طراحی چارچوبی جامع به منظور تهیه نقشه خطرپذیری زلزله شهر مشهد

ادریس مظلوم‌زاده[۱]، فاطمه فرخی کاشانی[۲]، مجتبی طالبیان شریف[۳]

۱- مدیرعامل شرکت بهین ره‌آورد بهبود، کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس تهران

۳- مدیر IT شرکت بهین ره‌آورد بهبود، کارشناسی ارشد مهندسی صنایع

چکیده

کلانشهر مشهد دومین شهر ایران از نظر مساحت و جمعیت می‌باشد. با توجه به اینکه این شهر از شرق و جنوب شرقی با یک گسل به طول حدود ۱۰۰ کیلومتری تقریبا ۲۰ کیلومتر و از جنوب و جنوب غربی با گسلی به طول حدود ۹۰ کیلومتر کمتر از ۲ کیلومتر فاصله دارد، از مناطق آسیب‌پذیر محسوب می‌شود؛ به همین دلیل بررسی خطرپذیری لرزه‌ای شهر مشهد از اهمیت بسزایی برخوردار است.

زلزله پدیده‌ای غیرقابل پیش‌بینی است اما با برنامه‌ریزی صحیح، عواقب آن قابل پیش‌گیری است. نقشه خطرپذیری زلزله شهر مشهد می‌تواند در راستای کمک به برنامه‌ریزی‌های مدیران و مسئولین شهری مورد استفاده قرار گیرد و با برنامه‌ریزی صحیح پیش از وقوع حوادث ناگوار، گام خطیری در کاهش تلفات جانی، مالی، اجتماعی و ... بردارد. در این پژوهش، با استفاده از تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (به طور خاص فرایند تحلیل سلسله مراتبی گروهی) و همچنین پردازش‌های جغرافیایی، اقدام به تهیه نقشه خطرپذیری زلزله شده است. در نهایت جهت اعتبارسنجی و بررسی تاثیر شاخص‌های در نظر گرفته شده، تحلیل حساسیت برای تمامی معیارها صورت پذیرفته است. نتایج حاکی از پوشش خطر خیلی زیاد و زیاد در ۴۸٪ مساحت شهر مشهد می‌باشد که گواهی مستدل بر اهمیت توجه به موضوع پژوهش است.

کلمات کلیدی: نقشه خطرپذیری، زلزله، مدیریت بحران، سیستم اطلاعات جغرافیایی، تصمیم‌گیری چندمعیاره

۱. مقدمه

مخاطرات طبیعی نظیر سیل، زلزله و ... در طول دوران حیات کره زمین همواره وجود داشته است. بر اساس آمار موسسه زمین‌شناسی آمریکا USGS[1]، سالانه به‌طور متوسط حدود ۱۴۴۴۶۹ زلزله با بزرگی بیش از دو در مقیاس امواج درونی زمین در دنیا رخ می‌دهد که بزرگی ۱۴۴۶۹ زمین‌لرزه بیش از سه ریشتر و بزرگی حدود ۱۴۷۰ زمین‌لرزه، بیش از پنج ریشتر است [۱]. در طول قرن بیستم حدود ۱۱۰۰ زلزلهٔ مرگبار در ۷۵ کشور جهان رخ داده و علاوه بر خسارات مادی عظیم، حداقل ۱,۵ میلیون نفر جان خود را بر اثر این رویداد طبیعی از دست داده‌اند [۲]. اهمیت بسیاری از مخاطرات طبیعی به‌گونه‌ای است که برای پیش‌بینی مکان وقوع، شدت و دامنه اثرگذاری آن‌ها، نیازمند لایه‌های مختلف اطلاعاتی می‌باشیم. نواحی آسیب‌پذیر شهرها از جمله مناطقی هستند که می‌توان با شناخت، پهنه‌بندی و سیاست‌گذاری درست در آن‌ها زمینه کاهش اثرات منفی ناشی از مخاطرات را فراهم آورد [۳]. این موضوع به ویژه در ایران که جزو زلزله‌خیزترین کشورهای جهان محسوب می‌شود، از اهمیت بسزایی برخوردار است. طبق آمار رسمی ۱۷,۶ درصد از زلزله‌های مخرب جهان به کشور ما تعلق دارد. بر پایه آمارهای رسمی، هر ۱۰ سال یک زمین لرزه با بزرگی بیش از ۷ ریشتر و هر سال ۱,۳ زمین لرزه با بزرگی بین ۶ تا ۷ ریشتر و ۱۰ زمین لرزه با بزرگی ۵ تا ۶ ریشتر در ایران روی داده است که باعث گردیده در ۲۵ سال گذشته، ۶ درصد از تلفات جانی کشور ناشی از زلزله باشد. پهنه‌بندی نقشه‌های زمین‌لرزه‌خیزی در ایران نشان می‌دهد بیش از دو سوم وسعت کشور در محور زمین‌لرزه‌خیز پرخطری قرار گرفته که بیشتر شهرهای پرجمعیت نیز در راستای آن استقرار یافته اند؛ یعنی مناطقی که بیشتر تحت تاثیر فعالیت گسل‌اند و شدت عمق کانون زمین‌لرزه در آنها نیز کم عمق و سطحی است. تا جایی که ۹۰ درصد شهرهای کشور در برابر یک زلزلهٔ ۵,۵ ریشتری آسیب‌پذیر گشته‌اند. با در نظر گرفتن طول گسل‌های فعال کشور و منطقهٔ خطر آنها (۲۰ کیلومتر اطراف گسل ها)، ۳۵ درصد از مساحت ایران با خطر جدی زمین لرزه مواجه است [۴].

با توجه به اینکه شهر مشهد از شرق و جنوب شرقی با یک گسل بـه طـول حدود ۱۰۰ کیلومتری تقریبا ۲۰ کیلومتر و از جنوب و جنوب غربی با گسلی به طول حدود ۹۰ کیلومتر کمتر از ۲ کیلـومتر فاصله دارد، از مناطق آسیب‌پذیر محسوب می‌شود. بررسی زمین لرزه‌های منطقه حکایت از فعالیت‌های شدید در قرن‌های گذشته، به ویژه در قرن هجدهم میلادی و برقراری آرامش نسبی بعد از آن دارد. شهر مشهد دومین شهر پهناور و پرجمعیت ایران است و قطب گردشگری مذهبی کشور محسوب می‌شود، هر ساله بیش از ۲۰ میلیون زائر و گردشگر به شهر مشهد وارد می‌شوند که باعث تراکم بیشتر جمعیتی در این شهر می‌گردند، در صورت احتمال وقوع زلزله خسارات زیاد و غیرقابل جبرانی بر جا خواهد ماند و ریسک سرمایه انسانی و مالی زیادی در میان خواهد بود و در صورت بحران، ایـن شرایط می‌تواند فاجعهٔ انسانی را دامن بزند [۴] و [۱].

۲. پیشینه پژوهش

در پژوهش [۵] با بهره گیری از مدل FAHP در محیط GIS اقدام به تفکیک سطوح خطرپذیر منطقه شده است. عوامل مؤثر در این مدل شامل فاصله داشتن از: گسل، میزان تراکم عبور و مرور، معابر، فضای باز، مراکز درمانی، مراکز اصلی شهر، ایستگاه‌های آتش نشانی، ایستگاه‌های پمپ بنزین، اماکن نظامی، خدمات اجتماعی، کیفیت ابنیه و تراکم جمعیت است. در این تحقیق پس از استانداردسازی لایه‌های مؤثر به روش فازی، اقدام به تعیین درجهٔ خطرپذیری سطوح منطقهٔ ۱ اهواز به روش FAHP شده است.

در پژوهش [۶] ۱۰ معیار موثر در امر مکان یابی مناطق خطرپذیر در حین وقوع بحران در نظر گرفته شده است که از جمله‌ی آن می‌توان به فاصله از مراکز خطر مانند ایستگاه های پمپ بنزین، خطوط نیرو مانند آب، گاز و غیره، تراکم جمعیت، فاصله از گسل، فاصله از مراکز نظامی، فاصله از مراکز درمانی و بیمارستان‌ها، فاصله از ایستگاه آتش نشانی و ... اشاره نمود. سپس با توجه به معیارهای مذکور، جهت مدیریت بافت های فرسوده و کاهش خسارات وارده در حین وقوع بحران، اطلاعاتی نظیر نقشه کاربری اراضی، گسل، تراکم جمعیت و ... تهیه شده است؛ سپس کاربری محدوده ی مورد مطالعه در محیط GIS، از کل نقشه تفکیک شده و در نتیجه به منظور استخراج لایه های مربوط به مراکز اداری، تجاری، تراکم جمعیتی، معابر، کیفیت ابنیه و سایر لایه ها، استفاده شده است. در نهایت لایه‌های جغرافیایی هر معیار تهیه و پس از استانداردسازی لایه‌ها، با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی[2] نقشه نهایی تهیه شده است.

در پژوهش [۷] مشابه گام‌های پژوهش [۶] عمل شده است، با این تفاوت که پس از گام استانداردسازی لایه‌ها، از مدل همپوشانی وزن‌دار استفاده شده است و نقشه نهایی ایجاد شده است.

---

[1] United States Geological Survey
[2] AHP

در پژوهش [۸]، از منطق Fuzzy با تلفیق AHP و TOPSIS در محیط ArcGIS استفاده شده است. در این پژوهش ۱۰ معیار از جمله فاصله از مراکز خطرزا، تراکم ساختمانی، فاصله از گسل، تراکم جمعیتی، دسترسی به مراکز امدادی و ضروری، جنس بستر و ... در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، ابتدا داده‌های آماری لازم جمع‌آوری شدند، سپس لایه‌های لازم برای پهنه‌بندی لرزه‌ای آماده شده و وزن‌دهی به لایه‌ها، براساس استانداردهای پهنه‌بندی انجام گرفته است. تحلیل نهایی با استفاده از تلفیق روش‌های AHP و Fuzzy TOPSIS در محیط GIS صورت گرفته است.

عزیزی و اکبری (۱۳۸۷) با به‌کارگیری معیارهای GIS و AHP و با استفاده از سنجش آسیب‌پذیری شهر در برابر زلزله احتمالی، به بررسی شهرسازی پرداخته‌اند. نتایج پژوهش آن ها نشان می دهد که با افزایش مقدار متغیرهایی چون شیب زمین، تراکم جمعیت، تراکم ساختمانی، عمر ساختمان‌ها و فاصله از فضاهای باز، میزان آسیب‌پذیری افزایش می یابد. در مقابل، افزایش مقدار متغیرهایی نظیر فاصله از گسل، مساحت قطعه‌ها، دسترسی براساس عرض معبر و سازگاری کاربری‌ها از نظر همجواری، موجب کاهش آسیب‌پذیری می‌شود.

در پژوهش [۹]، پس از انجام مطالعات میدانی و استفاده از نرم‌افزار Google Earth و استفاده از نقشه توپوگرافی منطقه و زمین‌شناسی منطقه، آبراهه‌ها، سازندهای زمین‌شناسی و گسل‌های اصلی منطقه تعیین شده، نقشه‌های شیب، وجه شیب، طبقات ارتفاعی از DEM منطقه و فاصله از آبراهه‌ها، فاصله از گسل و زمین‌شناسی منطقه با استفاده از نرم‌افزار ARCMAP تهیه شده و در انتها با بررسی هر زمین لرزه و محدودی آن، به هر کدام از طبقات در لایه‌های تهیه شده، امتیازی تخصیص داده شده است. پس از آن، نقشه شش عامل موثر به صورت رستر در وزن شش عامل موثر که به طریق مدل آنتروپی به دست آمده، ضرب و در نهایت پس از تلفیق شش نقشه مذکور به وسیله ابزار Raster Calculator، نقشه نهایی حاصل شده است.

در پژوهش [۱۰]، به ارزیابی آسیب‌پذیری کاربری‌های آموزشی شهر مشهد از منظر مدیریت بحران کاریزهای متروکه با استفاده از GIS، پرداخته شده است. در این پژوهش اطلاعات مربوط به قنوات و کاربری‌های آموزشی جمع‌آوری گردیده و سپس تحلیل داده‌ها در محیط نرم‌افزار GIS انجام شده است. بدین منظور، میزان آسیب‌پذیری ناشی از قنات‌های متروکه به کمک نرم‌افزار ArcGIS بررسی و توسط مدل برآورد تراکم کرنل[3]، جهت تعیین دقیق‌تر مناطق آسیب‌پذیر بررسی و مدل‌سازی شده است. در نهایت با استفاده از تکنیک تحلیل عاملی و مدل تخمین تراکم کرنل، تراکم پراکنش قنات‌ها، کاربری‌های آموزشی و خطر ناشی از آن در هسته مرکزی شهر مشهد بررسی شده است.

در پژوهش [۱۱] به منظور بررسی نقش مدیریت درست کاربری زمین در کاهش آسیب‌پذیری مناطق شهری در برابر زلزله، با استفاده از شاخص‌های قابل تعریف در GIS، الگوی سلسله مراتبی پژوهش از ۱۰ معیار اصلی و سی و سه زیرمعیار تشکیل شده است. سپس پرسشنامه‌هایی برای امتیازدهی، بین متخصصین شهری پخش و خواسته شده است که بر اساس اهمیت هر یک از معیارها در هنگام بروز زلزله، امتیازدهی به معیارها را طوری انجام دهند که برای معیارهای با اهمیت بالاتر، امتیازبالاتر و برای معیارهای با اهمیت کمتر امتیاز کمتر در نظر گرفته شود؛ در نهایت ماتریس سلسله مراتبی تشکیل و برای به دست آوردن وزن هر یک از معیارها، از نرم‌افزار Expert Choice استفاده شده است.

در پژوهش [۱۲]، به منظور شناخت پهنه‌های دارای ریسک زمین لغزش در مناطق روستایی استان گیلان، از روش توصیفی تحلیلی استفاده شده است. به این ترتیب که پس از تدوین مجموعه‌ای از معیارهای مربوط به خطر لغزش زمین و به منظور به دست آوردن ضریب اهمیت هر کدام از معیارها، پرسشنامه AHP طراحی گردیده و به جمع‌آوری نظرات خبرگان و کارشناسان در این زمینه پرداخته شده است. سپس با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده از وضع موجود محدوده‌های مورد بررسی و همچنین ضریب اهمیت هر کدام از معیارها، نسبت به پهنه‌بندی ریسک (خطرپذیری لغزش زمین) اقدام گردیده و نقشه‌های پهنه‌بندی ریسک تهیه شده و محدوده‌های در خطر مورد شناسایی قرار گرفتند.

در پژوهش [۱۳] هدف تدوین سناریوی لرزه‌ای گسل البرز و بررسی میزان آسیب‌پذیری شهر قم می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، ابتدا لزره‌خیزی بررسی و نقشه‌های پایه تهیه شده‌اند. سپس مطالعاتی در خصوص ریز پهنه‌بندی و تهیه مدل بزرگنمایی آبرفت صورت گرفته و بانک اطلاعات داده‌های مکانی تهیه شده است. منحنی‌های شکست مناسب انتخاب و سناریوی لرزه‌ای گسل البرز تدوین شده و در نهایت میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای برآورد شده است.

در پژوهش [۳]، میزان آسیب‌پذیری فیزیکی - کالبدی منطقه ۹ شهر مشهد تحلیل شده است. در این پژوهش از هفت شاخص استفاده شده است که هر یک دارای زیرمعیارهایی می‌باشند، شاخص‌های در نظر گرفته شده عبارتند از شاخص‌ها و متغیرهای طبیعی، شاخص‌ها و متغیرهای مالبدی، شاخص‌ها و تاسیسات و امکانات مهم حیاتی، شاخص‌ها و متغیرهای جمعیتی، شاخص‌ها و متغیرهای اجتماعی، شاخص‌ها و متغیرهای اقتصادی و شاخص‌ها و متغیرهای زیست محیطی. تحلیل اطلاعات با استفاده از نرم‌افزار GIS صورت گرفته و سپس با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی وزن‌دهی به متغیرها و تحلیل اطلاعات صورت پذیرفته است. در نهایت با تلفیق لایه‌های جغرافیایی در نرم‌افزار GIS، نقشه آسیب‌پذیری تاسیسات و امکانات حیاتی در سطح منطقه به دست آمده است.

[3] KDE

در پژوهش [۴] به پیش‌بینی فضاهای آسیب‌پذیر شهر مشهد هنگام وقوع زلزله پرداخته شده است. بدین منظور معیارها و عوامل موثر بر میزان آسیب‌پذیری ناشی از وقوع زلزله شناسایی و انتخاب شده‌اند و لایه‌های جغرافیایی هر یک تهیه شده است. لایه‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و تابع فازی کوچک، فازی‌سازی شده‌اند و در نهایت روی‌هم‌گذاری فازی لایه‌ها، با استفاده از عملگر گامای فازی انجام شده است.

در پژوهش [۱]، از نسخه ۶ نرم‌افزار سلنا[4] جهت ارزیابی خطرپذیری لرزه‌ای شهر مشهد استفاده شده است. این نرم‌افزار بر پایه اصول روش HAZUS نوشته شده و با استفاده از برنامه متلب[5] در محیط Dos اجرا می‌شود. در این نرم‌افزار از رویکرد درخت منطقی استفاده می‌کند و می‌توان پس از ورود داده‌ها، تحلیل همزمان آن‌ها را با در نظر گرفتن وزن منطقی انجام داد. اطلاعات ورودی در نظر گرفته شده شامل نوع سازه، تعداد طبقات، نوع کاربری متراژ طبقات، جمعیت و ... می‌باشد.

پژوهش [۱۴] با هدف تحلیل میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای بافت‌های برنامه‌ریزی شده شهری در محله استاد یوسفی شهر مشهد انجام شده است. در این پژوهش معیارها و شاخص‌های ارزیابی لرزه‌خیزی بافت‌های شهری با تکیه بر معیارهای کاربری زمین در نظر گرفته شده است و جهت ارزیابی از روش تحلیل سلسله مراتبی و نرم‌افزارهای GIS و Expert Choice برای تولید نقشه‌های موضوعی معیارها و شاخص‌ها و وزن‌دهی به آن‌ها استفاده شده است. برای وزن‌دهی و تعیین اهمیت هر معیار از نظر متخصصان استفاده شده است.

در پژوهش [۱۵] از ابزارهای تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS جهت ارزیابی خطرپذیری شبکه حمل و نقل در برابر زلزله و کمی‌سازی اثر آن استفاده شده است.

پژوهش [۱۶] با هدف ارزیابی خطرپذیری زلزله صورت پذیرفته و از ابزارهای تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS جهت ترکیب اثرات فیزیکی، اجتماعی و سیستمی استفاده می‌کند.

در پژوهش [۱۷] از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره جغرافیایی جهت ارزیابی خطرپذیری خطر زلزله برای مناطق شهری استفاده شده است. همچنین در این پژوهش عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته شده است و یک متدولوژی در چارچوب GIS جهت ترکیب تکنیک‌های تحلیل چندمعیاره و منطق فازی ارائه شده است.

در پژوهش [۱۸] یک سیستم پشتیبان تصمیم فازی مبتنی بر تحلیل سلسله مراتبی ارائه شده است که خطرپذیری شهرها را در مقابل زلزله ارزیابی می‌کند. همچنین روشی مناسب برای وزن‌دهی معیارهای تاثیرگذار در خطرپذیری زلزله را ارائه می‌دهد و عدم قطعیت عوامل را نیز در نظر می‌گیرد.

همچنین در پژوهش‌های [۱۹]، [۲۰] و [۲۱] از ابزارهای GIS برای تحلیل و ارزیابی خطرپذیری و ریسک زلزله استفاده شده است.

۳. روش پژوهش

در این پژوهش، از ترکیب روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (AHP گروهی) و ابزارهای GIS استفاده شده است. فرایند پژوهش بدین صورت است که ابتدا با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای و مرور ادبیات و استفاده از نظر خبرگان، شاخص‌های تاثیرگذار در خطرپذیری زلزله استخراج شد. پس از دسته‌بندی شاخص‌ها به معیار و زیرمعیارهای مورد نظر، با استفاده از AHP گروهی، وزن هر یک از معیارها، زیرمعیارها و شاخص‌ها برآورد شد. جهت تهیه نقشه خطرپذیری، لایه‌ی جغرافیایی هر یک از شاخص‌ها تهیه و پس از پردازش‌های جغرافیایی بر روی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS، لایه‌ها تلفیق و نقشه نهایی تهیه شده است. در ادامه توضیحی در مورد روش‌های مورد استفاده، آمده است.

تصمیم‌گیری برای انتخاب یک گزینه از بین چندین گزینه با توجه به یک سری معیار را تصمیم‌گیری چندمعیاره گویند. مسائل تصمیم‌گیری پیچیده عموما از تعدادی تصمیم‌گیرنده تشکیل شده که به آن‌ها گروه‌های ذینفع نیز گفته می‌شود. در این روش نظرات و اهداف مختلف تصمیم‌گیران به‌طور روشن و واضح با یکدیگر ترکیب می‌گردد؛ همچنین، به تصمیم‌گیران این اجازه را می‌دهد تا مشاهدات، معیارها و میزان اهمیت هر یک از آن‌ها را رتبه‌بندی نموده و با وجود نظرات ناسازگار و مخالف، ناسازگاری‌ها را نیز برطرف نماید. روش تصمیم‌گیری چندمعیاره پتانسیل زیادی در زمینه کاهش هزینه و زمان و افزایش دقت در تصمیم‌گیری‌ها دارد و می‌تواند یک چارچوب مناسبی برای ارزیابی مسائل چندبعدی، متناقض و ناسازگار فراهم کند.

فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی نخستین بار توسط توماس ساعتی در سال ۱۹۷۰ معرفی گردید [۲۲]. این فرآیند به صورت گسترده‌ای در زمینه‌های گوناگون به ویژه در تصمیم‌گیری گروهی، هنگامی که عمل تصمیم‌گیری با چند گزینه رقیب و معیار تصمیم‌گیری روبروست می‌تواند استفاده گردد. معیارهای مطرح شده می‌توانند کمّی و یا کیفی باشند. اساس این روش بر مبنای تصمیم‌گیری توسط مقایسات زوجی است. در این روش تصمیم‌گیرنده با فراهم آوردن درخت سلسله مراتب تصمیم، کار خود را آغاز می‌نماید. این درخت، شاخص‌ها و گزینه‌های تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد. سپس یک سری مقایسات زوجی انجام می‌گیرد.

[4] SELENA ver.6
[5] MATLAB

این مقایسات وزن هر یک از فاکتورها را در راستای گزینه‌های رقیب مشخص می‌سازد. در نهایت منطق AHP به گونه‌ای ماتریس‌های حاصل از مقایسات زوجی را با یکدیگر تلفیق می‌سازد که تصمیم بهینه حاصل آید [۲۳].

مقایساتی بین گزینه‌های مختلف تصمیم، بر اساس هر شاخص و قضاوت در مورد اهمیت شاخص تصمیم با انجام مقایسات زوجی، بعد از طراحی سلسله مراتب مسئله تصمیم، انجام می‌شود که به آن قضاوت ترجیحی (مقایسات زوجی) می گویند. تصمیم گیرنده می‌بایست مجموعه ماتریس‌هایی که به طور عددی اهمیت یا ارجحیت نسبی شاخص‌ها را نسبت به یکدیگر و هر گزینه تصمیم را با توجه به شاخص‌ها نسبت به سایر گزینه‌ها اندازه‌گیری می‌نماید، ایجاد کند. این کار با انجام مقایسات دو به دو بین عناصر تصمیم (مقایسه زوجی) و از طریق تخصیص امتیازات عددی که نشان‌دهنده ارجحیت یا اهمیت بین دو عنصر تصمیم است، صورت می گیرد. برای انجام این کار معمولاً از مقایسه گزینه‌ها با شاخص‌های i ام نسبت به گزینه‌ها یا شاخص‌های j ام استفاده می‌شود که در جدول ۱ نحوه ارزش گذاری شاخص‌ها نسبت به هم نشان داده شده است.

جدول ۱ – ارزش‌گذاری شاخص‌ها نسبت به هم

ارزش ترجیحی	وضعیت مقایسه i نسبت به j	توضیح
۱	اهمیت برابر	گزینه یا شاخص i نسبت به j اهمیت برابر دارند و یا ارجحیتی نسبت به هم ندارند.
۳	نسبتاً مهمتر	گزینه یا شاخص i نسبت به j کمی مهمتر است.
۵	مهم‌تر	گزینه یا شاخص i نسبت به j مهم‌تر است.
۷	خیلی مهمتر	گزینه یا شاخص i دارای ارجحیت خیلی بیشتری از j است.
۹	کاملاً مهم	گزینه یا شاخص مطلقاً i از j مهم‌تر و قابل مقایسه با j نیست.
۲ و ۴ و ۶ و ۸	ارزش‌های میانی بین ارزشهای ترجیحی را نشان می‌دهد مثلاً ۸، بیانگر اهمیتی زیادتر از ۷ و پایین‌تر از ۹ برای i است.	

تعیین وزن «عناصر تصمیم» نسبت به هم از طریق مجموعه‌ای از محاسبات عددی انجام می‌شود. قدم بعدی در فرایند تحلیل سلسله مراتبی انجام محاسبات لازم برای تعیین اولویت هر یک از عناصر تصمیم با استفاده از اطلاعات ماتریس‌های مقایسات زوجی است. خلاصه عملیات ریاضی در این مرحله به صورت زیر است:

مجموع اعداد هر ستون از ماتریس مقایسات زوجی را محاسبه کرده، سپس هر عنصر ستون را بر مجموع اعداد آن ستون تقسیم می کنیم. ماتریس جدیدی که بدین صورت به دست می‌آید، «ماتریس مقایسات نرمال شده» نامیده می‌شود. سپس میانگین اعداد هر سطر از ماتریس مقایسات نرمال شده را محاسبه می کنیم. این میانگین وزن نسبی عناصر تصمیم با سطرهای ماتریس را ارائه می کند.

به منظور رتبه‌بندی گزینه‌های تصمیم، بایستی وزن نسبی هرعنصر را در وزن عناصر بالاتر ضرب کرد تا وزن نهایی آن به دست آید. با انجام این مرحله برای هر گزینه، مقدار وزن نهایی به دست می‌آید.

تقریبا تمامی محاسبات مربوط به فرایند تحلیل سلسله مراتبی بر اساس قضاوت اولیه تصمیم‌گیرنده که در قالب ماتریس مقایسات زوجی ظاهر می‌شود، صورت می‌پذیرد و هر گونه خطا و ناسازگاری در مقایسه و تعیین اهمیت بین گزینه‌ها و شاخص‌ها، نتیجه نهایی به دست آمده از محاسبات را مخدوش می‌سازد. نرخ ناسازگاری[6] که در ادامه نحوه محاسبه آن آمده است، وسیله‌ای است که سازگاری را مشخص ساخته و نشان می‌دهد که تا چه حد می‌توان به اولویت‌های حاصل از مقایسات اعتماد کرد. برای مثال اگر گزینه A نسبت به B مهم‌تر (ارزش ترجیحی ۵) و B نسبتا مهمتر (ارزش ترجیحی ۳) باشد، آنگاه باید انتظار داشت A نسبت به C خیلی مهمتر (ارزش ترجیحی ۷ یا بیشتر) ارزیابی گردد یا اگر ارزش ترجیحی A نسبت به B، ۲ و B نسبت به C، ۳ باشد آنگاه ارزش A نسبت به C باید ارزش ترجیحی ۴ را ارائه کند. شاید مقایسه دو گزینه امری ساده باشد، اما وقتی که تعداد مقایسات افزایش یابد اطمینان از سازگاری مقایسات به راحتی میسر نبوده و باید با به‌کارگیری نرخ سازگاری به این اعتماد دست یافت. تجربه نشان داده است که اگر نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱۰ باشد سازگاری مقایسات قابل قبول بوده و در غیر اینصورت مقایسه‌ها باید تجدید نظر شود. قدم‌های زیر برای محاسبه نرخ ناسازگاری به کار گرفته می‌شود:

گام ۱. محاسبه بردار مجموع وزنی: ماتریس مقایسات زوجی در بردار ستونی «وزن نسبی» ضرب می‌شود؛ بردار جدیدی که به این طریق به دست می‌آید، بردار مجموع وزنی[7] نامیده می‌شود.

گام ۲. محاسبه بردار سازگاری: عناصر بردار مجموع وزنی بر بردار اولویت نسبی تقسیم می‌شود؛ بردار حاصل بردار سازگاری[8] نامیده می‌شود.

گام ۳. به دست آوردن λ_{max}، میانگین عناصر برداری سازگاری λ_{max} را به دست می‌دهد.

---

[6] Inconsistency Ratio (I.R)
[7] Weighted sum Vector (WSV)
[8] Consistency Index (CI)

گام ۴. محاسبه شاخص سازگاری: شاخص سازگاری به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود (n عبارتست از تعداد گزینه‌های موجود در مسئله):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

گام ۵. محاسبه نسبت سازگاری: نسبت سازگاری از تقسیم شاخص سازگاری برشاخص تصادفی[9] مطابق رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

نسبت سازگاری ۰/۱ یا کمتر سازگاری در مقایسات را بیان می‌کند. شاخص تصادفی نیز از جدول ۱ استخراج می‌شود [۲۴].

جدول ۱ - شاخص تصادفی در محاسبات AHP

n	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
RI	۰	۰	۰/۵۸	۰/۹	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۵۱

همانطور که گفته شد، مقایسات زوجی به ازای هر تصمیم‌گیرنده وجود دارد، بنابراین ممکن است در یک تصمیم‌گیری به جای یک تصمیم‌گیرنده، چندین تصمیم‌گیرنده داشته باشیم که به آن AHP گروهی گفته می‌شود. در این حالت نظرهای همگی باید در نظر گرفته شود. در این موارد از تصمیم‌گیری گروهی می‌توان از میانگین هندسی برای عناصر ماتریس مقایسات زوجی $D = \| a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \|$ استفاده نمود، بدین طریق مطابق رابطه ۳ عمل می‌شود.

$$a'_{ij} = \left(\prod_{l=1}^{k} a_{ijl}\right)^{\frac{1}{k}}; \quad l = 1, 2, ..., k \quad (3)$$

تعداد تصمیم‌گیرندگان:

$$i, j = 1, 2, ..., n \; ; \; i \neq j$$

چنانچه هر تصمیم‌گیرنده با توجه به تخصص و مسئولیتش لازم باشد تاثیر بیشتری بر آرا داشته باشد، می‌توان وزنی (w_l) به نظرات او داد که در نتیجه از رابطه ۴ استفاده می‌گردد:

$$a'_{ij} = \{\prod_{l=1}^{k} a_{ijl}{}^{w_l}\}^{l \frac{1}{\sum w_l}} \quad (4)$$

[۲۵]

در روش AHP گروهی، نظرات و قضاوت خبرگان حوزه‌های مرتبط مورد نیاز است. در این پژوهش از نظرات متخصصان، خبرگان و کارشناسان حوزه‌های زمین‌شناسی، جغرافیا، شهرسازی، عمران، GIS، بحران و پدافند غیرعامل آشنا به مدیریت و خدمات شهری استفاده شده است. پس از دریافت ماتریس‌های مقایسات زوجی از خبرگان، با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice، نرخ سازگاری ماتریس‌ها محاسبه شده است و در صورتی که بیش از ۰,۱ بود، ماتریس مربوطه جهت باز پرسازی ماتریس و قضاوت مجدد، به خبره بازگردانده شد. در ادامه و در صورتی که ماتریس مقایسه زوجی که یک بار به خبره برگردانده شده بود، باز هم دارای نرخ سازگاری بیش از ۰,۱ بود، آن ماتریس حذف شده و در محاسبات لحاظ نشده است. در نهایت وزن نهایی معیارها، زیرمعیارها و شاخص‌های موثر در خطرپذیری زلزله مطابق روش AHP گروهی که در بالا شرح داده شد، در جدول ۳ آمده است.

جدول۳- شاخص‌های موثر در خطرپذیری زلزله به همراه وزن نهایی

معیار	وزن	زیرمعیار	وزن	شاخص	وزن (نهایی)
خسارت و تخریب‌پذیری	۰,۳۵	انسانی	۰,۵	تراکم جمعیت	۰,۱۴۸
		زیرساختی	۰,۱۶	کاربری‌های خطرزا	۰,۰۲۸
				شریان‌های حیاتی (فاصله از خطوط نیرو مانند آب، گاز و ...)	۰,۰۳۱
		شهری	۰,۳۴	شیب زمین	۰,۰۳۰
				تراکم ساختمانی	۰,۰۱۹
				مدل رقومی ارتفاع (DEM)	۰,۰۳۰
				فرسودگی بافت	۰,۰۲۵
زمین شناسی	۰,۶۵	چشمه‌های لرزه‌ای	۰,۶۶	فاصله از گسل (اصلی و فرعی)	۰,۱۱۹
				نوع چشمه	۰,۰۷۰

[9] Random Index (RI)

				پتانسیل لرزه خیزی	۰,۱۲۴
				مصالح بستر زیرین	۰,۱۴۲
			مخاطرات ژئوتکنیک لرزه‌ای	زمین لغزش	۰,۰۹۲
			۰,۳۴	فرونشست زمین	۰,۰۶۹
				پتانسیل روانگرایی	۰,۰۷۴

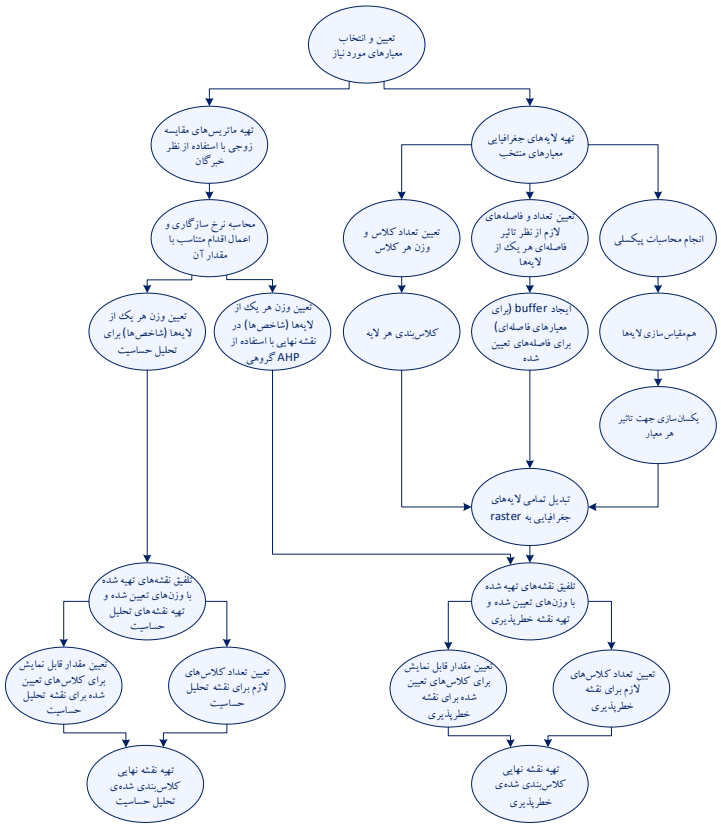
جهت پردازش‌های جغرافیایی از نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰,۴,۱ استفاده شده است. در این نرم‌افزار ابزارهای متعددی برای پردازش لایه‌های جغرافیایی وجود دارد که در این پژوهش مطابق جدول ۴ از مجموعه‌ای از این ابزارها استفاده شده است.

جدول ٤- ابزارهای GIS مورد استفاده

نام ابزار	کاربرد در پژوهش
Kriging	درون‌یابی
Buffer	رسم بافر با شعاع معین
Near	محاسبه فاصله هر پیکسل از نقشه محدوده مورد مطالعه تا نزدیکترین نقطه در لایه
Generate Near Table	محاسبه فاصله هر پیکسل از نقشه محدوده مورد مطالعه تا نقاط در لایه
... to Raster	تبدیل انواع فرمت‌های لایه‌ها به رستر
Rescale by Function	هم‌مقیاس‌سازی لایه‌ها
Reclassify	ایجاد طبقه‌بندی برای لایه‌ها
Map Algebra	یکسان‌سازی جهت تاثیر هر معیار در خطرپذیری زلزله
Clip	برش محدوده مورد مطالعه
Weighted Sum	تلفیق لایه‌های معیارها جهت تهیه نقشه نهایی

در پردازش هر یک از لایه‌های تهیه شده‌ی معیارها، متناسب با نوع لایه و ماهیت معیار، از ترکیبی از ابزارهای گفته شده در جدول ۴ استفاده شده است. پس از پردازش و آماده‌سازی اولیه لایه‌ها، تمامی لایه‌ها به رستر تبدیل شدند و پس از یکسان‌سازی جهت تاثیر هر معیار در خطرپذیری زلزله، مطابق حریم شهر مشهد، لایه‌ها برش زده شدند. لازم به ذکر است که کلیه محاسبات در سطح پیکسل (در پیکسل‌هایی با ابعاد ۲۰*۲۰) انجام گرفته است.

در گام نهایی، با استفاده از خروجی اوزان شاخص‌ها (حاصل از AHP گروهی) و پردازش‌های جغرافیایی، لایه‌های شاخص‌ها با وزن نهایی محاسبه شده، با یکدیگر تلفیق شدند و نقشه نهایی خطرپذیری زلزله ایجاد شده است. فرایند پژوهش در شکل ۱ قابل مشاهده است.

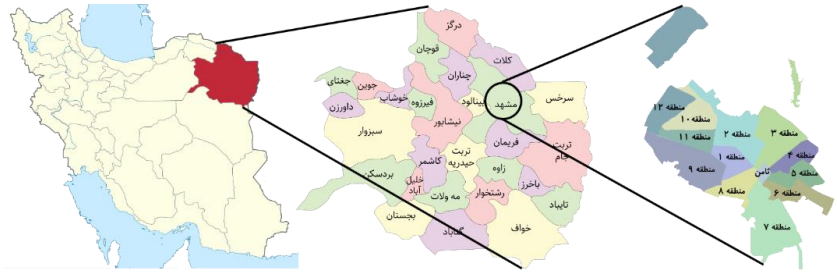


شکل ۱- فرایند پژوهش

۴. محدوده مورد مطالعه

مشهد کلان‌شهری در شمال شرقی ایران و مرکز استان خراسان رضوی در مشهد با طول جغرافیایی ´۲۱:°۵۸ تا ´۰۸:°۶۰ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ´۴۰:°۳۵ تا ´۰۳:°۳۶ درجه شمالی در حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود در خراسان رضوی قرار دارد است. این شهر با ۳۵۱ کیلومتر مربع مساحت، دومین شهر پهناور ایران پس از تهران است. براساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ مشهد با ۳۰۰۱۱۸۴ تن جمعیت، دومین شهر پرجمعیت ایران پس از تهران و صد و یکمین شهر پر جمعیت دنیا به‌شمار می‌رود. بیشینه ارتفاع شهر مشهد ۱۱۵۰ متر و کمینه آن ۹۵۰ متر است. این شهر در ناحیه‌ای بین کوه‌های کپه داغ از سمت شمال و شمال شرق و کوه‌های بینالود از سمت جنوب غرب قرار گرفته است و دارای ۱۳ منطقه شهری، ۴۱ ناحیه شهرسازی، ۳۸ ناحیه خدماتی و ۱۵۸ محله است.

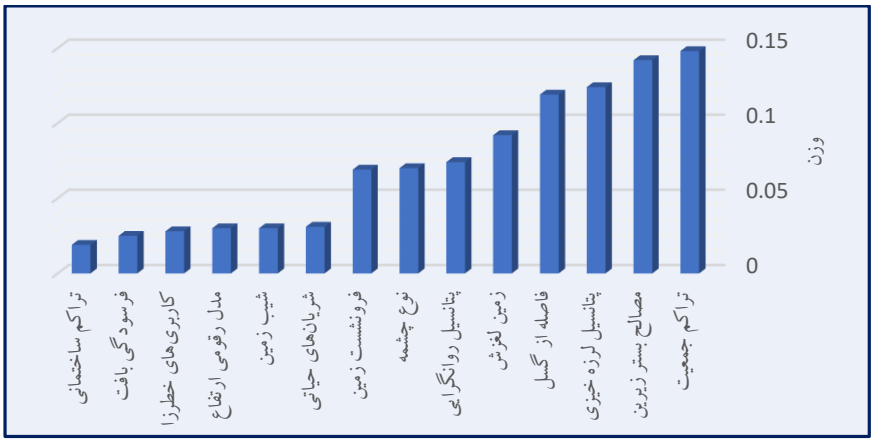
وجود گسل‌های توانمند و فعال در دو طرف دشت و در فاصله اندک از شهر مشهد نشان دهنده پتانسیل زیاد خطر زمین لرزه در این منطقه است؛ به طوری که شهر مشهد از شرق و جنوب شرقی با یک گسل به طول حدود ۱۰۰ کیلومتری تقریبا ۲۰ کیلومتر و از جنوب و جنوب غربی با گسلی به طول حدود ۹۰ کیلومتر کمتر از ۲ کیلومتر فاصله دارد. در شکل ۲ نقشه موقعیت شهر مشهد قابل مشاهده است [۴].



شکل ۲- نقشه موقعیت مشهد در ایران

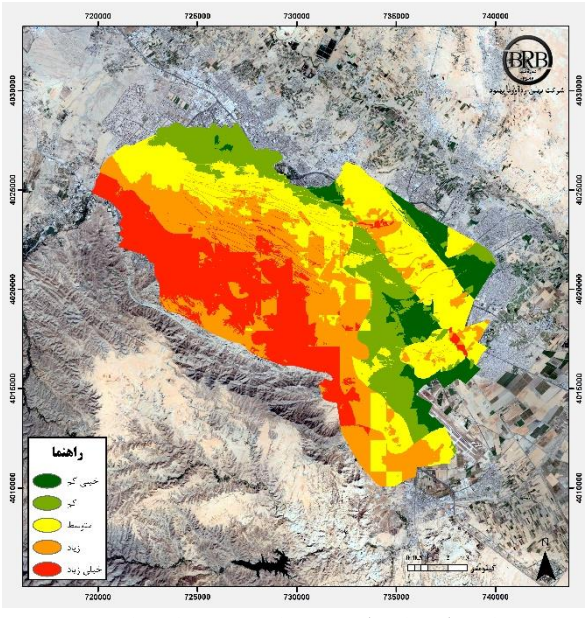
۵. یافته‌های پژوهش

در این پژوهش سعی شد تا ضمن مطالعه جامع جهت شناسایی معیارهای موثر در خطرپذیری زلزله، با استفاده از تلفیق تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و ابزارهای GIS، نقشه خطرپذیری زلزله در شهر مشهد تهیه گردد. استفاده از ابزارهای کمّی تصمیم‌گیری (AHP گروهی)، منجر به تعیین اوزان هر یک از معیارهای تاثیرگذار به صورت کمّی شده و در نهایت باعث افزایش دقت نقشه نهایی می‌گردد. در این روش، جهت در نظر گرفتن سازگاری ماتریس‌های مقایسه زوجی در قضاوت تصمیم‌گیرندگان، نرخ سازگاری مطابق فرمول گفته شده در توضیحات روش، محاسبه و در نظر گرفته شده است و در هر مرحله اقدام مناسب (بازگرداندن ماتریس مقایسه زوجی به خبره یا حذف)، طبق آنچه در روش به کار رفته شرح داده شد، انجام شده است. در نهایت وزن نهایی هر شاخص موثر در خطرپذیری زلزله، محاسبه شده است. در شکل ۳ اوزان نهایی شاخص‌های پژوهش، مشاهده می‌گردد.

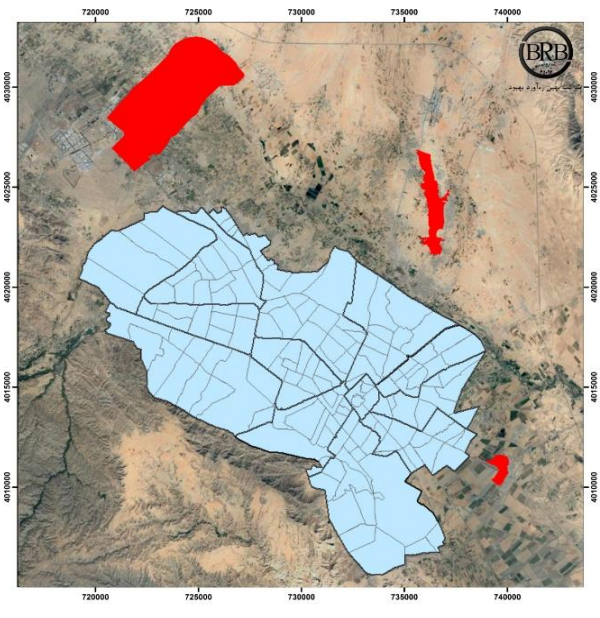


شکل ۳- نمودار مقایسه‌ای وزن نهایی شاخص‌ها

نقشه نهایی پس از تلفیق لایه‌های شاخص‌های موثر در خطرپذیری زلزله در شکل ۴ قابل مشاهده است. برخی از نقاط حریم شهر مشهد به دلیل نبود اطلاعات در نقشه نهایی خطرپذیری زلزله در نظر گرفته نشده است، این نقاط در شکل ۵ با رنگ قرمز مشخص شده‌اند.



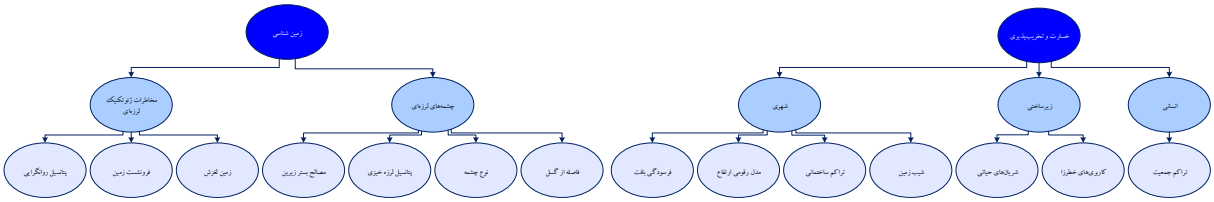
شکل ٤- نقشه نهایی خطرپذیری زلزله شهر مشهد



شکل ۵- نقشه حریم شهر مشهد

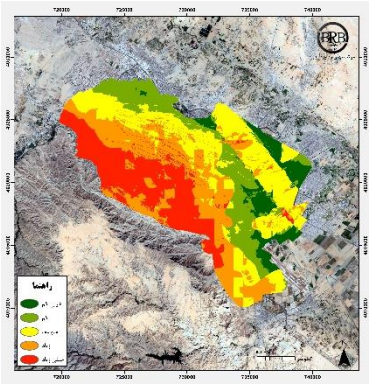
همانطور که در جدول ۳ و شکل ۶ قابل مشاهده است، یکی از مهم‌ترین دستاوردهای پژوهش فعلی، در نظر گرفتن معیارهای تاثیرگذار با رویکرد جامع‌نگر است که می‌توان اذعان داشت، با توجه به مرور ادبیات انجام شده، جامعیت مولفه‌های موثر به این شکل در ادبیات در نظر گرفته نشده است.

در شکل ۶ ساختار سلسله مراتبی چارچوب مطالعه (مشتمل بر معیارها، زیرمعیارها و شاخص‌ها) مشاهده می‌گردد. در نظر گرفتن ابعاد متنوع موثر بر خطرپذیری زلزله به صورت سلسله مراتبی باعث می‌شود بتوان نقشه نهایی را به صورت جامع در نظر گرفت. همچنین این ساختار به خبرگان، متخصصان و کارشناسان این حوزه کمک می‌کند که در تصمیم‌گیری‌ها و قضاوت‌های خود، ارزیابی را از سطوح بالاتر (معیارها) شروع و هنگام قضاوت بر روی شاخه‌های پایینی (شاخص‌ها)، تعداد شاخص‌ها خللی در تصمیم‌گیری و قضاوت ایجاد نکند.

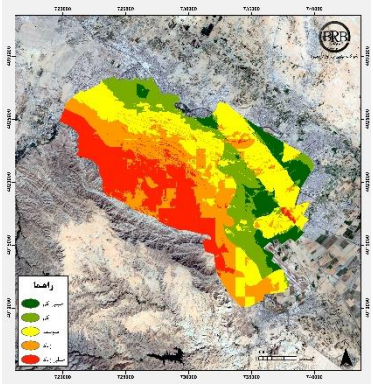


شکل ٦- ساختار سلسله مراتبی چارچوب پژوهش (معیارها، زیرمعیارها و شاخص‌ها)

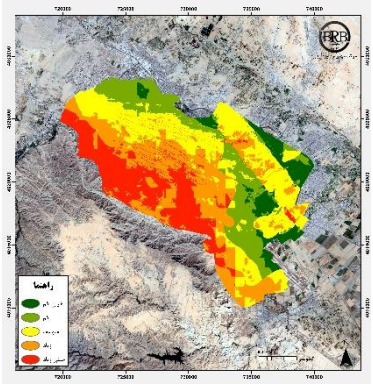
در این مطالعه و جهت اعتبارسنجی و مقایسه تاثیر هر شاخص در نقشه نهایی، تحلیل حساسیت انجام شده است. تحلیل حساسیت انجام شده بدین صورت است که تمامی وزن‌ها به ازای حذف هر یک از شاخص‌ها، با روش AHP گروهی مجددا محاسبه شده است و نقشه نهایی به ازای حذف هر شاخص محاسبه شده است. در ادامه نقشه‌های تحلیل حساسیت، در شکل ۷ تا ۲۰ آمده است.



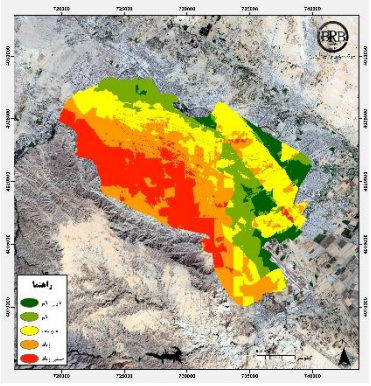
شکل ۷- نقشه نهایی با حذف شاخص تراکم جمعیت



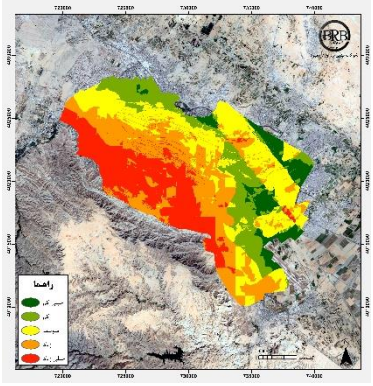
شکل ۸- نقشه نهایی با حذف شاخص کاربری‌های خطرزا



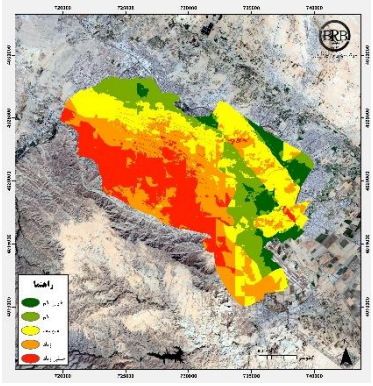
شکل ۹- نقشه نهایی با حذف شاخص شریان‌های حیاتی



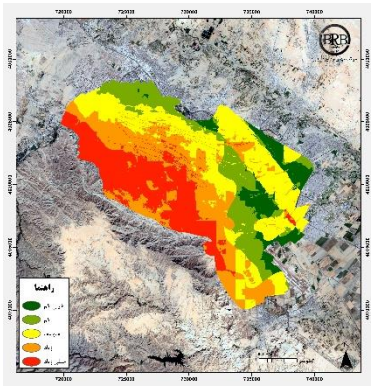
شکل ۱۰- نقشه نهایی با حذف شاخص شیب زمین



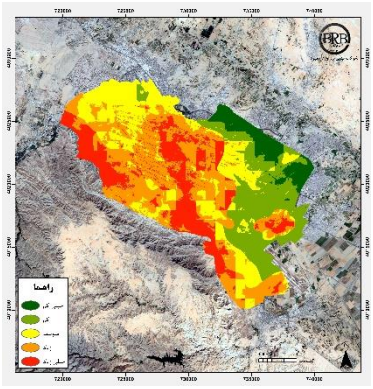
شکل ۱۱- نقشه نهایی با حذف شاخص تراکم ساختمانی



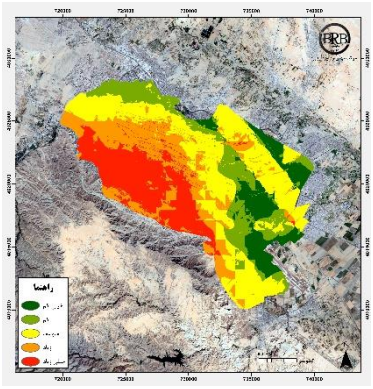
شکل ۱۲- نقشه نهایی با حذف شاخص مدل رقومی ارتفاع



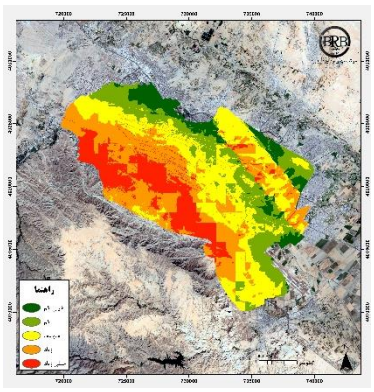
شکل ۱۳- نقشه نهایی با حذف شاخص فرسودگی بافت



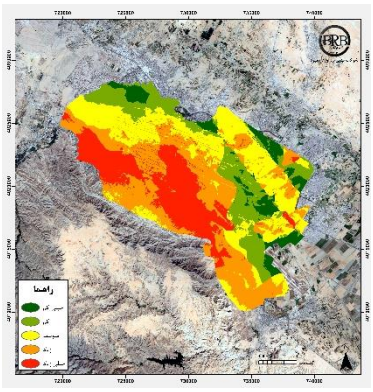
شکل ١٤- نقشه نهایی با حذف شاخص فاصله از گسل



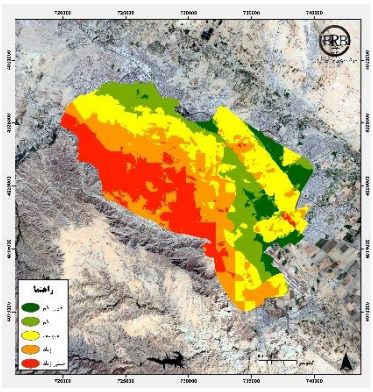
شکل ۱۵- نقشه نهایی با حذف شاخص نوع چشمه



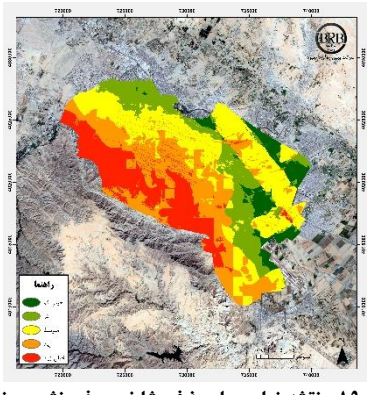
شکل ١٦- نقشه نهایی با حذف شاخص پتانسیل لرزه خیزی



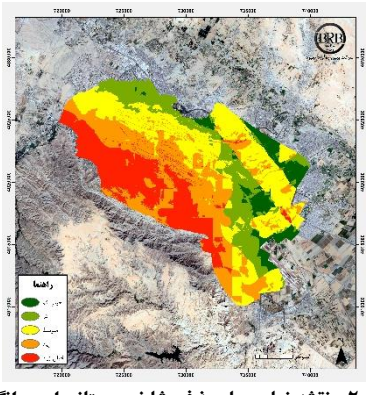
شکل ۱۷- نقشه نهایی با حذف شاخص مصالح بستر زیرین



شکل ۱۸- نقشه نهایی با حذف شاخص زمین لغزش



شکل ۱۹- نقشه نهایی با حذف شاخص فرونشست زمین



شکل ۲۰- نقشه نهایی با حذف شاخص پتانسیل روانگرایی

با بررسی نقشه‌های تحلیل حساسیت، می‌توان دریافت که سه شاخص با بیشترین تاثیر در نقشه نهایی خطرپذیری زلزله شهر مشهد، به ترتیب شاخص‌های فاصله از گسل، پتانسیل لرزه خیزی و مصالح بستر زیرین هستند. این امر دو دلیل می‌تواند داشته باشد؛ اول اینکه برای معیارهای گفته شده محدوده‌ی بیشتری تحت تاثیر هستند، بدین معنی که نقاط (پیکس‌های) زیادی از نقشه تحت تاثیر این عوامل هستند و در نتیجه با حذف آن‌ها، تغییر قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌شود. دلیل دوم وزن این سه معیار است که از نظر وزنی به ترتیب در رده‌های چهارم، سوم و دوم معیارها قرار می‌گیرند.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

بررسی خطرپذیری لرزه‌ای شهرها به‌منظور شناسایی نقاط ضعف هر شهر یکی از مهم ترین اقدامات لازم برای تخصیص بهینه منابع به منظور کاهش میزان خطرپذیری و تلفات انسانی ناشی از زلزله است. شاخص خطرپذیری لرزه‌ای، یک شاخص ترکیبی است که به وسیله آن می‌توان مقایسه نسبی عمومی از میزان خطرپذیری لرزه‌ای شهرهای مختلف انجام داد. در جدول ۵ مساحت تحت پوشش هر کلاس نقشه نهایی خطرپذیری زلزله در محدوده مورد مطالعه، شهر مشهد، قرار گرفته است.

جدول ۵- مساحت تحت پوشش هر کلاس نقشه نهایی خطرپذیری زلزله مشهد

میزان خطرپذیری	مساحت تحت پوشش (متر مربع)
خیلی زیاد	۶۱۳۸۸۶۰,۷۱
زیاد	۷۳۰۶۵۲۸۷,۱۱
متوسط	۵۵۴۶۴۹۸۰,۹۷
کم	۴۶۳۴۹۳۸۹,۹۱
خیلی کم	۴۹۱۴۶۸۰۳,۵۵

همانطور که ملاحظه می‌شود، به ترتیب ۲۲٪ و ۲۶٪ از مساحت شهر مشهد تحت پوشش خطر خیلی زیاد و زیاد است که بیانگر اهمیت و لزوم توجه بیشتر به خطر زلزله و تبعات ناشی از آن در محدوده این کلان شهر کشور می‌باشد.

لازم به تاکید است که در ارائه خروجی نهایی این پژوهش، نمی‌توان از نقش موثر اوزان هر یک از شاخص‌های دخیل در مطالعه به سادگی گذشت. براساس تجمیع نظرات متخصصان، خبرگان و کارشناسان حوزه‌های زمین‌شناسی، جغرافیا، شهرسازی، عمران، GIS، بحران و پدافند غیرعامل آشنا به مدیریت و خدمات شهری، شاخص‌های تراکم جمعیت، مصالح بستر زیرین، پتانسیل لرزه‌خیزی و فاصله از گسل (به ترتیب) دارای بیشترین اهمیت بوده و تراکم ساختمانی در رتبه آخر قرار دارد. تغییر در قضاوت و اهمیت هر یک از شاخص‌های بکارگرفته شده در این پژوهش، می‌تواند منجر به تغییر نتیجه نهایی گردد که می‌توان تحلیل حساسیت نتایج پژوهش را با این رویکرد نیز انجام داد. همچنین می‌توان با استفاده از تلفیق منطق فازی و تکنیک فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP)، دقت محاسبات اوزان نهایی شاخص‌ها و تاثیر متقابل آن‌ها بر یکدیگر را نیز افزایش داد.

از سوی دیگر، نمی‌توان منکر نقش کلیدی دسترسی به اطلاعات مناسب و صحیح (در قالب لایه‌های GIS) شد که قطعا در نتیجه نهایی مطالعات مشابه، موثر می‌باشد. در این راستا و در صورت دسترسی به اطلاعات، می‌توان برخی شاخص‌های مهم دیگر از قبیل کیفیت ابنیه (مطالح به کار رفته در ساختمان‌ها)، تراکم عبور مرور در سطح شهر، اهمیت اقتصادی اجتماعی مناطق و ... را نیز در تهیه نقشه خطرپذیری زلزله دخیل نمود. مع الوصف به دلیل وسعت اثر گسل‌های فعال و سایر مسائل تاثیرگذار بر افزایش میزان خطر زلزله در مشهد، ضرورت اطلاع از چگونگی رخداد زلزله و فعالیت گسل‌ها برای ایمن سازی سازه‌ها، تاسیسات، مراکز حساس اقتصادی و راه‌ها و سیستم‌های ارتباطی و سایر مولفه‌های موثر بر شهرنشینی، امری بسیار ضروری است.

۷. منابع

۱. رضویان امرئی, س.ع., ر. جعفری, and ف. علیدوست ابدی خواه, ارزیابی خطر پذیری لرزه ای شهر مشهد. نشریه علمی پژوهشی مهندسی سازه و ساخت دوره ۵ شماره ۴, ۱۳۹۷: p. 128-150.

۲. Nichols, J.M., A major urban earthquake: planning for Armageddon. Landscape urban planning, 2005. 73(2-3): p. 136-154.

۳. خاکپور, ب., et al., تحلیل میزان آسیب پذیری فیزیکی-کالبدی منطقه ۹ شهر مشهد از دیدگاه زلزله خیزی. جغرافیا و توسعه ناحیه ای, ۱۳۹۰. ۸.

۴. غلامی, ی., et al., پیش بینی فضاهای آسیب پذیر شهر مشهد هنگام وقوع زلزله. پژوهشهای جغرافیای برنامه‌ریزی شهری, ۱۳۹۴: p. 55-67.

۵. کاووسی, ف., et al., تحلیل درجه ی خطرپذیری مناطق شهری به منظور مدیریت بحران پس از زلزله با استفاده از روش FAHP در GIS مطالعه ی موردی: منطقه ی یک اهواز. جغرافیا و توسعه شماره ۵۰, ۱۳۹۷: p. 161-180.

۶. پیشگاهی‌فرد, ز., et al., مدلسازی تعیین مناطق خطرپذیر با استفاده از مدل AHP در محیط GIS جهت مدیریت بحران شهری (مطالعه موردی: منطقه ۸ شهرداری تبریز). فصلنامه علمی پژوهشی فضای جغرافی, ۱۳۹۱: p. 183-200.

۷. پیشگاهی‌فرد, ز., et al., سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و نقش آن در مکان یابی مناطق مخاطره آمیز شهری جهت استفاده در مدیریت بحران (مطالعه موردی: منطقه ۸ شهرداری تبریز). ۱۳۹۰: p. 91-104.

۸. حاتمی‌نژاد, ح., et al., ارزیابی و پهنه بندی لرزهای شهر تبریز با استفاده از منطق Fuzzy با تلفیق AHP و TOPSIS در محیط ARCGIS. پژوهشهای جغرافیای انسانی, ۱۳۹۳. ۴۶(۴): p. 697-717.

۹. ریگی, ع., ا. عطایی کیا, and م. انتظاری نجف آبادی, پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل آنتروپی، منطقه مورد مطالعه، شهرستان شیروان چرداول استان ایلام, in چهارمین کنفرانس جامع مدیریت بحران و HSE. 1396, دبیرخانه دایمی کنفرانس.

۱۰. مینائی, م., آ. منیری‌مقدم, and م. خادم‌قاسمی. ارزیابی آسیب پذیری کاربری های آموزشی شهر مشهد از منظر مدیریت بحران کاریزهای متروکه با استفاده از GIS. in چهارمین کنفرانس جامع مدیریت بحران و HSE. 1396.

۱۱. مرادی, ا., ا. عبداللهی, and پ. صراطی, بررسی نقش مدیریت صحیح کاربری زمین و کاهش آسیب پذیری مناطق شهری در برابر زلزله با استفاده از GIS, in چهارمین کنفرانس جامع مدیریت بحران و HSE. 1396, دبیرخانه دایمی کنفرانس.

۱۲. رحیمی پور شیخانی نژاد, م., et al., مدیریت بحران و شناخت پهنه های دارای ریسک زمین لغزش در مناطق روستایی (نمونه موردی: استان گیلان), in پنجمین کنفرانس جامع مدیریت بحران و HSE با رویکرد تاب آوری شریان های حیاتی و ایمنی صنعتی. ۱۳۹۷, دبیرخانه دائمی کنفرانس.

۱۳. خراسانی‌زاده, م., م. برزویی, and ع.ا. رحیمی, برآورد آسیب پذیری لرزه ای شهر قم براساس سناریوی گسل البرز, in پنجمین کنفرانس جامع مدیریت بحران و HSE با رویکرد تاب آوری شریان های حیاتی و ایمنی صنعتی. ۱۳۹۷, دبیرخانه دائمی کنفرانس.

۱۴. نوریان, ف. and ر. قاضی, تحلیلی بر میزان آسیب پذیری لرزه ای بافت های برنامه ریزی شده شهری با تاکید بر معیارهای برنامه ریزی کاربری زمین (نمونه مطالعه: محله استادیوسفی مشهد), in پنجمین کنفرانس ملی پژوهشهای کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری. ۱۳۹۶, دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

۱۵. Kermanshah, A. and S. Derrible, A geographical and multi-criteria vulnerability assessment of transportation networks against extreme earthquakes. Reliability Engineering and System Safety, 2016. 153: p. 39-49.

۱۶. Walker, B.B., et al., A multi-criteria evaluation model of earthquake vulnerability in Victoria, British Columbia. Natural hazards, 2014. 74(2): p. 1209-1222.

۱۷. Rashed, T. and J. Weeks, Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas. International Journal of Geographical Information Science, ۲۰۰۳. ۱۷(۶): p. 547-576.

۱۸. Aghataher, R., et al., A fuzzy-AHP decision support system for evaluation of cities vulnerability against earthquakes. World Applied Sciences Journal, 2008. 3(1): p. 66-72.

۱۹. Rahman, N., M.A. Ansary, and I. Islam, GIS based mapping of vulnerability to earthquake and fire hazard in Dhaka city, Bangladesh. International journal of disaster risk reduction, 2015. 13: p. 291-300.

۲۰. of RC building. Ningthoujam, M. and R.P. Nanda. A GIS system integrated with earthquake vulnerability assessment in Structures. 2018. Elsevier.

۲۱. Tadjer, K. and M. Bensaibi, Earthquake risk assessment of Blida (Algeria) using GIS. Energy Procedia, 2017. 139: p. 645-650.

۲۲. Saaty, T.L., Optimization in integers and related extremal problems. 1970: McGraw-Hill.

۲۳. آذر, ع.ف.ح., علم مدیریت فازی. ۱۳۸۹: موسسه کتاب مهربان نشر.

۲۴. محمدرضا, م., پژوهش عملیاتی پیشرفته. Vol. چاپ اول. ۱۳۸۳: انتشارات کتاب دانشگاهی.

۲۵. اصغرپور, م., تصمیم‌گیری‌های چند معیاره. ۱۳۹۷: انتشارات دانشگاه تهران. ۳۹۸.