

مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره دوازدهم، شماره چهل و ششم، زمستان ۱۴۰۰

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴ تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۰۹/۲۸

صص ۷۶-۹۲

مطالعه‌ی آماری و ارزیابی عوامل مؤثر در تشدید زلزله بر اساس مدل‌های GWR و OLS (منطقه‌ی مورد مطالعه: غرب استان کرمانشاه)

حدیث مرادی*، دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی-دانشکده‌ی جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، ایران
ابوالقاسم امیراحمدی، استاد ژئومورفولوژی-دانشکده‌ی جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، ایران
لیلی گلی مختاری، استادیار ژئومورفولوژی-دانشکده‌ی جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، ایران
رحمان زندی، استادیار سنجش از دور-دانشکده‌ی جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، ایران

چکیده

انسان از ابتدای حیات خود دائماً با تهدیدهای ژئومورفیک مواجه بوده و این مخاطرات، خسارت‌های جانی و مالی را در زیستگاه‌های انسانی به ویژه شهرها و روستاها برای جوامع انسانی به دنبال داشته است. یکی از این مخاطرات، زلزله است. نیمه‌ی غربی استان کرمانشاه از جمله کانون‌های زلزله‌خیز کشور می‌باشد که در این پژوهش به عنوان منطقه‌ی مورد مطالعه برگزیده شد. در این پژوهش جهت بررسی الگوی فضایی زلزله‌های رخ داده در قرن اخیر در منطقه‌ی مورد مطالعه، داده‌های مورد نیاز از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده استخراج گردید. سپس در راستای سنجش نحوه‌ی توزیع فضایی داده‌ها از شاخص موران استفاده گردید. همچنین جهت ارتباط بین کاربری‌های اراضی و کانون‌های زلزله از مدل‌های رگرسیونی OLS و GWR استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که در دوره‌ی مورد بررسی از ۱۷۳ زلزله‌ی رخ داده ۲۲ مورد بیش از ۵ ریشتر قدرت داشته‌اند. الگوی توزیع متغیر عمق زلزله‌های رخ داده با استفاده از آماره‌ی موران از نوع الگوی خوشه‌ای بوده و با توجه به بالا بودن میزان P-value (۰/۴۹) و پایین بودن Z (-۰/۶۸) خودهمبستگی فضایی را برای این پارامتر تأیید می‌کند. طبق مدل OLS تمام متغیرهای مورد استفاده متغیرهای اصلی و تاثیرگذار بوده‌اند، اما نزدیکی به گسل بیش‌ترین نقش را دارا می‌باشد. لکن عدد VIF (۷/۵) به دست آمده برای متغیرها نشان‌دهنده‌ی این است که احتیاج به بررسی متغیرهای مستقل بیش‌تری وجود دارد، اما طبق مدل GWR مقدار مربعات باقی‌مانده‌ی تعدیل شده که نمایانگر شاخص خوبی انطباق می‌باشند، بیانگر کاهش خطا و افزایش دقت در برآورد متغیر وابسته و بیانگر برتری مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی نسبت به مدل حداقل مربعات است. همچنین نتایج حاکی از آن است که میزان شدت زلزله ارتباط مستقیمی با شاخص‌های تراکم گسل، نزدیکی به گسل و ارتفاع دارد و کم‌ترین ارتباط را با کاربری‌های زمین‌های بایر و باغات و جنگل نشان داد.

واژگان کلیدی: مطالعه‌ی آماری، زلزله، مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی، OLS، غرب کرمانشاه.

* Email: hadismoradi222@gmail.com

نویسنده‌ی مسئول:

مقاله مستخرج از پایان‌نامه‌ی دکتری خانم حدیث مرادی با عنوان «تحلیل ژئومورفولوژیکی مخاطره‌ی زمین‌لرزه در نیمه‌ی غربی استان کرمانشاه» به راهنمایی دکتر ابوالقاسم امیراحمدی می‌باشد.

۱- مقدمه

دنیای امروز به موازات پیشرفت و توسعه‌ی شگفت‌آور در همه‌ی عرصه‌ها، حوادث و بحران‌هایی را پیش‌رو دارد که به گواهی آمار مؤسسات و سازمان‌های بین‌المللی، در حال افزایش کمی و تأثیرگذاری عمیق بر جوامع بشری و ساختارهای مادی و معنوی است (تقوایی و حسینی‌نژاد، ۱۳۹۴: ۲۳). در میان تمام مخاطرات طبیعی، زلزله یکی از جدی‌ترین آن‌هاست که زبان‌های عظیم اقتصادی و مرگ‌ومیر مردم را به بار می‌آورد (zali&Azadeh, 2014; Li et al, 2009: 75).

کشور ایران به دلیل قرارگیری در مسیر کوه‌زایی آلپ هیمالیا در معرض زلزله قرار گرفته است که به لحاظ جغرافیایی جزء ده کشور حادثه‌خیز و آسیب‌پذیر از بلاهای طبیعی جهان به شمار می‌رود (دوستی و همکاران، ۱۳۹۴: ۵۷؛ انوری و همکاران، ۱۳۹۴: ۴۲؛ امینی، ۱۳۸۴: ۸۳). بر اساس بررسی‌های آماری، بزرگ‌ترین و مرگبارترین زلزله‌های ۱۱۰ سال اخیر در مجموع ۱۴۸ هزار و ۴۷۱ کشته بر جای گذاشته است. با مراجعه به نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر نسبی زمین‌لرزه ایران مشاهده می‌شود که بیش از ۹۰ درصد از مساحت کشور بر روی نوار زلزله قرار دارد (کریمی، ۱۳۸۹: ۷). زمین‌لرزه‌هایی که در ایران رخ داده، اغلب فاجعه‌بار بوده و موجب بروز خسارات زیادی شده است. توزیع فضایی و بزرگی خطرات زلزله در مناطق مختلف ایران یکسان نیست (yazdani & Kowsari, 2011: 112). آمار نشان می‌دهد که اغلب مناطق استان کرمانشاه از نظر زلزله‌خیزی فعال بوده و هرچند سال یکبار زلزله‌های مخرب بخش‌های وسیعی از این استان را تخریب نموده و خسارات جانی و مالی فراوانی به بار می‌آورد. سابقه‌ی تاریخی وقوع زمین‌لرزه در زاگرس گویای آن است که استان کرمانشاه از زمان‌های قدیم در معرض زمین‌لرزه‌های شدید قرار داشته و در طول تاریخ بارها شاهد خرابی‌های فراوان بوده است (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۹۶: ۳۰). آخرین گواه بر این مدعا، زلزله‌ی شدید در آبان‌ماه ۱۳۹۶ با بزرگی ۷/۳ ریشتر در شهرستان ثلاث باباجانی و برخی شهرستان‌های اطراف آن است که موجب خسارات مالی و تلفات جانی قابل‌توجهی در نواحی روستایی و شهری کرمانشاه شد (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۹۶: ۵۶).

طبق بررسی‌هایی انجام‌شده در محدوده‌ی مورد مطالعه‌ای که برای این پژوهش در نظر گرفته شده (نیمه‌ی غربی استان کرمانشاه) از سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۲۰ تعداد ۱۷۳ زلزله رخ داده است که بزرگ‌ترین آن ۷/۳ ریشتر و کم‌ترین آن ۳/۳ ریشتر شدت داشته است که به‌طور میانگین ۴/۵ ریشتر قدرت زلزله‌هایی بوده است که در این زمان به وقوع پیوسته است.

هر پژوهشی به دنبال یافتن پاسخی برای سؤالاتی است که ذهن محقق را درگیر کرده است. پژوهش حاضر نیز از این مورد مستثنا نبوده و سؤالات و فرضیات ذیل مطرح گردیده‌اند:

سؤالات:

آیا توزیع فضایی زلزله‌های مورد بررسی دارای نظم خاصی می‌باشند؟

کدام‌یک از پارامترهای مورد بررسی نقش بیش‌تری در تشدید قدرت تخریب زلزله‌های رخ‌داده در منطقه‌ی را دارا می‌باشند؟

فرضیات:

به نظر می‌رسد که توزیع فضایی زلزله‌های رخ‌داده در منطقه دارای الگوی خوشه‌ای است.

به نظر می‌رسد که پارامتر نزدیکی به گسل، بیش‌ترین نقش را در تشدید قدرت تخریب زلزله‌های رخ‌داده در منطقه دارا می‌باشد.

در ادامه به برخی از تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌ی مورد بررسی اشاره خواهد شد.

مهدوی عادل‌ی در سال ۱۳۹۰ در پژوهشی تحت عنوان تحلیل و ارزیابی خطر زلزله در مناطق مختلف شهر مشهد به این نتیجه رسیدند که وضعیت سطح خطر زلزله در مناطق غربی بیش‌تر از مناطق شرقی است. قهرودی تالی و

همکاران (۱۳۹۱) به بررسی پتانسیل تخریب لرزه‌خیزی در منطقه‌ی یک شهر تهران پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بیش‌ترین قابلیت تخریب را دارد و آن مناطق روی بیش‌ترین بیرون‌زدگی‌های آبرفت‌های جدیدتر، حضور گسل‌های اصلی و زلزله‌خیز و حضور شبکه‌های آبرفتی اصلی مانند رودخانه‌های دارآباد، جمشیدیه، دربند و گلاب‌دره وجود دارد که ۲۱ درصد منطقه را شامل می‌شود.

فاطمی عقدا و همکاران (۱۳۹۲) به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله‌ی سرعین پرداختند و به این نتیجه رسیدند که عملکرد روش کامل در پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله‌ی سرعین به مراتب بهتر از روش مهدوی‌فر است. کریمی کردآبادی و نجفی (۱۳۹۴) طی پژوهشی به ارزیابی خطر زلزله در کلان‌شهر تهران پرداختند. آن‌ها نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زلزله را تهیه کردند که در آن نشان داده شد که مناطق دارای خطر کم و خیلی کم که ۲۳ درصد محدوده‌ی مورد مطالعه را در برمی‌گیرد، بیش‌تر منطبق بر محدوده‌ی شهری نواحی الهیه، قیطریه، ولنجک، زعفرانیه و باغستان به صورت پراکنده در بعضی قسمت‌های منطقه‌ی یک است. کریمیان و همکارانش در سال ۱۳۹۴ به بررسی ارتباط بین جاذبه‌های گردشگری و کاربری اراضی با استفاده از مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی شهر اصفهان پرداختند نتایج حاکی از آن بود که کشاورزی نرمال‌ترین شاخص است و اثرگذاری مثبت و منفی آن یکسان است. قاسمی و احمدآبادی (۱۳۹۵) به ارزیابی آسیب‌پذیری مسکن شهری (منطقه‌ی ۹ شهر تهران) در برابر زلزله پرداختند و در نهایت موفق به تهیه‌ی نقشه‌ی آسیب‌پذیری منطقه‌ی مورد مطالعه شدند و دریافتند که بیش‌ترین مساحت که حدود ۱۵۷ هکتار بود، دارای میزان درجه‌ی آسیب‌پذیری متوسط و کم‌ترین مساحت که حدود ۶۸/۶۱ کیلومتر بود دارای درجه‌ی آسیب‌پذیری زیاد را به خود اختصاص داده بود. حسین‌خواه و همکاران (۱۳۹۵) به مدل‌سازی آثار کاربری اراضی روی پارامترهای کیفیت آب با روش‌های رگرسیونی چندمتغیره OLS و GWR در حوضه‌ی آبخیز استان فارس پرداختند. این تحقیق نشان داد که روش GWR در مدل‌سازی آثار کاربری اراضی روی پارامترهای کیفیت آب از کارایی بالاتری برخوردار است. شمشیری و همکاران (۱۳۹۶) به مقایسه‌ی کارایی الگوی رگرسیونی وزنی جغرافیایی و الگوی حداقل مربعات معمولی در تحلیل ارتباطات بین متغیرهای فضایی در دشت خان‌میرزا پرداختند. آن‌ها به کارآمدی الگوی GWR در ارائه‌ی خروجی‌های فضایی در برابر الگوی OLS پی بردند. امیریان (۱۳۹۷) به بررسی الگوی آسیب‌پذیری شهر کرمانشاه در برابر زلزله پرداخت که طبق تحقیقات ایشان، مناطق مختلف شهر کرمانشاه به‌ویژه بخش‌های شمالی و جنوبی آن از لحاظ آسیب‌پذیری وضعیت مناسبی ندارند.

خدادادی و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی با عنوان تحلیل آسیب‌پذیری شهری در برابر مخاطره‌ی زلزله در کلان‌شهر کرج به این نتیجه رسیدند که بیش از ۷۰ درصد از شهر کرج از نظر خطر آسیب‌پذیری در برابر زلزله در طبقه‌ی خیلی کم و کم قرار گرفته‌اند و تنها در حدود ۲۰ درصد از شهر کرج در مناطق با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند. محمدی‌فر و همکارانش در سال ۱۳۹۹ به طراحی مدل بومی مدیریت بحران سوانح گسترده‌ی طبیعی برای زلزله‌ی کرمانشاه پرداختند و در نهایت ابراز داشتند که نیاز به بازنگری در برخی اصول مدیریت بحران از نحوه‌ی سازمان‌دهی کمک‌های مردمی، انتقال اخبار و اطلاعات و حضور نیروهای داوطلب در مناطق زلزله‌زده ضروری است. زارعی و همکارانش (۱۴۰۰) به اندازه‌گیری بعد فرکتالی گسل‌های فعال، پارامتر لرزه‌خیزی b و زمین‌لرزه‌های رخ داده در پهنه‌ی خوزستان پرداختند. با توجه به نتایج این پژوهش، مناطق اطراف گسل‌های ایذه، گسل MFF و گسل لهربری از مناطق کاندید زمین‌لرزه‌های آتی در پهنه‌ی مورد مطالعه قرار گرفت.

به منظور بررسی مقیاس‌های مختلف در اثرگذاری دما و فاکتورهای محیط زیستی بر محیط شهری، لیبی و همکاران^۱ (۲۰۰۹) از مدل GWR بهره گرفتند که بررسی‌هایشان نشان داد که این مدل در تحلیل مذکور کارایی بالایی دارد. تیو^۲ (۲۰۱۱) ارتباط بین کاربری اراضی و کیفیت منابع آب را در بوستن امریکا با استفاده از GWR

1- Lee et al

2- Tiu

بررسی و تحلیل کردند. نتایج تحقیقات نشان داد که ارتباطات مختلف فضایی بین کیفیت منابع آب زیرزمینی و تغییرات کاربری با در نظر گرفتن فاصله از شهر بوستون در ایالات متحده وجود دارد. سو و همکاران^۳ (۲۰۱۲) تحلیل‌های چندمقیاسی ارتباطات مختلف فضایی بین الگوهای اراضی کشاورزی و شهرسازی را با استفاده از الگوی GWR نشان دادند که این الگو ظرفیت بالایی در رفتارهای مختلف توسعه‌ای بخش کشاورزی و مناطق مختلف شهری را داراست. برون و همکاران^۴ (۲۰۱۱) با ارزیابی ارتباطات مختلف فضایی مرتبط بین تغییرات کاربری اراضی و منابع مختلف آب سطحی نشان دادند که روش‌های آماری سنتی همانند OLS اغلب در داده‌های مختلف فضایی قادر به بیان ارتباط‌های فضایی مختلف نیستند و در مقابل کارایی مدل GWR با معیارهای همانند ضریب تبیین‌های محلی و ضریب اطلاعات اکائیک مشخص شد که بهبود در بیان داده‌های فضایی را نشان می‌دهند (Brown et al, 2011:69). پاتریک و همکاران^۵ (۲۰۲۰) در تحقیقی تحت عنوان اثرات توپوگرافی بر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در کشور تایوان پرداختند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که کانون‌های زلزله با توزیع شیب‌های بسیار تند ارتباط دارند. همچنین نشان دادند که آگاهی از اثرات توپوگرافیکی می‌تواند ابزاری مهم در پیش‌بینی الگوهای فضایی زمین‌لغزش ناشی از زلزله باشد (Patrick et al, 2020: 225).

مروری بر تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که جای یک تحقیق نسبتاً جامع که بتواند هم از نظر آماری به بررسی زلزله‌های رخ داده‌ی شهر کرمانشاه بپردازد و هم عوامل مؤثر بر شدت تخریب زلزله را در استان کرمانشاه بررسی کند، تقریباً خالی است؛ لذا هدف از انجام این پژوهش، دستیابی به این مهم است.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

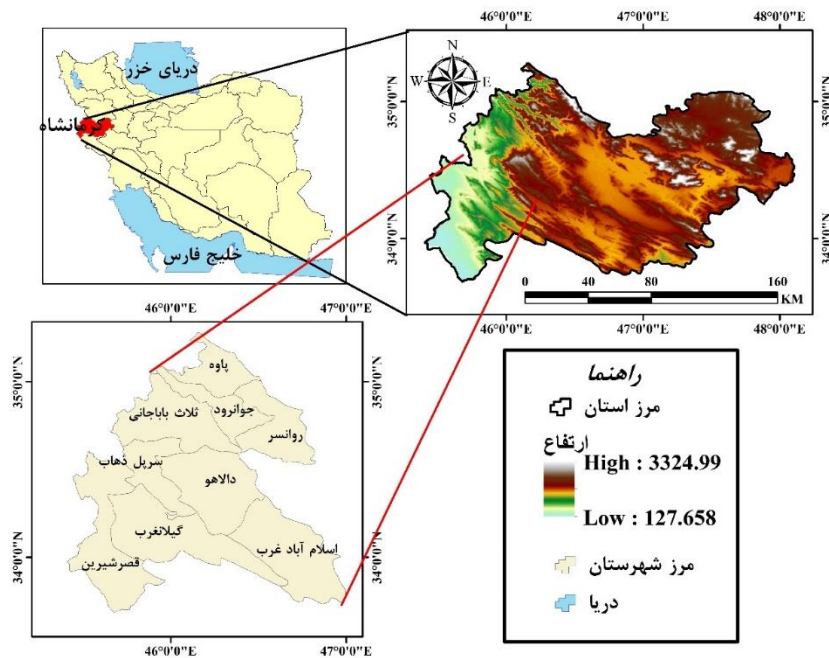
منطقه‌ی مورد مطالعه شامل محدوده‌ی سیاسی ۹ شهرستان در نیمه‌ی غربی استان کرمانشاه (شهرستان‌های پاوه، جوانرود، ثلاث باباجانی، سرپل ذهاب، قصر شیرین، گیلان غرب، دالاهو، اسلام‌آباد غرب و روانسر) است که به دلیل نزدیکی به کانون زلزله و متحمل شدن خسارات جانی و مالی بیش‌تر نسبت به بقیه‌ی شهرستان‌های درگیر زلزله‌ی ۲۱ آبان ۱۳۹۶ انتخاب شده‌اند. محدوده‌ی مورد مطالعه وسعتی برابر ۱۴۲۵۸ کیلومتر مربع دارد. از شمال با استان کردستان، از غرب دارای ۱۸۶ کیلومتر مرز مشترک با کشور همسایه عراق، از جنوب با استان ایلام و از شرق هم با شهرستان‌های (کرمانشاه) از استان کرمانشاه هم‌مرز است. از لحاظ زمین‌شناسی بیش‌تر از سازندهای آسماری، بختیاری، تله زنگی، کژدمی، آغاجاری، گچساران و شهبازان و... تشکیل شده است.

پست‌ترین نقطه‌ی ارتفاعی محدوده‌ی ۳۳ متر از سطح دریا و بلندترین نقطه‌ی ارتفاعی ۱۵۳۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد که خود این مسئله باعث تنوع توپوگرافی و ژئومورفولوژیکی محدوده‌ی مورد مطالعه است. شکل (۱) نشان‌دهنده‌ی محدوده‌ی مورد مطالعه است.

3- Su et al

4- Brown et al

5- Patrick et al



شکل ۱: محدوده‌ی مورد مطالعه

۳- مواد و روش‌ها

در این بخش ابتدا داده‌های مربوط کانون زلزله‌های رخ داده در صدسال اخیر منطقه‌ی مورد مطالعه از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده‌ی آمریکا (<https://earthquake.usgs.gov>) دریافت شد. سپس بر اساس الگوها و مدل‌سازی‌های آمار فضایی به تحلیل داده‌های اخذ شده پرداخته شد. در راستای سنجش نحوه‌ی توزیع فضایی داده‌ها از شاخص موران استفاده گردید. همچنین جهت ارتباط بین کاربری‌های اراضی و کانون‌های زلزله از مدل‌های رگرسیونی OLS و GWR استفاده شد که در ادامه به تشریح این دو مدل پرداخته می‌شود.

-شاخص موران (Morans I)

یکی از آزمون‌های متداول برای تشخیص خودهمبستگی مکانی، آزمون موران است که برای تشخیص درجه‌ی خوشه‌بندی یا پراکندگی کاربرد دارد. مقدار آماره‌ی موران نشان می‌دهد که نواحی مجاور در یک لایه‌ی رستری، دارای ارزش‌های مشابه و یا غیرمشابه هستند. آماره‌ی I بر اساس مفهوم کواریانس و وزن‌دهی بر اساس میزان مجاورت نقاط نمونه (مشاهدات زمینی)، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} z_i z_j}{S_0 \sum_{i=1}^n z_i^2}$$

رابطه‌ی ۱

در این رابطه، $w_{i,j}$: وزن مکانی بین دو متغیر i و j ; تعداد کل صفحات (متغیرها)، S_0 : مجموع تمام وزن‌های مکانی، z_i : انحراف معیار متغیر i از میانگین و z_j : انحراف معیار متغیر j از میانگین است. مقدار آماره‌ی موران I از ۱- و ۱+ متغیر است. هرچه مقدار I به صفر نزدیک‌تر باشد، بیانگر الگوی تصادفی است. بر اساس تحقیق ایشزوا و همکاران ۱۳ مقدار نزدیک به ۱ نشان می‌دهد که نواحی با ارزش‌های مشابه دارای الگویی خوشه‌ای هستند و مقدار ۱- نشان می‌دهد که نواحی با ارزش‌های غیرمشابه در کنار یکدیگر قرار دارند (عرفانیان و همکاران، ۱۳۹۲: ۳۹).

مدل رگرسیونی حداقل مربعات معمولی (OLS)

در بین مدل‌های رگرسیون متداول، روش حداقل مربعات معمولی، ساده‌ترین و مرسوم‌ترین روش است. طرح اولیه‌ی این روش معمولاً با OLS نشان داده می‌شود. زیربنای فکری روش حداقل مربعات معمولی این است که ضرایب مدل مقادیری اختیار کنند که مدل رگرسیونی نمونه بیش‌ترین نزدیکی را به مشاهدات داشته باشد. به عبارت دیگر، کم‌ترین انحراف را از مشاهدات فوق نشان دهد. در مدل‌سازی مکانی با روش OLS فرض می‌شود که ضرایب یا پارامترهای مدل آماری نسبت به مکان (مختصات جغرافیایی) ثابت است؛ بنابراین مقدار متغیر وابسته که با این مدل تخمین زده می‌شود، برای کل منطقه‌ی مورد مطالعه بوده و در نقاط مختلف حوضه نیز مقداری یکسان را تخمین می‌زند که به عنوان نقطه ضعف این روش در مدل‌سازی مکانی محسوب می‌شود. مدل رگرسیونی خطی ساده یک متغیره به شکل زیر است:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad \text{رابطه‌ی ۲}$$

که y متغیر وابسته (برآورد شده)، x متغیر مستقل (برآورد کننده)، ε_i خطا یا انحراف مدل در برآورد، β_0 و β_1 پارامترها یا ضرایب مدل می‌باشند. برای تمام منطقه‌ی مورد مطالعه، مقادیر β_0 و β_1 ثابت فرض می‌شود. مدل آماری OLS و ماتریس تخمین ضرایب مدل، با روابط زیر بیان می‌شود:

$$y = X\beta + \varepsilon \quad \text{رابطه‌ی ۳}$$

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad \text{رابطه‌ی ۴}$$

که در آن T ترانهاده ماتریس، $(X^T X)^{-1}$ معکوس ماتریس واریانس کوواریانس و X ماتریس متغیرهای مستقل است و ضرایب مدل رگرسیونی چند متغیره OLS در سراسر مکان ثابت است. با استفاده از این مدل امکان تهیه‌ی نقشه‌ی تغییرات مکانی پارامترها یا ضرایب مدل وجود ندارد. به علاوه این مدل با نرم‌افزار ARC GIS ناسازگار بوده و همبستگی مکانی را در نظر نمی‌گیرد.

مدل رگرسیونی وزنی جغرافیایی (GWR)

یکی از روش‌های جدید برای دستیابی به دقت بالاتر در تحلیل روابط متأثر از مکان، روش رگرسیون وزنی جغرافیایی است. مدل GWR روشی جدید برای مدل‌سازی فرایندهای ناهمگن مکانی است. ناهمگنی مکانی بیانگر این است که در هر نقطه (مختصات جغرافیایی) رابطه‌ای متفاوت بین متغیر وابسته و مستقل به دلیل وابستگی پارامترها یا ضرایب مدل نسبت به مکان وجود دارد. روش رگرسیونی وزنی جغرافیایی همان روش حداقل مربعات معمولی است با این تفاوت که به مشاهدات بر اساس مکان یا مختصات مکانی آن‌ها نسبت به نقاط مرجع وزن داده می‌شود. هر پارامتر یا ضریب مدل GWR دارای یک علامت و مقدار است (احمدآبادی و همکار، ۱۳۹۵: ۵۹). پس افزایش مقدار متغیر مستقل باعث افزایش متغیر وابسته خواهد شد. اگر علامت آن منفی باشد، آن متغیر دارای اثر کاهشی روی متغیر وابسته است. مدل رگرسیونی چند متغیره خطی GWR به صورت زیر است:

$$y_i(u) = \beta_0(u) + \beta_1(u)x_{1i} + \beta_2(u)x_{2i} + \dots + \beta_m(u)x_{mi} \quad \text{رابطه‌ی ۵}$$

در صورتی که مؤلفه‌ی وزن مشاهدات در معادله‌ی رگرسیون وارد شود، رابطه‌ی بردار پارامترها یا ضرایب بتا، به یک رابطه‌ی رگرسیونی وزنی جغرافیایی تبدیل می‌شود و مشاهدات نزدیک نسبت به مشاهدات دورتر وزن بیش‌تری دارند. ضرایب یا پارامترهای مدل با رابطه‌ی زیر تخمین زده می‌شوند:

$$\hat{\beta}(u) = (X^T W(u) X)^{-1} X^T W(u) y \quad \text{رابطه‌ی ۶}$$

که $W(u)$ ماتریس وزن (ماتریس مربع) در موقعیت u (مختصات متریک)، X^T ترانهاده ماتریس متغیرهای مستقل (X) است. ماتریس وزن تابع مختصات متریک u با استفاده از رابطه‌ی نمایی زیر قابل تخمین است:

$$w_i(u) = e^{-0.5(d_i(u)/h)^2} \quad \text{رابطه‌ی ۷}$$

که w_i : وزن جغرافیایی مشاهدات i در موقعیت مکانی u ، $d_{i(u)}$: اندازه‌ی فاصله‌ی مکانی بین مشاهدات i و h پهنای باند انتخابی بر حسب متر است.

مشخصات مدل رگرسیونی GWR شامل موارد زیر است: ۱- پارامترهای یا ضرایب مدل نسبت به مکان تغییر می‌کند، ۲- قابلیت ارائه‌ی نتایج مدل‌سازی به صورت نقشه‌های مکانی وجود دارد، ۳- سازگار با نرم‌افزار ArcGIS است و ۴- همبستگی مکانی را در نظر می‌گیرد.

۴- بحث و نتایج

پارامترهایی که برای این تحقیق مدنظر ما بوده‌اند، عبارت‌اند از: مدل ارتفاعی رقومی، شیب، فاصله از گسل‌ها، تراکم گسل‌ها، عمق و شدت زلزله‌های رخ داده، فاصله از نقاط شهری و فاصله از کاربری اراضی (فاصله از جنگل و مراتع، فاصله از زمین‌های بایر، فاصله از باغات). با توجه به ماهیت روشی که برای این تحقیق در نظر گرفته شده است، بررسی و تحلیل فضایی زلزله‌هایی که در طی دوره‌ی مدنظر (زلزله‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰) رخ داده‌اند، نسبت به پارامترهای مدنظر مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه‌ی این بررسی در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: فراوانی رخداد زلزله بر اساس پارامترهای مورد بررسی

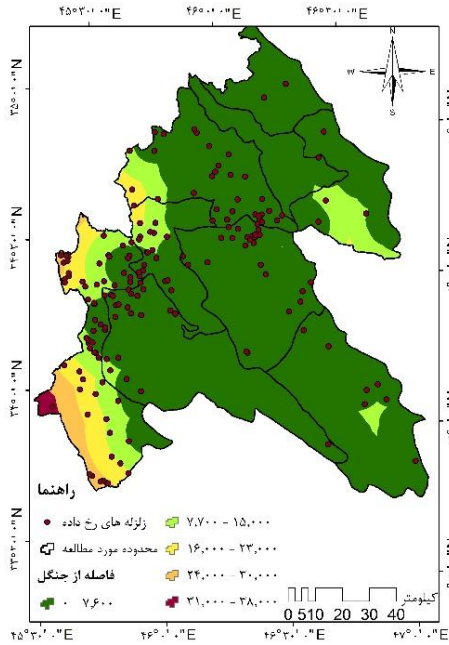
					پارامترهای مورد بررسی	
-۴۴۰۰۰	-۳۴۰۰۰	-۲۳۰۰۰	-۱۲۰۰۰	-۰	فاصله‌ی زلزله‌های رخ داده از شهرها	فاصله از شهر
۵۴۰۰۰	۴۳۰۰۰	۳۳۰۰۰	۲۲۰۰۰	۱۱۰۰۰	تعداد زلزله‌های رخ داده	
۷	۸	۲۳	۶۷	۶۸		
-۲۱۰۰۰	-۱۶۰۰۰	-۹۹۰۰	-۵۰۰۰	۴۹۰۰۰	فاصله‌ی زلزله‌های رخ داده از زمین‌های بایر	کاربری اراضی
۲۵۰۰۰	۲۰۰۰۰	۵۰۰۰	۸۹۰۰	۱۴۴	تعداد زلزله‌های رخ داده	
۰	۰	۵	۲۴	۱۴۴		
-۳۱۰۰۰	-۲۴۰۰۰	-۱۶۰۰۰	-۷۷۰۰	۷۶۰۰۰	فاصله‌ی زلزله‌های رخ داده از جنگل‌ها و مراتع	جنگل‌ها و مراتع
۳۸۰۰۰	۳۰۰۰۰	۲۳۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۱۰	تعداد زلزله‌های رخ داده	
۱	۷	۱۸	۳۷	۱۱۰		
-۶۴۰۰۰	-۴۸۰۰۰	-۳۲۰۰۰	-۱۷۰۰۰	-۰	فاصله‌ی زلزله‌های رخ داده از باغات	فاصله از باغات
۷۹۰۰۰	۶۳۰۰۰	۴۷۰۰۰	۳۱۰۰۰	۱۶۰۰۰	تعداد زلزله‌های رخ داده	
۱	۰	۱۹	۷۰	۸۳		
-۰,۴۵	-۰,۳۴	-۰,۲۳	-۰,۱۲	۰,۱۱-۰	تراکم گسل‌ها	گسل
۰,۵۵	۰,۴۴	۰,۳۳	۰,۲۲	۱۲۷	تعداد زلزله‌های رخ داده	
۰	۱	۴	۴۱	۱۲۷		
-۲۴۰۰۰	-۱۸۰۰۰	-۱۲۰۰۰	-۵۸۰۰	۵۷۰۰۰	فاصله‌ی زلزله‌های رخ داده از گسل‌ها	فاصله از گسل‌ها
۲۸۰۰۰	۲۳۰۰۰	۱۷۰۰۰	۱۱۰۰۰	۹۴	تعداد زلزله‌های رخ داده	
۲	۵	۲۱	۵۱	۹۴		
۳۹-۲۱	۲۰-۱۴	۱۳-۸	۷,۹-۳,۶	-۰,۰۰۷۱ ۳,۵	فاصله‌ی شیب از زلزله‌های رخ داده	شیب

					پارامترهای موردبررسی
۰	۶	۴	۲۳	۱۴۰	تعداد زلزله‌های رخ داده
-۲۱۰۰	-۱۶۰۰	-۱۲۰۰	-۶۶۰	-۱۲۰	فاصله‌ی نقاط ارتفاعی از زلزله‌های رخ داده
۳۳۰۰	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۱۱۰۰	۶۵۰	تعداد زلزله‌های رخ داده
۴	۱۶	۳۶	۲۶	۹۱	

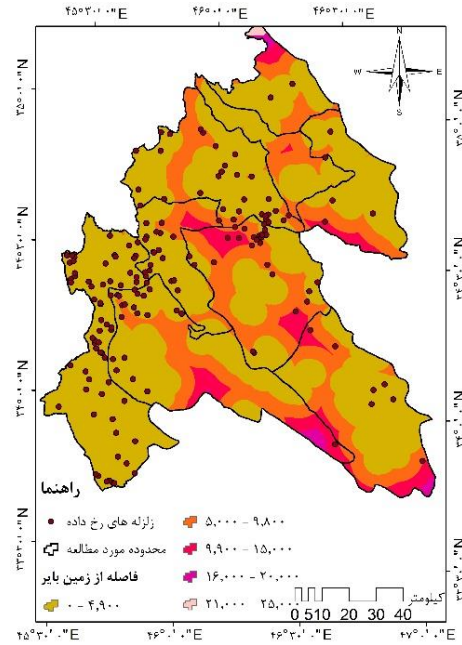
منبع: (یافته‌های تحقیق)

در میان پارامترهای انتخاب شده تقریباً ارتباط معنی‌داری بین زلزله‌های رخ داده و فاصله‌های نزدیک از آن‌ها وجود دارد. برای پارامتر زمین‌های بایر ۸۳/۲۳ درصد از تعداد زلزله‌های رخ داده در نزدیک‌ترین فاصله از زمین‌های بایر محدودی مورد مطالعه رخ داده است. شکل (۲) تراکم و تعداد زلزله‌های رخ داده در محدوده‌ی زمین‌های بایر منطقه‌ی مورد مطالعه قابل مشاهده است. ۶۳/۵۸ درصد زلزله‌های رخ داده در نزدیک‌ترین فاصله از جنگل‌ها و مراتع منطقه‌ی مورد مطالعه رخ داده است. در شکل (۳) تراکم و تعداد زلزله‌های رخ داده در محدوده‌ی جنگل‌ها و مراتع منطقه‌ی مورد مطالعه قابل مشاهده است. ۷۳/۴۱ درصد از زلزله‌های رخ داده در محدوده‌ی تراکم بالای گسل‌ها به وقوع پیوسته است. بر اساس شکل (۴)، ۵۴/۳۳ درصد زلزله‌های رخ داده در نزدیک‌ترین فاصله از گسل‌های منطقه رخ داده است. شکل (۵) بیانگر تراکم و تعداد زلزله‌های رخ داده نسبت به فاصله از گسل‌های منطقه‌ی مورد مطالعه است. ۸۰/۹۲ درصد از زلزله‌های رخ داده در کم‌ترین شیب منطقه (۳،۵-۰،۰۰۷۱) رخ داده است. در شکل (۶) تراکم و تعداد زلزله‌های رخ داده در شیب‌های مختلف منطقه‌ی مورد مطالعه قابل مشاهده است. ۴۷/۹۷ درصد از زلزله‌های رخ داده در نزدیک‌ترین فاصله از باغات محدوده‌ی مورد مطالعه رخ داده است. در شکل (۷) تراکم و تعداد زلزله‌های رخ داده در محدوده‌ی باغات منطقه‌ی مورد مطالعه نشان داده شده است. بر اساس شکل (۸)، ۵۰/۶۰ درصد زلزله‌های رخ داده در اولین طبقه از نقاط ارتفاعی محدوده‌ی مورد مطالعه رخ داده است. ۳۹/۳۰ درصد از زلزله‌های رخ داده در نزدیک‌ترین فاصله از شهرهای منطقه‌ی مورد مطالعه رخ داده است. شکل (۹) تراکم و تعداد زلزله‌های رخ داده در فواصل در نظر گرفته شده از شهرها محدوده‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

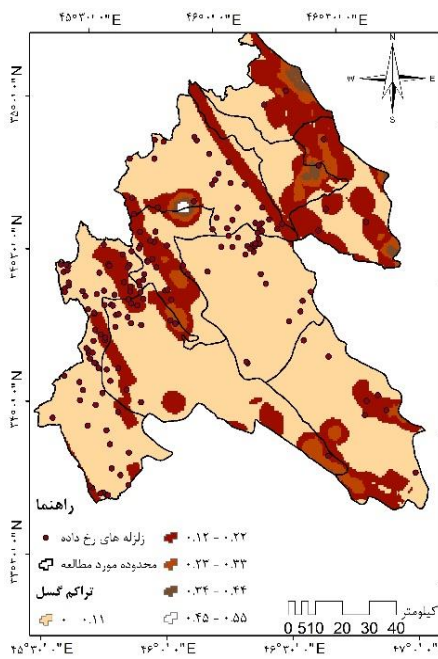
گنو به همراه مورل^۶ از مؤسسه‌ی لانژوین در پاریس به صورت نظری نشان دادند که جنگل‌ها باید بتوانند حفاظی در برابر امواج زلزله باشند. طبق تحقیقاتی که ایشان بر روی امواج لاو انجام دادند، به این مهم دست یافتند که این امواج نیز همانند امواج رایلی تنها در زیر زمین حرکت می‌کنند و فقط زمانی ایجاد می‌شوند که امواج لرزه‌ای از مرکز زمین لرزه حرکت کرده و به سطح زمین می‌رسند. اگرچه امواج رایلی هم حرکت افقی و هم عمودی دارند، اما امواج لاو هستند که می‌توانند بنیان ساختمان‌ها را به شدت آسیب زنند (Agnès & Maurel, 2017: 135). این پژوهشگران به این مهم دست یافتند که امواج لرزه‌ای خاص از زلزله (امواج لاو) هنگامی که از میان جنگلی با درختان با ارتفاع خاص عبور می‌کند، می‌توانند از سطح زمین به جهت دیگر منحرف شوند و درواقع جنگل همانند یک ساختار مصنوعی عمل کرده، می‌تواند هدایت تشعشعات الکترومغناطیسی را به عهده بگیرد. متأسفانه در بین تحقیقات داخلی هیچ پژوهشی در این زمینه انجام نشده است، لذا در این پژوهش یکی از دلایلی که سعی شد از پارامتر کاربری اراضی از متغیرهای (فاصله از زمین بایر، فاصله از جنگل‌ها و مراتع و فاصله از باغات) استفاده شود، تلاش برای آشکارسازی میزان تأثیر این متغیرها بوده است. محققان داخل بیش‌تر پارامترهای شیب، نقاط ارتفاعی و گسل را مورد بررسی و تجزیه تحلیل قرار داده‌اند.



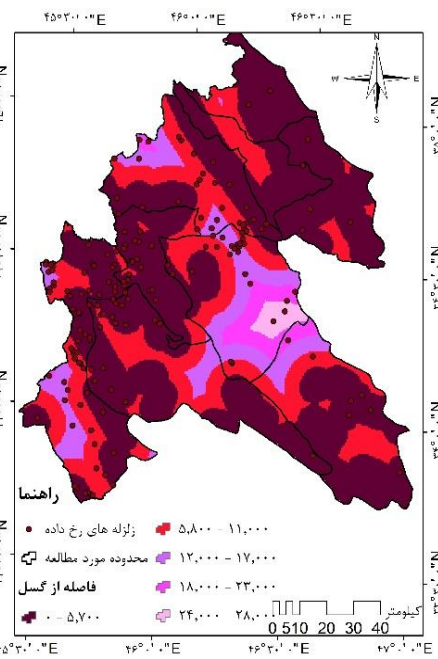
شکل ۳: زلزله‌های رخ داده در فاصله از جنگل‌ها و مراتع محدوده‌ی مورد مطالعه



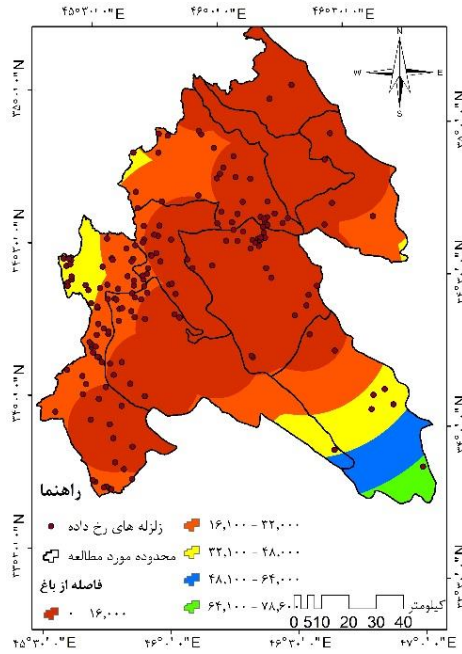
شکل ۲: زلزله‌های رخ داده در فاصله از زمین‌های بایر محدوده‌ی مورد مطالعه



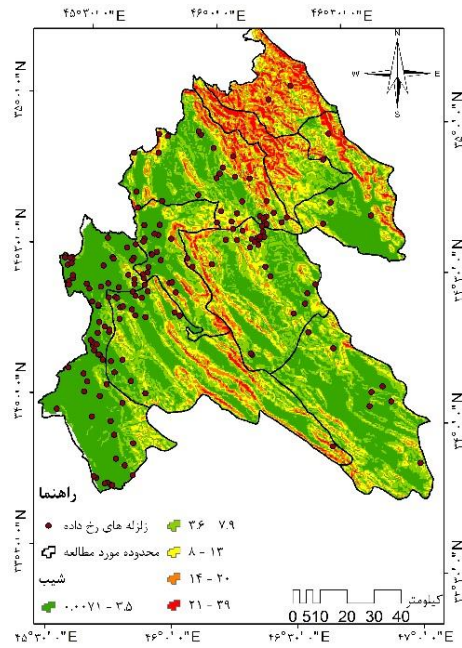
شکل ۵: زلزله‌های رخ داده در محدوده‌ی تراکمی گسل‌های محدوده‌ی مورد مطالعه



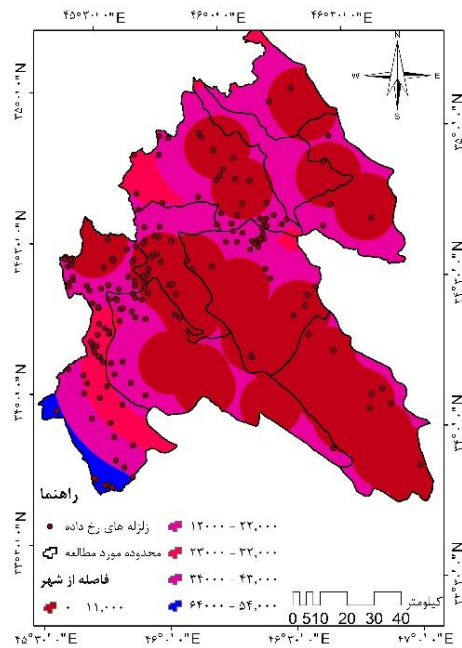
شکل ۴: زلزله‌های رخ داده در فاصله از گسل‌های محدوده‌ی مورد مطالعه



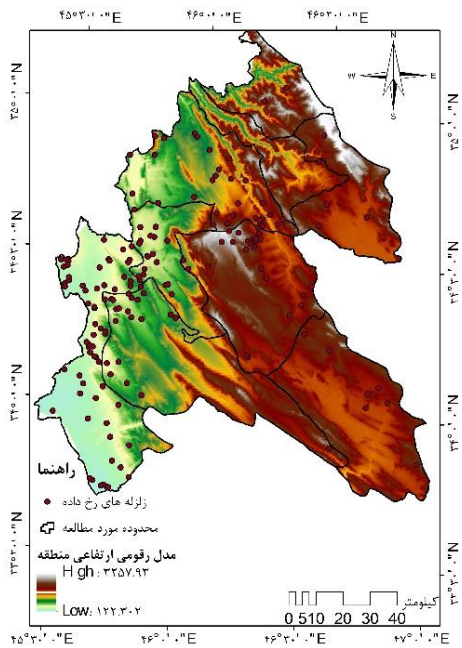
شکل ۷: زلزله‌های رخ داده در فاصله از باغات محدوده‌ی مورد مطالعه



شکل ۶: زلزله‌های رخ داده در شیب‌های مختلف محدوده‌ی مورد مطالعه



شکل ۹: زلزله‌های رخ داده در فاصله از شهرهای محدوده‌ی مورد مطالعه



شکل ۸: زلزله‌های رخ داده در نقاط مختلف ارتفاعی محدوده‌ی مورد مطالعه

کاربرد مدل رگرسیونی حداقل مربعات معمولی (OLS) در تحلیل عوامل مؤثر بر شدت زلزله

در این پژوهش از روش رگرسیونی حداقل مربعات معمولی (OLS) برای برآورد متغیر شدت زلزله (متغیر وابسته) توسط ۸ متغیر مستقل دیگر انجام شد. برای انجام دادن مدل رگرسیون وزن دار جغرافیایی باید شاخص‌ها را ارزیابی و تأثیرگذارترین شاخص‌ها بر روی متغیر وابسته را شناسایی کرد که این عمل در چند مرحله صورت گرفت: در مرحله اول جهت مشخص نمودن مناطقی که تراکم متغیر وابسته در آن بالاتر است، تحلیل Hot spot بر روی زلزله‌های رخ داده منطقه‌ی مورد مطالعه صورت گرفت. در مرحله‌ی بعدی با استفاده از تحلیل رگرسیون حداقل

مربعات، جهت پاسخ به چرایی بالا بودن تراکم در مناطق موردنظر و نیز میزان تأثیر شاخص‌های موردبررسی در این میزان تراکم، استفاده شد؛ بنابراین برای شاخص‌هایی که بالاترین تأثیر را بر تراکم بالای زلزله‌ها دارد، تحلیل رگرسیون حداقل مربعات را انجام می‌دهیم. خروجی حاصل از نتیجه‌ی OLS در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲: نتایج حاصل از مدل OLS برای متغیر فاصله از گسل

پارامترهای مدل	OLS
ضریب تعیین تصحیح‌شده	۰,۰۷۶
آماره‌ی موران	۰,۳۸۷
ضریب اطمینان آماره‌ی کوانکر	۰,۱۹
VIF	۲,۲۶
ضریب اطمینان آماره‌ی جارکوبرا	۳۹۵,۶۶
معیار Akaike	۲۶۸,۲۷

منبع: (یافته‌های تحقیق)

از آنجاکه داده‌های فضایی یک متغیر نمی‌تواند تأثیر صددرصدی بر متغیر دیگر داشته باشد، بنابراین در مرحله‌ی بعدی تحلیل OLS از شاخص‌های مؤثر در متغیر وابسته انجام شد. در تحلیل OLS نتایج به دو صورت predictions over/under با دو رنگ متفاوت نشان داده می‌شود. در predictions under پیش‌بینی مدل کم‌تر از مقدار واقعی موجود است و با رنگ قرمز و در over predictions پیش‌بینی مدل بیش‌تر از مقدار واقعی موجود است و با رنگ آبی قابل نمایش است. در صورت مواجهه با آن باید به دنبال تأثیرگذاری سایر شاخص‌ها باشیم. بدین منظور، آماره‌ی موران برای شاخص‌های تأثیرگذار محاسبه گردید که در جدول (۳) نتایج خروجی از آماره‌ی موران نمایش داده شده است. در ابتدا خودهمبستگی فضایی موران برای همه متغیرهای تحقیق مورد محاسبه قرار گرفت. ارزش موران بین ۱- و ۱+ متغیر است. ارزش نزدیک به ۱+ نشان می‌دهد که به‌طور کلی نواحی دارای ارزش‌های مشابه (بالا یا پایین) دارای الگوی خوشه‌ای هستند و ارزش نزدیک به ۱- نیز بیانگر نواحی دارای ارزش‌های غیرمشابه و ارزش صفر نیز نشان‌دهنده‌ی الگویی تصادفی است. با توجه به نتایج، همه‌ی متغیرها دارای الگوی توزیع خوشه‌ای بوده و مقدار Moran's I به‌دست آمده در آن‌ها نزدیک به ۱+ است (جدول ۳).

جدول ۳: متغیرهای مورد استفاده و نتایج خودهمبستگی فضایی بر اساس شاخص موران

متغیر	نوع متغیر	Moran's I	Expected I	z-score	p-value	pattern
شدت	وابسته	-۰,۰۲۱۰۵۸	-۰,۰۰۵۸۱۴	۰,۵۸۲۴۱۹	۰,۵۶۰۲۸۴	Random
فاصله از زمین‌های بایر	مستقل	۰,۴۳۲۴۷۶	-۰,۰۰۵۸۱۴	۱۵,۷۲۷۱۹۱	۰,۰۰۰۰۰۰	clustered
فاصله از جنگل‌ها و مراتع	مستقل	۰,۵۷۶۰۷۳	-۰,۰۰۵۸۱۴	۲۰,۸۱۰۷۴۵	۰,۰۰۰۰۰۰	clustered
فاصله از گسل‌ها	مستقل	۰,۸۷۳۶۵۶	-۰,۰۰۵۸۱۴	۱۴,۱۳۱۴۰۸	۰,۰۰۰۰۰۰	clustered
تراکم گسل‌ها	مستقل	۰,۸۵۱۸۱۴	-۰,۰۰۵۸۱۴	۱۱,۰۱۷۱۳۵	۰,۰۰۰۰۰۰	clustered
فاصله از باغات	مستقل	۰,۶۷۷۷۸۹	-۰,۰۰۵۸۱۴	۲۴,۴۷۸۳۵۴	۰,۰۰۰۰۰۰	clustered

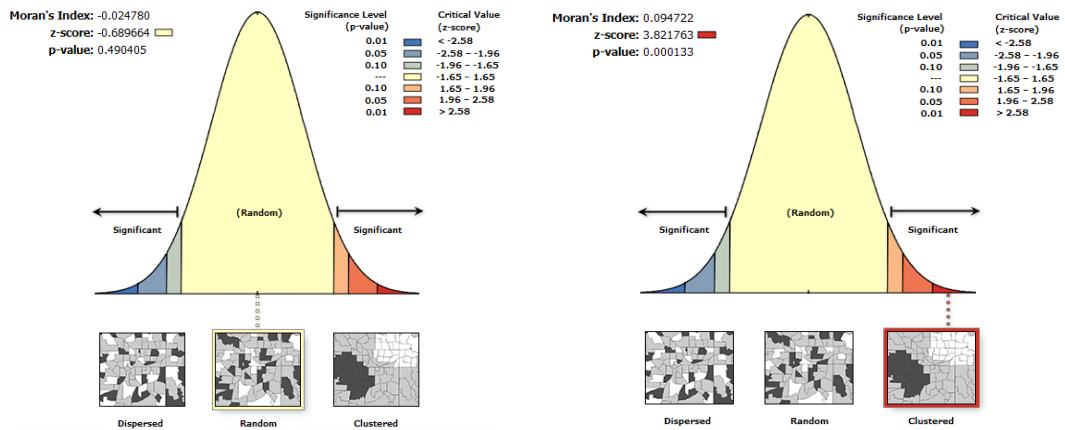
pattern	p-value	z-score	Expected I	Moran's I	نوع متغیر	متغیر
clustered	۰,۰۰۰۰۰۰	۱۰,۰۲۱۸۰۵	-۰,۰۰۵۸۱۴	۰,۵۷۳۵۳۷	مستقل	شیب
clustered	۰,۰۰۰۰۰۰	۲۷,۹۱۱۸۸۰	-۰,۰۰۵۸۱۴	۰,۷۷۶۹۹۹۷	مستقل	نقاط ارتفاعی
clustered	۰,۰۰۰۰۰۰	۲۱,۰۹۷۸۰۸	-۰,۰۰۵۸۱۴	۰,۵۸۲۲۸۴	مستقل	فاصله از شهرها

منبع: (یافته‌های تحقیق)

در مورد این ابزار باید به این نکته توجه داشت که فرضیه‌ی صفر آن است که "هیچ نوع خوشه‌بندی فضایی بین مقادیر خصیصه مرتبط با عوارض جغرافیایی موردنظر وجود ندارد". زمانی که مقدار P-value بسیار کوچک و مقدار Z محاسبه‌شده (قدر مطلق آن) بسیار بزرگ باشد (خارج از محدوده‌ی اطمینان قرار گیرد)، آنگاه می‌توان فرضیه‌ی صفر را رد کرد. اگر مقدار شاخص موران بزرگ‌تر از صفر باشد، داده‌ها نوعی خوشه‌بندی فضایی را نشان می‌دهند. اگر مقدار شاخص کم‌تر از صفر باشد، عوارض مورد مطالعه دارای الگوی پراکنده می‌باشند، بنابراین مشاهده می‌شود که همه‌ی شاخص‌های مذکور الگوی فضایی خوشه‌ای دارند و فرض صفر مبتنی بر وجود خودهمبستگی مکانی تأیید می‌شود و در نتیجه می‌توان از همه‌ی شاخص‌های مذکور جهت آنالیز استفاده کرد.

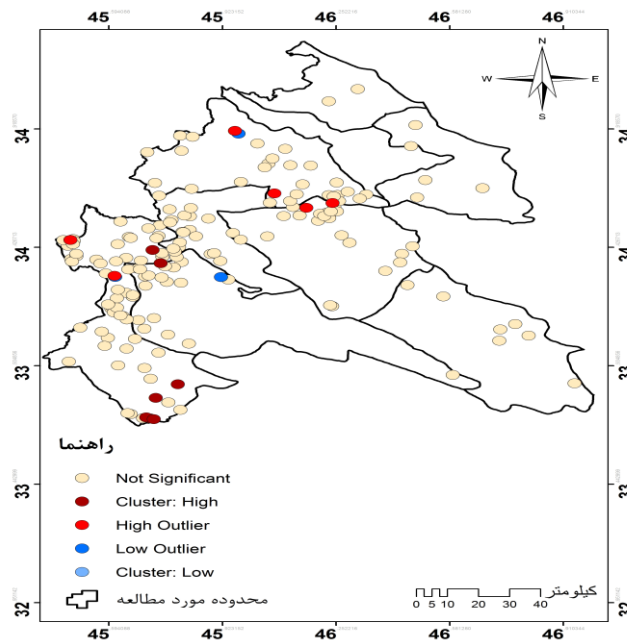
آن‌گونه که در جدول (۳) مشاهده می‌شود الگوی توزیع متغیر شدت زلزله با استفاده از آماره‌ی موران از نوع الگوی خوشه‌ای است. چنانچه ملاحظه می‌شود مقدار شاخص موران در این تحلیل ۰/۰۲۱۰۵۸ است و از آنجایی که مقدار آن منفی است، لذا می‌توان نتیجه گرفت که داده‌ها دارای عدم خودهمبستگی فضایی هستند. همچنین با استناد به پایین بودن امتیاز استاندارد Z (-۰,۵۸۲۴۱۹) و بالا بودن مقدار P-value (۰,۵۶۰۲۸۴) می‌توان فرضیه‌ی وجود خودهمبستگی فضایی بین توزیع متغیر شدت زلزله در پهنه‌ی مورد مطالعه را تأیید نمود.

پس از اندازه‌گیری میزان معناداری شدت زلزله توسط شاخص موران، با استفاده از تحلیل خوشه و تک‌دانه و تحلیل لکه‌های داغ، نقشه‌های خوشه‌بندی تهیه گردید. در واقع با استفاده از این ابزارها می‌توان مکان‌هایی را که در آن‌ها لکه‌های داغ، سرد و تک‌دانه فضایی معنادار از نظر آماری وجود دارند، مشخص نمود. تحلیل خوشه و ناخوشه که به شاخص انسلین محلی موران (Anselin Local Moran's I) نیز شناخته می‌شود، از ابزارهای مفید برای نمایش توزیع آماری پدیده‌ها در فضا است. به عبارتی میزان توزیع و تفاوت پراکنش عوارض جغرافیایی با استفاده از این ابزار حاصل می‌گردد. در شکل (۱۰) نمایش گرافیکی نتایج آماره‌ی موران برای متغیر عمق زلزله‌های رخ داده نشان داده شده است و بر اساس نتایج موجود در شکل مذکور مقدار P-value (۰,۰۰۰۱۳۳) و Z (۳/۸۲) است؛ بنابراین بیانگر عدم خودهمبستگی فضایی برای عمق است. نتایج آماره‌ی موران برای عمق زلزله (شکل ۱۱) با توجه به بالا بودن میزان P-value (۰/۴۹) و پایین بودن Z (-۰/۶۸) خودهمبستگی فضایی را برای شدت زلزله تأیید می‌کند.



شکل ۱۰: نمایش گرافیکی نتایج آماری موران (متغیر عمق زلزله‌های رخ داده) / شکل ۱۱: نمایش گرافیکی نتایج آماری موران (متغیر شدت زلزله‌های رخ داده)

در شکل (۱۲) نقشه‌ی خوشه‌بندی نقاط زلزله نشان داده شده است. مناطق با خوشه‌بندی بالا در نواحی غرب و جنوب غربی منطقه‌ی مورد مطالعه و با رنگ قرمز و نیز نقاط دارای ناخوشه‌های خیلی بالا با رنگ صورتی در نواحی مرکزی و نیز در غرب محدوده‌ی مطالعاتی قابل‌رؤیت هستند. نقاط بی‌رنگ که اکثر منطقه را در بر گرفته‌اند، مناطقی هستند که هیچ خوشه‌بندی برای آن‌ها تعریف نشده است.



شکل ۱۲: نقشه‌ی خوشه‌بندی آماری موران بر اساس عمق

بر اساس نتایج موجود در جدول (۴)، VIF تمام متغیرها از ۷/۵ کم‌تر است و بر این مبنی نیازی نیست که هیچ‌کدام از آن‌ها حذف شوند و همگی آن‌ها متغیرهای مستقل اصلی هستند؛ اما مسئله‌ای که وجود دارد، بررسی عدد جاکوبرا است که به وسیله‌ی آن ارتباط بین متغیر مستقل و وابسته بررسی می‌شود. عدد جاکوبرا جهت تحلیل عدد معنی‌دار محاسبه شده و بیانگر این مطلب است که برای این تحلیل احتیاج به بررسی متغیرهای مستقل بیش‌تری در این زمینه وجود دارد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان مدل رگرسیون جغرافیایی را برای این متغیرها اجرا نمود.

جدول ۴: نتایج حاصل از مدل OLS

ضریب تعیین تصحیح شده	آماره‌ی کوانکر	Akaika معیار	VIF	آماره‌ی موران	آماره‌ی جاکوبرا	پارامترهای مدل متغیرها
-۰/۰۰۲	۰/۴۵۵	۲۵۷/۷۶	۱/۰۷۶	۰/۰۸۰	۳۸۱/۹۸	عمق زلزله
۰/۰۰۹	۰/۱۹۵	۲۵۵/۶۱	۲/۲۷۲	۰/۸۷۳	۳۹۵/۶۶	فاصله از گسل
۰/۰۰۵	۰/۰۰۴	۲۵۸/۲۶	۲/۳۳۷	۰/۸۵۱	۳۶۴/۸۶	تراکم گسل
۰/۰۰۱	۰/۵۰۵	۲۵۷/۱۲	۱/۷۵۶	۰/۵۷۳	۳۶۶/۳۴	شیب
۰/۰۰۹	۰/۱۰۴	۲۵۵/۶۷	۳/۷۲۱	۰/۷۷۶	۳۸۴/۴۹	نقاط ارتفاعی
-۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۲۵۷/۵۱	۱/۵۵۳	۰/۶۷۷	۳۸۷/۰۴	فاصله از باغ
-۰/۰۰۱	۰/۱۳۱	۲۵۷/۵۳	۲/۶۵۱	۰/۵۷۶	۳۹۸/۷۰	فاصله از جنگل
۰/۰۰۲	۰/۱۹۷	۲۵۶/۸۲	۲/۲۶۳	۰/۴۳۲	۴۲۳/۷۹	فاصله از زمین‌های بایر
-۰/۰۰۴	۰/۰۴۷	۲۵۸/۱۴	۱/۱۹۸	۰/۵۳۵۱	۳۷۳/۵۷	تراکم زلزله
۰/۰۰۶	۰/۰۰۴	۲۵۶/۲۰	۱/۷۶۲	۰/۵۸۲	۴۰۸/۵۵	فاصله از شهر

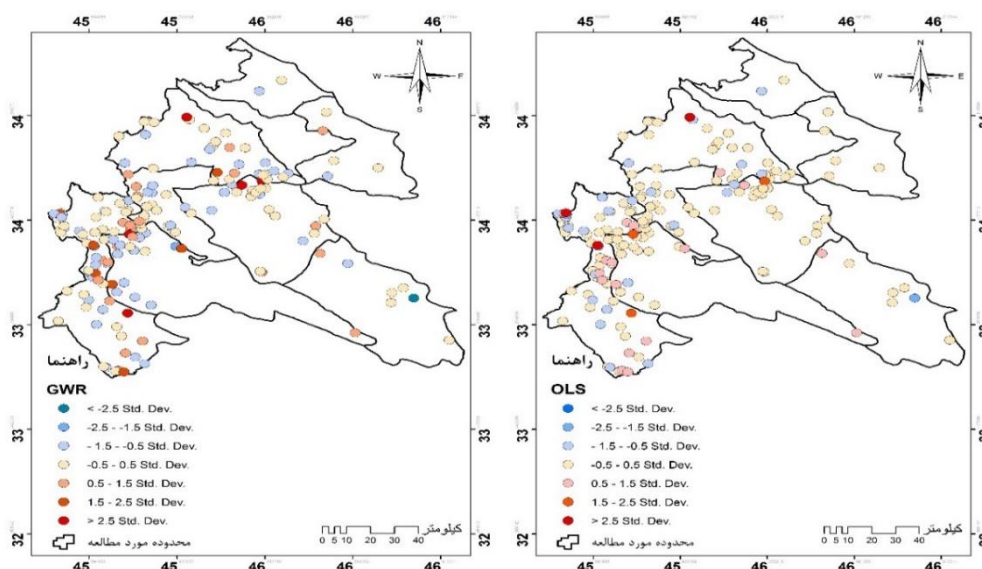
منبع: (یافته‌های تحقیق)

در حالت کلی رگرسیون مربعات معمولی (جدول ۵) مقدار مجموع مربعات باقی‌مانده‌ی حاصل از مدل $40,636,762$ و مقدار مربعات باقی‌مانده‌ی تعدیل‌شده $0,010545$ است، اما زمانی که مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی به کار گرفته می‌شود، مقدار مجموع مربعات باقی‌مانده‌ی حاصل از مدل $27,724,563$ و مربعات باقی‌مانده‌ی تعدیل‌شده $0,015921$ است. اولین خروجی حاصل اجرای مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی بر روی متغیر وابسته و متغیرهای مستقل، اطلاعات عمومی مربوط به مدل است. مهم‌ترین مقادیر در این خروجی، مقادیر R^2 و R^2 تعدیل‌شده است که نشان‌دهنده‌ی تناسب و دقت مدل مورد استفاده است. هرچقدر این مقادیر به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، به معنای آن است که متغیرهای مستقل مورد استفاده توانسته‌اند به خوبی تغییرات متغیر وابسته را توضیح دهند. همچنین هر چقدر R^2 تعدیل‌شده (به‌عنوان شاخص خوبی انطباق) افزایش یابد و به دنبال آن مقدار مجموع مربعات باقی‌مانده کاهش یابد، این امر نشان‌دهنده‌ی کاهش خطا و افزایش دقت در برآورد متغیر وابسته در مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی است. مقدار R^2 و R^2 تعدیل‌شده در این پژوهش به ترتیب $0,06608$ و $0,010545$ است که نشان‌دهنده‌ی دقت قابل‌قبول متغیرهای پژوهش حاصل در مدل‌سازی روابط فضایی عوامل مؤثر بر تأثیرپذیری زلزله است. در واقع مقدار مربعات باقی‌مانده‌ی تعدیل‌شده (به‌عنوان شاخص خوبی انطباق) از $0,06608$ به $0,010371$ افزایش داشته و مقدار مجموع مربعات باقی‌مانده از $40,636,762$ به $27,724,563$ کاهش یافته است. این امر نشان‌دهنده‌ی کاهش خطا و افزایش دقت در برآورد متغیر وابسته و بیانگر برتری مدل رگرسیون وزن‌دار فضایی در این زمینه است. این اطلاعات در جدول (۵) آورده شده است. در شکل (۱۳) و (۱۴) به ترتیب نقشه‌ی رگرسیونی حداقل مربعات معمولی (OLS) و رگرسیونی وزنی جغرافیایی (GWR) آورده شده است.

جدول ۵: اطلاعات عمومی مربوط به رگرسیون وزنی جغرافیایی و رگرسیون معمولی مربوط به متغیر شدت زلزله

پارامترها	OLS	GWR
طول باند	۱,۳۹۰۹۰۳	۱,۰۲۵۸۴۱
مجموع مربعات باقی‌مانده	۴۰,۶۳۶۷۶۲	۲۷,۷۲۴۵۶۳
تعداد متغیرهای تأثیرگذار	۱۴,۰۴۱۸۸۷	۱۵۷,۵۵۹۲۴۱
sigma	۰,۵۰۵۶۱۳	۰,۴۱۶۶۶۶
AICc	۲۷۰,۱۷۹۰۹۷	۱۰۳,۲۸۱۵۵۳
R2	۰,۰۶۶۰۸	۰,۱۰۳۷۱
R2 تعدیل شده	-۰,۰۱۰۵۴۵	۰,۰۱۵۹۲۱

منبع: (یافته‌های تحقیق)



شکل ۱۳: نقشه‌ی رگرسیونی حداقل مربعات معمولی (OLS) شکل ۱۴: نقشه‌ی رگرسیونی وزن‌دار جغرافیایی (GWR)

۵- نتیجه‌گیری

بررسی آماری زلزله‌های رخ داده در منطقه‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد که در دوره‌ی مورد بررسی ۱۷۳ زلزله با قدرت بیش از ۳ ریشتر در منطقه رخ داده است که از این تعداد بیش از ۱۲ درصد (۲۲ مورد) زلزله‌های با قدرت بیش از ۵ ریشتر (زلزله‌های شدید) بوده است. بزرگ‌ترین زلزله‌ی رخ داده در منطقه در تاریخ ۱۳۹۶/۰۸/۲۱ با قدرت ۷,۳ ریشتر بوده است. الگوی توزیع فضایی زلزله‌های رخ داده با استفاده از آماره‌ی موران نشان داد که پراکنش داده‌ها از نوع الگوی خوشه‌ای بوده است. جهت ارزیابی رابطه‌ی بین کاربری اراضی و زلزله‌های رخ داده از مدل‌های GWR و OLS استفاده گردید. روش رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی روشی آماری است که برای مطالعه‌ی الگوهای موضعی سازگار شده است. این روش در واقع فنی آماری محلی است که ارتباطات بین متغیرهای فضایی را در یک فضای غیر پایایی فرض شده تحلیل می‌کند و یکی از اهداف آن، رفع محدودیت‌های موجود در مدل OLS است. در این پژوهش تلاش شد تا تأثیر چند شاخص بر الگوی فضایی زلزله‌های منطقه‌ی مورد مطالعه بیان شود. این شاخص‌ها همه‌ی شاخص‌های تأثیرگذار بر عامل شدت زلزله نبودند؛ چراکه با معنی‌دار شدن عدد جاکوبرا می‌توان فهمید باید در این تحلیل

متغیرهای مستقل بیش‌تری را در این تحلیل دخیل دانست، اما با توجه به اطلاعات در دسترس به بررسی ارتباط ده پارامتر از جمله عمق زلزله‌ها، فاصله از گسل‌ها، تراکم گسل‌ها، شیب، نقاط ارتفاعی، فاصله از باغ، فاصله از جنگل، فاصله از زمین‌های بایر، فاصله از شهر و تراکم زلزله پرداخته شد؛ و از آنجایی که مقدار آن منفی است، لذا می‌توان نتیجه گرفت که داده‌ها دارای عدم خودهمبستگی فضایی هستند. طبق مدل OLS تمام متغیرهای مورد استفاده متغیرهای اصلی و تأثیرگذار بوده‌اند اما عدد VIF به دست آمده برای متغیرها نشان‌دهنده‌ی این است که احتیاج به بررسی متغیرهای مستقل بیش‌تری وجود دارد؛ اما طبق مدل GWR مقدار مربعات باقی‌مانده‌ی تعدیل شده که نشان‌دهنده‌ی شاخص خوبی انطباق می‌باشند، بیانگر کاهش خطا و افزایش دقت در برآورد متغیر وابسته و بیانگر برتری مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی نسبت به مدل حداقل مربعات است. نتایج حاکی از آن است میزان شدت زلزله ارتباط مستقیمی با شاخص‌های تراکم گسل، فاصله از گسل و ارتفاع دارد و کم‌ترین ارتباط را با فاصله از زمین‌های بایر و کاربری فاصله از باغات و کاربری فاصله از جنگل نشان داد.

۶- منابع

- ۱- احمدآبادی، علی، قاسمی، کیمیا (۱۳۹۵). کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در ارزیابی آسیب‌پذیری مسکن شهری در برابر زلزله با روش E-VIKOR (مطالعه‌ی موردی: منطقه‌ی ۹ شهرداری تهران)، دو فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی مدیریت بحران، شماره‌ی ۹، صص ۱۱۱-۱۰۳.
- ۲- امیریان، سهراب (۱۳۹۷). بررسی الگوی فضایی آسیب‌پذیری شهرها از زلزله و پیشنهاد الگوی بهینه (نمونه‌ی موردی: شهر کرمانشاه)، فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی نگرش‌های نو در جغرافیای انسانی، سال دهم، شماره‌ی سوم، صص ۳۹-۲۴.
- ۳- امینی، الهام (۱۳۸۴). تبیین مفهوم بافت شهری و نقش آن در کاهش خطرات ناشی از زلزله، خلاصه مقالات کنفرانس بین‌المللی زمین، بلایای طبیعی و راهکارهای مقابله با آن، دانشگاه تبریز، صص ۱۰۳-۸۳.
- ۴- انوری، نعمت‌الله، بورقانی فراهانی، سهیلا (۱۳۹۴). ارائه‌ی الگوی راهبردی توسعه‌ی امنیت ساختمان‌ها در برابر زلزله، مدیریت فردا، شماره‌ی ۱۳، پیاپی ۴۵، صص ۱۲۹-۱۱۷.
- ۵- پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، قابل دسترس در سایت اینترنتی: <http://www.iiees.ac.ir>
- ۶- تقوایی، مسعود، حسینی‌نژاد، اردلان (۱۳۹۴). ارزیابی آسیب‌پذیری کالبدی عملکردی سازمان‌های متولی مدیریت بحران شهر شیراز، شهر پایدار، دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۱، صص ۱۹۹-۱۷۶.
- ۷- حسین‌خواه، مریم، عرفانین، مهدی، علیجانپور، احمد (۱۳۹۵). مدل‌سازی آثار کاربری اراضی روی پارامترهای کیفیت آب با روش‌های رگرسیون چند متغیره OLS و GWR در حوضه‌های آبخیز استان فارس، محیط‌شناسی، دوره‌ی ۴۲، شماره‌ی ۲، صص ۲۷۳-۲۵۳.
- ۸- خدادادی، فاطمه، انتظار، مژگان، ساسان‌پور، فرزانه (۱۳۹۹). تحلیل آسیب‌پذیری شهری در برابر مخاطره‌ی زلزله با روش FUZZY ELECTRE (مطالعه‌ی موردی: کلان‌شهر کرج)، نشریه‌ی تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، دوره‌ی ۲۰، شماره‌ی ۵۶، صص ۱۱۳-۹۳.
- ۹- دوستی، افسانه، اسدیان زرگر، نعیمه، محتاط، نیلوفر (۱۳۹۴). برنامه‌ی بازترانی کالبدی زلزله‌ی احتمالی استان تهران و البرز با رویکرد کاهش آسیب‌پذیری در مناطق شهری، فصلنامه‌ی دانش پیشگیری و مدیریت بحران، دوره‌ی ۵، شماره‌ی ۳، صص ۲۲۰-۲۱۰.
- ۱۰- زارعی، سعید، اشک‌پور مطلق، شبیر، فدعمی، مهشید (۱۴۰۰). بررسی ناهمسانی لرزه‌ای پهنه‌ی خوزستان در جنوب باختری زاگرس، فصلنامه‌ی علمی علوم و مهندسی زلزله، دوره‌ی ۸، شماره‌ی ۲، صص ۱۷.
- ۱۱- شمشیری، سجاد، شهبازی، حبیب، تقی‌پور جاوی، شهاب‌الدین (۱۳۹۶). تحلیل ارتباطات بین متغیرهای فضایی در دشت خان میرزا: الگوی رگرسیون وزنی جغرافیایی و الگوی حداقل مربعات معمولی، جغرافیا و توسعه، شماره‌ی ۴۸، سال ۱۵، صص ۱۱۳-۹۵.
- ۱۲- عرفانین، مهدی، حسین‌خواه، مریم، علیجانپور، احمد (۱۳۹۲). مقدمه‌ای بر روش‌های رگرسیونی چندمتغیره در مدل‌سازی مکانی اثرات کاربری اراضی بر کیفیت آب، نشریه‌ی ترویج و توسعه‌ی آبخیزداری، سال اول، شماره‌ی ۱، صص ۶۱-۳۳.

- ۱۳- فاطمی عقدا، سیدمحمود، مهدوی‌فر، محمدرضا، باقری، وحید (۱۳۹۰). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله‌ی ۱۳۷۵ سرعین، ایران با استفاده از روش‌های کیفی و کمی، نشریه‌ی زمین‌شناسی مهندسی، جلد هفتم، شماره‌ی یک، صص ۱۶۶۸-۱۶۳۹.
- ۱۴- قهرودی تالی، منیژه، پورموسوی، سیدموسوی، خسروی، سمیه (۱۳۹۱). بررسی پتانسیل تخریب لرزه‌خیزی با به‌کارگیری مدل‌های چند شاخصه (محدوده‌ی مورد مطالعه: منطقه‌ی یک شهر تهران)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره‌ی ۳، صص ۶۸-۵۷.
- ۱۵- کریمیان، تقی، فرجی سبک‌بار، حسنعلی، پوراحمد، احمد (۱۳۹۴). بررسی ارتباط میان جاذبه‌های گردشگری و کاربری اراضی با استفاده از مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (مطالعه موردی شهر اصفهان)، گردشگری شهری، دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۱، صص ۱۶-۱.
- ۱۶- کریمی، حمیدرضا (۱۳۸۹). شناسایی عوامل مؤثر بر مدیریت منابع مدیریت انسانی در مهار (پیشگیری، کاهش اثرات، مقابله) بحران زلزله در بیمارستان امام سجاد ناجا، امداد و نجات، شماره‌ی ۱، صص ۸۴-۷۱.
- ۱۷- کریمی کردآبادی، مرتضی، نجفی، اسماعیل (۱۳۹۴). ارزیابی خطر زلزله با استفاده از مدل ترکیبی FUZZY-AHP در امنیت شهری (مطالعه‌ی موردی: منطقه‌ی یک کلان‌شهر تهران)، مجله‌ی پژوهش و برنامه‌ریزی شهری، سال ششم، شماره‌ی بیستم، صص ۳۴-۱۷.
- ۱۸- محدودی‌فر، یوسف، اعظمی، محسن، فیض‌آبادی، پریا (۱۳۹۹). طراحی مدل بومی مدیریت بحران سوانح گسترده‌ی طبیعی (مطالعه‌ی موردی: زلزله‌ی کرمانشاه)، فصلنامه‌ی دانش پیشگیری و مدیریت بحران، دوره‌ی دهم، شماره‌ی دوم، صص ۱۸۶-۱۷۷.
- ۱۹- مهدوی عادل، مهدی، جزایری مقدس، سیدمحمود (۱۳۹۰). تحلیل و ارزیابی خطر زلزله در مناطق مختلف شهر مقدس مشهد، سومین کنفرانس برنامه‌ریزی و مدیریت شهری، صص ۷۶.
- 20- Patrick Meunier, Niels Hovius, John Allan, Haines (2020). Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 275, Issues 3–4, 15 November 2020, Pages 221-232.
- 21- ZALI, N, and S. R. AZADEH (2014). An Investigation of Ahar-Varzeghan Seismicity on August 11, 2012 in the North West of Tabriz, Iran. *Journal of Sustainability Science and Management*, 1:78-89.
- 22- Maurel, Agnes, Guenneau, Sebastien. (2017). Conversion of love waves in a forest of trees; cornell university, 23(3).
- 23- Brown, S, Versace, V. L, Laurerson, L, Fawcett, J & Salzman, S (1996). Geographically weighted regression: A Method for Exploring Spatial NonStationarity. *Geographical Analysis*, 24 (4), 281- 298.
- 24- Su, S, Xiao, R, & Xiao, Y. (2012). Multi-scale analysis of spatially varying relationships between agricultural landscape patterns and urbanization using geographically weighted regression. *Applied Geography*, 32 (3), 360-375
- 25- Tu, J (2011). Spatially varying relationships between land use and water quality across an urbanization gradient explored by geographically weighted regression. *Applied Geography*, 31(1), 376-392.
- 26- Li, H, T. Yi, M. GU, and L. Huo.(2009). Evaluation of earthquake-induced structural damages by wavelet transform. *Progress in Natural Science*, 4: 461 -470. doi:10.1016/j.pnsc.2008.09.002.
- 27- Yazdani, A.; and M. Kowsari. (2011). Statistical prediction of the sequence of large earthquakes in Iran. *International Journal of Engineering-Transactions B: Applications*, 4: 325. doi:10.5829/idosi.ije.2011.24.04b.03.