. این دو متغیر با اکثر متغیرهای معرف لرزه خیزی همبستگی مثبت قابل توجه نشان می دهند.

متغیر میانگین بی هنجاری بوگه (AB) با ضرایب لرزه خیزی a و b از رابطه گوتنبرگ و ریشتر (BV, AV) همبستگی معنادار قابل توجهی نشان می دهد. متغیر حداکثر تغییرات بی هنجاری بوگه (BR) با متغیرهای معرف لرزه خیزی AV, BV, NE همبستگی مثبت قابل توجه و معناداری نشان می دهد. متغیرهای معرف فراوانی رخداد زلزله ها، یعنی دو متغیر AV و NE، همبستگی بالاتری

جدول ۱. ماتریس ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شده بین شش متغیر مورد مطالعه در این تحقیق.

متغیر	AV	BV	NE	MM	AB	BR
AV	۱/۰۰۰					
BV	* ۰/۹۷۶	۱/۰۰۰				
NE	* ۰/۴۳۲	* ۰/۳۱۰	۱/۰۰۰			
MM	* ۰/۳۳۱	* ۰/۲۷۰	* ۰/۴۵۶	۱/۰۰۰		
AB	* ۰/۲۹۱	* ۰/۲۷۲	* ۰/۰۳۲	* ۰/۰۸۶	۱/۰۰۰	
BR	* ۰/۳۶۵	* ۰/۲۶۰	* ۰/۳۱۲	* ۰/۱۳۱	* ۰/۰۸۱	۱/۰۰۰

* دارنده اعتبار در سطح احتمال ۰/۰۱

و محاسبه شد، با اختصاص این مقادیر به نقاط مرکزی چهار گوش ها، نمودار واریوگرام کلی (بدون دخالت دادن راستای تغییر پذیری) برای این نقاط که فاصله بندی ۰/۵ درجه ای، هم در جهت طول و هم در جهت عرض دارند، تهیه شد. این نمودارها به خوبی نحوه تغییر پذیری مکانی این متغیرها نسبت به طول گام (بر حسب کیلومتر)، را به ما نشان می دهند. در ادامه کوشش می شود با مقایسه نمودارهای واریوگرام تهیه شده، به ارزیابی شباهت و همبستگی بین متغیرها پرداخته شود.

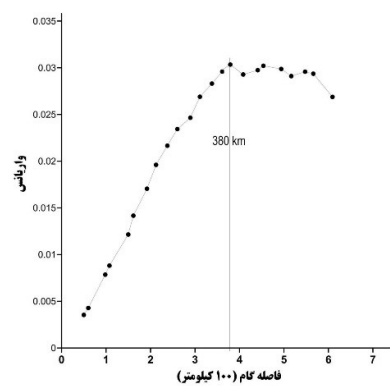
در شکل (۷)، چهار نمودار واریوگرام معرف نحوه تغییر پذیری متغیرهای مرتبط با لرزه خیزی نمایش داده شده

اگرچه تحلیل همبستگی آماری بین متغیرها به شیوه آمار کلاسیک و بر مبنای محاسبه ضریب همبستگی پیرسون می تواند دیدی کلی از نحوه ارتباط بین متغیرها را در اختیار ما قرار دهد، اما با توجه به اینکه متغیرهای مورد مطالعه در این تحقیق ماهیت مکانی دارند و تغییر پذیری مکانی آنها نیز باید در ارزیابی ارتباطی بین آنها مورد نظر قرار گیرد، لازم است از روش های زمین آماری برای تحلیل تغییر پذیری و ارتباط بین آنها کمک گرفته شود. در این راستا، برای هر کدام از ۶ متغیر مورد مطالعه، نمودار واریوگرام تهیه شد. به این منظور، پس از اینکه مقادیر متغیرهای مورد مطالعه برای هر یک از چهار گوش ها تعیین

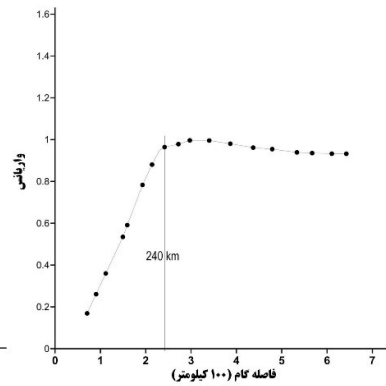
نمودار خاتمه می‌یابد و نمودار به حالت تقریباً افقی در می‌آید. در نمودارهای واریوگرام، این فاصله به عنوان دامنه تأثیر نشان داده شده است. از سوی دیگر شیب بخش اول نمودار واریوگرام (قبل از افقی شدن) نیز شدت تغییرپذیری متغیر مورد مطالعه را نشان می‌دهد. شیب بیشتر این بخش نشان دهنده تغییرپذیری مکانی بیشتر متغیر است.

بر همین اساس، دامنه تأثیر واریوگرام برای متغیرهای MM ، BV و AV نیز به ترتیب حدود ۳۸۰، ۲۴۵ و ۲۴۰ کیلومتر است. متغیر BV نسبت به سایر متغیرهای مرتبط با لرزه خیزی تفاوت فاحشی در دامنه تأثیر نشان می‌دهد که به وضوح در این نمودار دیده می‌شود.

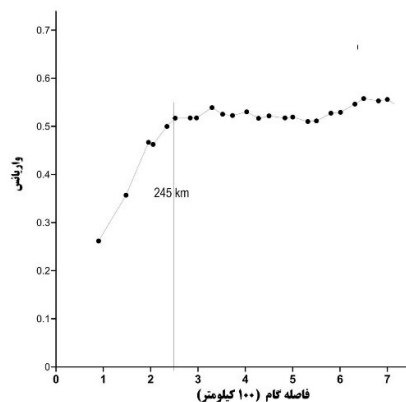
است. نگاهی کلی به این نمودارها نشان می‌دهد که در بین این چهار متغیر، متغیرهای AV و NE در فواصل کوتاه تری نسبت به دو متغیر دیگر، تغییرپذیری بالاتری را از خود نشان می‌دهند. دو متغیر دیگر MM و BV تا فواصل طولانی تری خودهمبستگی مکانی خود را حفظ می‌کنند و تغییرات مکانی بیشتری از خود نشان می‌دهند. بر همین اساس، به عنوان مثال متغیر NE حداکثر تا فاصله تقریبی ۲۰۰ کیلومتری، از خودهمبستگی قابل ملاحظه‌ای برخوردار است و در ورای این فاصله به نظر می‌رسد مقادیر این متغیر، همبستگی مکانی خاصی با هم ندارند. در تحلیل نمودار واریوگرام، این فاصله جایی تعیین می‌شود که شیب



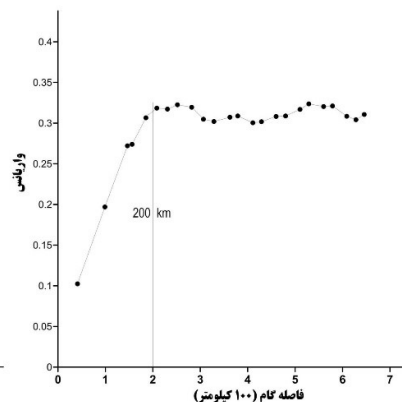
(ب)



(الف)

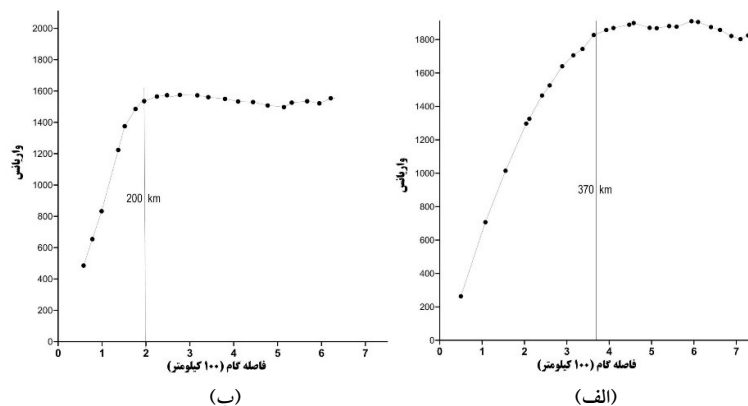


(د)



(ج)

شکل ۷. نمودارهای واریوگرام تهیه شده برای چهار متغیر معرف لرزه‌خیزی در این تحقیق. (الف) مقدار ضریب لرزه‌خیزی a از رابطه گوتنبرگ-ریشر (AV) (ب) مقدار ضریب لرزه‌خیزی b از رابطه گوتنبرگ-ریشر (BV) (ج) لگاریتم تعداد زلزله‌های رخ داده (NE) (د) بیشینه بزرگای زلزله‌های رخ داده (MM).



شکل ۸. نمودارهای واریوگرام تهیه شده برای دو متغیر معرف بی‌هنجاری بوگه در این تحقیق. (الف) متوسط بی‌هنجاری ناحیه‌ای بوگه (AB) (ب) تفاوت پیشینه و کمینه مقدار بی‌هنجاری ناحیه‌ای بوگه (BR).

و داده‌های لرزه‌خیزی دستگامی این گستره در بازه زمانی ۲۰۲۱-۱۹۷۵ در این تحلیل استفاده شده است. بی‌هنجاری گرانی بوگه می‌تواند نشان دهنده ناپایداری‌های گرانی در مقیاس‌های مختلف باشد و ممکن است نقشی مهم و اساسی در رخداد زلزله ایفا نماید.

برای انجام این تحقیق، ابتدا ناحیه مورد مطالعه (کل گستره ایران) به چهار گوش‌هایی با ابعاد ۰/۵ در ۰/۵ درجه جغرافیایی تقسیم بندی شده و سپس متغیرهای معرف لرزه‌خیزی و بی‌هنجاری گرانی بوگه برای هر سلول محاسبه شده است. در ادامه، ضریب همبستگی پیرسون بین این متغیرها تعیین و اعتبارسنجی شده است. همچنین، نقشه‌های معرف الگوی توزیع مکانی این متغیرها و نمودارهای واریوگرام برای هر متغیر تهیه شده و این نقشه‌ها و نمودارها مورد تحلیل و تفسیر قرار گرفته است. به طور خلاصه می‌توان نتایج حاصل از این تحقیق را چنین برشمرد:

- بطور کلی شباهت قابل توجه بین الگوی مکانی تغییرات این متغیرها، نشان از ارتباط معنادار بین بی‌هنجاری گرانی بوگه و لرزه‌خیزی در این ناحیه دارد. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شده بین متغیرها نیز گویای این واقعیت است. این مقادیر نشان می‌دهند، هر دو متغیر

در شکل (۸) دو نمودار واریوگرام معرف تغییرپذیری متغیرهای مرتبط با بی‌هنجاری گرانی بوگه نمایش داده شده است. نمودار واریوگرام مربوط به متغیر AB دارای دامنه تأثیر بیشتری (حدود ۳۷۰ کیلومتر) نسبت به متغیر BA (حدود ۲۰۰ کیلومتر) است. پس از مقایسه این نمودارها با نمودارهای واریوگرام مربوط به متغیرهای مرتبط با لرزه‌خیزی (شکل (۷))، می‌توان چنین نتیجه گرفت که متغیر AB شباهت نموداری بالایی با متغیر BV نشان می‌دهد، به این معنی که هر دو دارای دامنه تأثیر مشابه و نسبتاً زیادی هستند. از سوی دیگر، متغیر BA که معرف تغییرات بی‌هنجاری است، به خوبی با متغیرهای لرزه‌خیزی NE و AV شباهت نموداری قابل توجهی نشان می‌دهد که می‌تواند به معنای همبستگی بالای این متغیرها باشد.

۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله، تغییرپذیری مکانی و همبستگی بین متغیرهای معرف بی‌هنجاری گرانی بوگه و لرزه‌خیزی در گستره ایران مورد ارزیابی قرار گرفته است. به این منظور، از داده‌های برداشت زمینی بی‌هنجاری گرانی با دقت ۵ میلی‌گال

مانند هر تحقیق دیگری که مبتنی بر تحلیل داده‌ها باشد، نتایج این مطالعه نیز به دقت و صحت داده‌ها وابسته است. بخصوص در مورد داده‌های لرزه‌خیزی با توجه به بازه زمانی نسبتاً کوتاه داده‌های لرزه‌ای (در قیاس با فرایندهای طولانی مدت زمین‌شناختی)، نمی‌توان با اطمینان خاطر در خصوص نتایج حاصله اظهار نظر نمود. انتظار می‌رود با در دسترس قرار گرفتن داده‌های دقیق‌تر و قابل اعتمادتر، بتوان به ارزیابی دقیق‌تری از ارتباط بین این متغیرها، با روش بکار رفته در این تحقیق، پرداخت. به علاوه، با توجه به اینکه این تحقیق به بررسی ارتباط بین تغییرات لرزه‌خیزی و بی‌هنجاری بوگه در مقیاسی ناحیه‌ای و وسعت زیاد می‌پردازد، پیشنهاد می‌شود نتایج کلی این تحقیق در خصوص همبستگی معنادار تغییرات لرزه‌خیزی و بی‌هنجاری بوگه، در مقیاسی محلی و کوچکتر و با بررسی دقیق مکانی - زمانی داده‌ها، به ویژه با استفاده از داده‌های دقیق‌تر، مورد تحلیل و صحت‌سنجی قرار گیرد.

سپاس‌گزاری

نویسنده از سازمان نقشه برداری کشور به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های گرانی سنجی زمینی ایران، کمال تشکر و قدردانی را دارد. از داوران محترم مجله ژئوفیزیک ایران که نقطه نظر‌ها و پیشنهاد‌های ایشان باعث ارتقاء کیفی مقاله گردید، سپاس‌گزاری می‌شود. از حمایت‌های مادی و معنوی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه دامغان در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

خسروی، ی. اسمعیلی، ع. ۱۳۹۴، تحلیل فضایی داده‌های محیطی با زمین‌آمار. چاپ اول، انتشارات آذر کلک. هاشمی، ن.، کولیوند، ف.، ۱۳۹۷، تحلیل مکانی لرزه‌خیزی در ناحیه زاگرس با استفاده از مدل سازی واریوگرام. هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۰-۱۸

میانگین بی‌هنجاری گرانی بوگه و بیشینه تغییرات این بی‌هنجاری، با متغیرهای معرف لرزه‌خیزی بطور مثبت همبستگی قابل توجه نشان می‌دهند. این درجه همبستگی برای متغیر بیشینه تغییرات بی‌هنجاری بوگه، قوی‌تر است و به علاوه، متغیر بیشینه تغییرات بی‌هنجاری بوگه با متغیرهای لرزه‌خیزی مرتبط با فراوانی زلزله‌ها، همبستگی بیشتری نشان می‌دهد.

- نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که در بین متغیرهای معرف لرزه‌خیزی ناحیه، متغیر پارامتر لرزه‌خیزی b (از رابطه گوتنبرگ - ریشتر) تغییرپذیری مکانی بیشتری نسبت به سایر متغیرها داشته و تا فواصل زیادی خودهمبستگی مکانی بین مقادیر این متغیر، حفظ شده است. از طرف دیگر، دو متغیر فراوانی زلزله‌ها و بیشینه بزرگای زلزله‌ها، به همراه پارامتر لرزه‌خیزی a ، در فواصل کمتری خودهمبستگی مکانی دارند. نمودارهای واریوگرام تهیه شده برای دو متغیر معرف بی‌هنجاری بوگه نیز نشان می‌دهند هر دو این نمودارها شباهت قابل ملاحظه‌ای با نمودارهای معرف لرزه‌خیزی از خود نشان می‌دهند. این شباهت برای متغیر بیشینه تغییرات بی‌هنجاری بوگه واضح‌تر است. شباهت‌های قابل توجه نمودارهای واریوگرام، به همراه شباهت نقشه‌های توزیع مکانی این متغیرها، می‌تواند نشان دهنده ارتباط نزدیک بین این دو سری متغیر باشد.

- بر اساس یافته‌های این تحقیق می‌توان چنین گفت که همبستگی قابل توجه مشاهده شده بین متغیر بیشینه تغییرات بی‌هنجاری گرانی بوگه و متغیرهای معرف لرزه‌خیزی، بخصوص متغیرهای مرتبط با فراوانی رخداد زلزله‌ها، نشان می‌دهد تغییرات بی‌هنجاری گرانی بوگه می‌تواند از عوامل مؤثر بر رخداد زلزله‌ها در این گستره به شمار آید. می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که نیروهای گرانی و بخصوص نیروهای ناشی از عدم تعادل ایزوستازی، می‌توانند نقش مهمی در رخداد زلزله‌های این گستره و به ویژه فراوانی زلزله‌ها ایفا نمایند.

- Oxford.
- Ghosh, G.K., 2019. Interpretation of gravity anomaly to delineate thrust faults locations at the northeastern part of India and its adjacent areas using source edge detection technique, tilt derivative and $\text{Cos}(\theta)$ analysis. *Acta Geophysica*, 67, 1277–1295.
- Ghosh, G.K., Dasgupta, R., Reddy, B.J., Singh, S.N., 2015. Gravity data interpretation across the Brahmaputra Thrust and Dauki Fault in the north-Eastern India. *Journal of Geophysics*, 7(1):31–38.
- Hessami, K., Jamali, F., Tabasi, H., 2003. Major Active Faults map of Iran, Scale 1:2500000, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), 1 sheet.
- International Seismological Centre (2023), On-line Bulletin, <https://doi.org/10.31905/D808B830>
- Jacoby, W., Smilde, P.L., 2009. Gravity Interpretation: Fundamentals and Application of Gravity Inversion and Geological Interpretation. Springer, Berlin, 395 p.
- Jimenez-Munt, I., Fernandez, M., Saura, E., Verges, J. and Garcia-Castellanos, D., 2012. 3-D lithospheric structure and regional/residual Bouguer anomalies in the Arabia–Eurasia collision (Iran). *Geophys. J. Int.*, 190, 1311–1324.
- Khan, P.K., Chakraborty, P.P., 2007. The seismic b-value and its correlation with Bouguer gravity anomaly over the Shillong Plateau area: tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29, 136–147.
- Mallick, K., Vasanthi, A., Sharma, K.K., 2012. Bouguer gravity regional and residual separation: Application to geology and environment. 1th edn., Springer, New York.
- McKenzie, D.P., 1972. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 30, 109-185.
- McKenzie, D. P., 1987. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. *Geophysical*
- اردیبهشت ۱۳۹۷، دانشگاه تهران، تهران.
- هاشمی، س.ن.، عسکری، ل.، ۱۳۹۱، استفاده از روش زمین آماری تحلی واریوگرام ها در بررسی تغییرات مکانی ناهنجاری گرانشی بوگه در ناحیه زاگرس. شانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، ۱۴ تا ۱۶ شهریور ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شیراز، شیراز.
- Abdelrahman, E.M., El-Araby, H.M., El-Araby, T.M., Abo-Ezz, E.R., 2003. A least-squares derivatives analysis of gravity anomalies due to faulted thin slabs. *Geophysics*, 68: 535–543.
- Benvenuti, M. and Caputo, M., 1982. Pattern recognition of a gravity anomaly-seismicity relationship. *Atti Accad. Naz. Lincei*, 72(1): 360-372.
- Berberian, M., 1976. Contribution to the Seismotectonics of Iran (Part II). Geological Survey of Iran, Report No. 39, p. 517.
- Berberian, M., 1995, Master blind thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics, *Tectonophysics*, 241,193-224.
- Bora, D.K., Borah, K., Mahanta, R., Borgohain, J.M., 2018. Seismic b-values and its correlation with seismic moment and Bouguer gravity anomaly over Indo-Burma ranges of northeast India: Tectonic implications. *Tectonophysics*, 728-729, 130-141.
- Caputo, M., Milana, G. and Rayhorn, J., 1984. Topography and its isostatic compensation as a cause of seismicity of the Apennines. *Tectonophysics*, 102, 333-342.
- Caputo, M., Manzetti, V. and Nicelli, R., 1985. Topography and its isostatic compensation as a cause of seismicity: a revision. *Tectonophysics*, 111, 25-39.
- Davis, J.C., 2002. *Statistics and Data Analysis in Geology*, Third Edition. John Wiley and Sons, New York, 638 p.
- Dehghani, G.A. and Makris, J., 1983. The gravity field and crustal structure of Iran. Geological Survey of Iran, 51, 51-68.
- Deutsch, C.V., 2002. *Geostatistical Reservoir Modeling*, Oxford University Press,

- Journal of the Royal Astronomical Society, 55, 217-254.
- Noreus, J.P., Nyborg, M.R., Hayling, K.L., 1997. The gravity anomaly field in the Gulf of Bothnia spatially characterized from satellite altimetry and in situ measurements. *J. appl. Geophys.*, 37, 67-84.
- Pamukçu OA, Dođru F, Çirmik A, Göneş D., 2021. Seismic a and b-values and crustal parameters of Samos Island-Aegean Sea, Lesvos Island-Karaburun, Kos Island-Gökova Bay earthquakes. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30: 833-850, doi:10.3906/yer-2107-13
- Sarkarinejad, K., Mehdi Zadeh, R., Webster, R., 2013. Two-dimensional spatial analysis of the seismic b-value and the Bouguer gravity anomaly in the southeastern part of the Zagros Fold-and-Thrust Belt, Iran tectonic implications, *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, p.308-316.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52, 1229-1258.
- Swan, A.R.H., Sandilands, M., 1995. *Introduction to Geological Data Analysis*. Blackwell Sciences, Oxford, 446 p.
- Tobing, A. A. L., Sukarasa, I. K., & Yusuf, M., 2021. Analysis of gravity anomaly and seismicity in Bali region. *International Journal of Physical Sciences and Engineering*, 5(3), 34-43. <https://doi.org/10.53730/ijpse.v5n3.1723>
- Vernant, Ph., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., Chéry, J., 2004. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophysical Journal International*, 157(1), 381-398.
- Webster, R., Oliver, M.A., 2007. *Geostatistics for Environmental Scientists*, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd.
- Zamani, A. and Hashemi, S.N., 2000. A comparison between seismicity, topographic relief, and gravity anomalies of the Iranian Plateau. *Tectonophysics*, 327, 25-36.
- Zhan, F.B., Zhu, Y., Ning, J., Zhou J., Liang W., Xu Y., 2011. Gravity changes before large earthquakes in China: 1998–2005. *Geo-spat. Inf. Sci.* 14, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s11806-011-0440-0>.

Evaluation of the statistical and spatial correlation between seismicity parameters and Bouguer anomaly in Iran

Seyed Naser Hashemi^{1*}

¹ Assistant Professor, School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran

(Received: 09 May 2023, Accepted: 01 September 2023)

Summary

In this research, the spatial correlation between the variables representing Bouguer gravity anomaly and seismicity in Iran is evaluated. For this purpose, the gravity anomalies and seismicity data of this region have been analyzed statistically as well as geostatistically, for the period 1975-2021. Based on the findings of this study, it can be concluded that the significant correlation observed between the variables of gravity anomaly variations and the seismicity-related variables, especially the variables related to the frequency of earthquake occurrences, suggests that the gravity anomaly variations can be considered as an affective factor in seismic activity of this region.

The Iranian Plateau is one of the most seismically active regions on the Earth because of its geologic and tectonic setting. This plateau is marked by high topography relief and also by great changes in gravitational and isostatic anomalies across it. Many researchers have studied the variations of gravitational anomalies across Iran, and some have pointed to the relationships between these anomalies and seismicity in this region. The Bouguer gravity anomaly is obtained by making the necessary corrections to measurements taken directly from the ground stations, and well reflects the deep density variations in the crust. This anomaly can also clearly show changes in crustal thickness in different regions, such that areas with high crustal thicknesses show negative anomalies and areas with low crustal thicknesses show positive anomalies.

In this study, at first, the study region was divided into rectangles with dimensions of 0.5 by 0.5 geographical degrees and then the variables related to the seismicity and gravity anomalies were calculated and computed for each cell. Pearson correlation coefficients between these variables were computed and validated using statistical software Minitab (ver. 16.2.2). Also, maps representing the spatial distribution pattern of these variables were prepared. The remarkable similarity between the spatial patterns of variations of these variables indicates a strong correlation between the Bouguer gravity anomaly and seismicity in this region. The Pearson correlation coefficient values calculated between the variables also confirm this correlation. These values indicate that both variables of average Bouguer anomaly and the range of variations of this anomaly show a significant positive correlation with the seismicity-related variables. This degree of correlation is stronger for the variable of the Bouguer anomaly variation and moreover, this variable is more correlated with the seismicity variables associated with the frequency of earthquakes. In the next step, variograms were prepared.

The results obtained show that among the seismicity-related variables of the region, the b seismicity parameter (from the Gutenberg-Richter relation) has more spatial variability and show high spatial autocorrelation up to long distances. On the other hand, the other variables related to earthquake frequency and magnitude of earthquakes show less spatial autocorrelation. The variograms provided for the two variables representing the bouguer anomaly also show remarkable similarity to the seismicity-related diagrams. This similarity is more pronounced for the variable of the Bouguer anomaly variation. The remarkable similarities of the variograms, along with the similarities of the spatial distribution maps of these variables, may indicate a close relationship between these two series of variables. Finally, it can be concluded that gravitational forces, especially forces caused by isostatic imbalances, can play an important role in the process of earthquake occurrences in Iran.

Keywords: Seismotectonics, spatial analysis, seismicity parameters, gravity anomalies, spatial correlation, spatial statistics

*Corresponding author:

hashemi@du.ac.ir