

آسیب پذیری ساختمانی شهرها در برابر زلزله با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی نمونه موردی: شهر جویم

مرضیه جوکاری - دانشجوی دکتری گروه جغرافیا، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران

مرضیه موغلی - گروه جغرافیا، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران (نویسنده مسئول)

marziyeh.m@iau.ac.ir

محمد ابراهیم عقیفی - گروه جغرافیا، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران

دریافت: ۱۴۰۴/۴/۱۴ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۲۵ چاپ: ۱۴۰۴/۶/۲۵

چکیده

زلزله به عنوان یکی از مخرب ترین مخاطرات طبیعی، همواره تهدیدی جدی برای بافت شهری محسوب می شود. شهر جویم در استان فارس، به دلیل شرایط زمین شناسی و کالبدی، در معرض خطر قابل توجه زلزله قرار دارد. این پژوهش با هدف ارزیابی و پهنه بندی آسیب پذیری شهری جویم در برابر زلزله، با رویکرد ترکیبی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام شد. داده های مورد نیاز شامل اطلاعات بلوک های آماری سال ۱۳۹۵ و لایه های مکانی از منابع رسمی گردآوری گردید. شاخص های ارزیابی در سه بُعد «ویژگی های سازه ای» (۵ زیرمعیار)، «ویژگی های زمین شناسی» (۳ زیرمعیار) و «ویژگی های شهری» (۳ زیرمعیار) بر اساس مرور ادبیات و نظر ۲۰ متخصص انتخاب شدند. نرخ سازگاری مقایسات زوجی برای تمام ابعاد کمتر از ۰.۱ و در محدوده قابل قبول بود. نتایج نشان داد در بُعد ویژگی های سازه ای، تعداد طبقات با وزن ۰.۳۲۱ و تراکم ساختمانی با وزن ۰.۳۱۱ بیشترین تأثیر را در افزایش آسیب پذیری دارند، در حالی که سال ساخت با وزن ۰.۰۴۸ کمترین اهمیت را دارد. در بُعد زمین شناسی، جنس خاک (وزن ۰.۵۴۰) مهم ترین عامل و فاصله از گسل (وزن ۰.۱۶۳) کم اهمیت ترین عامل شناخته شد. در بُعد شهری، کیفیت زیرساخت ها با وزن ۰.۵۰۰ رتبه نخست را کسب کرد. ضریب همبستگی بین لایه شاخص تلفیقی و تراکم ساختمانی ۰.۸۲ و با تعداد طبقات ۰.۷۹ به دست آمد که بیانگر ارتباط قوی این عوامل با میزان خطرپذیری است. تحلیل مکانی نشان داد حدود ۲۷.۶ درصد از مساحت شهر در پهنه با آسیب پذیری «بسیار زیاد» ۳۳.۴ درصد در پهنه «زیاد» ۲۵.۱ درصد در پهنه «متوسط» و تنها ۱۳.۹ درصد در پهنه «کم» قرار دارد. این نتایج بیانگر ضرورت اجرای برنامه های مقاوم سازی، بهبود کیفیت ساخت و ساز و توسعه زیرساخت های شهری برای کاهش خطرات ناشی از زلزله در شهر جویم است.

کلمات کلیدی: آسیب پذیری شهری، زلزله، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، سیستم اطلاعات جغرافیایی، شهر جویم

مقدمه

زلزله یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی است که همواره تهدیدی جدی برای شهرها و مناطق مسکونی به شمار می‌رود. آسیب‌پذیری ساختمانی^۱ در برابر زلزله به عنوان یکی از عوامل کلیدی در مدیریت بحران و کاهش خسارات جانی و مالی، نیازمند بررسی و مدل‌سازی دقیق است (ویسنر و همکاران^۲، ۲۰۱۴). شناخت و ارزیابی این آسیب‌پذیری می‌تواند به برنامه‌ریزان شهری و مهندسان کمک کند تا با اتخاذ راهکارهای مناسب، میزان خسارات احتمالی را کاهش داده و ایمنی شهرها را افزایش دهند (ناظم فر، ۲۰۲۱).

یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی^۳ (GIS) در تحلیل آسیب‌پذیری ساختمان‌ها، امکان تلفیق داده‌های مکانی و غیرمکانی^۴ برای ارزیابی وضعیت شهر از جنبه‌های مختلف است (آحمد و همکاران^۵، ۲۰۱۸). عواملی مانند نوع سازه^۶، قدمت ساختمان، تراکم جمعیت، مصالح به کار رفته و نزدیکی به گسل‌های زلزله از جمله متغیرهایی هستند که در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرند. به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در این مطالعه، امکان نمایش و تحلیل این داده‌ها را در قالب نقشه‌های آسیب‌پذیری فراهم می‌کند که می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های کلان شهری نقش مؤثری ایفا کند (هی و همکاران^۷، ۲۰۲۱).

روش فرایند تحلیل سلسله^۸ یکی از پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که به ارزیابی عوامل مختلف و تعیین وزن آن‌ها بر اساس اهمیت نسبی کمک می‌کند. این روش با استفاده از مقایسات زوجی، به تصمیم‌گیرندگان امکان می‌دهد که عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری ساختمانی را به صورت سلسله‌مراتبی تحلیل کرده و درجه تأثیر هر یک را مشخص کنند. در ترکیب با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، این روش به تحلیل فضایی داده‌ها و ایجاد نقشه‌های پهنه‌بندی خطر کمک می‌کند که می‌تواند برای برنامه‌ریزی شهری و مدیریت بحران مورد استفاده قرار گیرد (خدادادی و همکاران، ۱۳۹۹).

¹ Building vulnerability

² Wisner et al

³ Geographic Information System

⁴ Spatial and non-spatial

⁵ Ahmed et al

⁶ Structure

⁷ He et al

⁸ Analytical Hierarchy Process

شهر جویم به عنوان نمونه موردی این پژوهش، در منطقه‌ای زلزله‌خیز واقع شده و دارای بافت شهری با ترکیب متنوعی از ساختمان‌های قدیمی و جدید است. با توجه به رشد جمعیت و توسعه شهری در این منطقه، بررسی میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در برابر زلزله اهمیت زیادی دارد. بسیاری از ساختمان‌های این شهر دارای ضعف‌های سازه‌ای بوده و در صورت وقوع زلزله، احتمال بروز خسارات گسترده وجود دارد. بنابراین، مدل‌سازی و تحلیل دقیق این آسیب‌پذیری می‌تواند در تدوین راهبردهای مقاوم‌سازی و مدیریت بحران بسیار مفید باشد.

با توجه به اهمیت موضوع، این پژوهش بر آن است تا با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نقشه‌های آسیب‌پذیری ساختمانی را برای شهر جویم تهیه کرده و تحلیل دقیقی از وضعیت این شهر در برابر زلزله ارائه دهد. این مطالعه می‌تواند به عنوان الگویی برای سایر شهرهای مشابه که در معرض خطر زلزله قرار دارند، مورد استفاده قرار گیرد و به توسعه سیاست‌های مدیریت بحران و افزایش ایمنی شهری کمک کند. در نهایت، یافته‌های این پژوهش می‌توانند مبنای تصمیم‌گیری برای مسئولان شهری، مهندسان و برنامه‌ریزان باشد تا اقدامات پیشگیرانه لازم را در راستای کاهش خسارات ناشی از زلزله اتخاذ کنند. امید است که این مطالعه بتواند به بهبود کیفیت زیرساخت‌های شهری، افزایش تاب‌آوری ساختمان‌ها و کاهش تلفات جانی و مالی در برابر زلزله‌های احتمالی کمک کند.

مبانی نظری

ویژگی‌های سازه‌ای مانند نوع مصالح، تعداد طبقات، سال ساخت، تراکم ساختمانی و میزان پایداری نقش کلیدی در آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها ایفا می‌کنند (لی و همکاران^۱، ۲۰۲۱). نوع مصالح سازه‌ای، مقاومت در برابر نیروهای لرزه‌ای را مشخص می‌کند؛ برای نمونه، سازه‌های فولادی و بتن مسلح در مقایسه با سازه‌های آجری یا خشتی، مقاومت بیشتری در برابر زلزله نشان می‌دهند (ساموئل و همکاران^۲، ۲۰۲۴). افزایش تعداد طبقات نیز باعث افزایش نیروی اینرسی و دامنه نوسانات می‌شود که در نتیجه آسیب‌پذیری ساختمان را افزایش می‌دهد (دوگان و همکاران^۳، ۲۰۲۵)؛ سال ساخت ساختمان‌ها شاخصی از انطباق با آیین‌نامه‌های لرزه‌ای است؛ ساختمان‌های قدیمی‌تر که مطابق با استانداردهای مدرن مقاوم‌سازی نشده‌اند، در معرض خطر بیشتری قرار دارند (ملکی و همکاران، ۱۴۰۲).

¹ Li et al

² Samuel et al

³ Doğan et al

تراکم ساختمانی بالا می‌تواند خطر فروریزش و انسداد مسیرهای امداد را افزایش دهد (علیزاده و همکاران، ۲۰۲۱). میزان پایداری هر سازه که تحت تأثیر طراحی مهندسی، کیفیت ساخت و فناوری های مقاوم سازی قرار دارد، تعیین کننده عملکرد آن در مقابل تکان های شدید است (گریک و گوون^۱، ۲۰۲۳). به کارگیری اصول طراحی لرزه ای، استفاده از مصالح مناسب و نظارت کیفیت ساخت، از مؤثرترین راهکارها برای کاهش خسارات به شمار می‌روند (علیزاده و همکاران، ۲۰۲۱).

عوامل زمین شناسی نیز در تحلیل آسیب پذیری بسیار حیاتی هستند. جنس خاک مشخص کننده شدت یا تضعیف امواج لرزه ای است؛ خاک های نرم یا رسوبی این امواج را تقویت کرده و شدت لرزه را افزایش می دهند، در حالی که خاک های متراکم چنین نیستند (خدادادی و همکاران، ۱۳۹۹). فاصله از گسل نیز عاملی اساسی در تعیین ریسک است؛ مناطق نزدیک به گسل های فعال با احتمال لرزش شدیدتری مواجه اند. شیب زمین نیز در پایداری سازه اثرگذار است و در مناطق با شیب تند احتمال رانش زمین به مراتب بالاتر است (دوگان و همکاران، ۲۰۲۵).

ویژگی های شهری از جمله تراکم جمعیت، کیفیت زیر ساخت ها و دسترسی به خدمات امدادی در شدت آسیب پذیری تأثیرگذارند. تراکم جمعیت بالا باعث افزایش تعداد افراد در معرض خطر و دشواری در تخلیه اضطراری می شود (بریچت و همکاران^۲، ۲۰۱۳). زیر ساخت های ناکارآمد مانند شبکه های آب، برق و مسیرهای ارتباطی می توانند مدیریت بحران را مختل کنند (پویان و همکاران، ۱۳۹۹). دسترسی محدود به مراکز امدادی نیز منجر به افزایش تلفات می شود (بریچت و همکاران، ۲۰۱۳). برنامه ریزی شهری مقاوم و هدفمند، تقویت زیرساخت ها و بهبود مسیرهای ارتباطی، از راهکارهای مؤثر برای ارتقا تاب آوری شهری به شمار می رود (گریک و گوون، ۲۰۲۳).

پیشینه پژوهش

حسینیان راد و همکاران (۱۴۰۴) در پژوهش خود با عنوان «ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای ساختمانهای مهم و حیاتی در فضاهای شهری: مطالعه موردی: شهر خرم آباد» بیان کردند: ابتدا معیارهای اثرگذار بر آسیب پذیری ساختمان های مورد مطالعه از منابع و نقشه های ذکر شده استخراج شد. سپس با حضور در فضاهای مورد مطالعه، چک لیست طراحی شده، تکمیل و در ادامه داده ها در محیط نرم افزار Arc GIS با استفاده از منطق فازی مورد تحلیل قرار گرفتند و میزان آسیب پذیری فضاهای مورد مطالعه بر اساس شاخص های استخراج شده

¹ Gerçek & Güven

² Brecht et al

مشخص گردید. نتایج نشان داد که ۲۲ درصد ساختمان های مورد مطالعه، در طبقه با آسیب پذیری خیلی کم، ۳۸ درصد ساختمان ها آسیب پذیری متوسط، ۳۴ درصد آسیب پذیری زیاد و ۶ درصد در طبقه با آسیب پذیری خیلی زیاد قرار دارند.

شاهینی فر و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهش خود با عنوان «آسیب پذیری لرزه ای شهری با استفاده از مدل ANP مطالعه موردی: کلانشهر شیراز» بیان کردند: پژوهش حاضر به لحاظ هدف از نوع کاربردی بوده و بررسی در آن به روش توصیفی - تحلیلی انجام شده است. به منظور نیل به اهداف پژوهش ابتدا معیارهای مؤثر در آسیب پذیری بافت های شهری در برابر زلزله (عوامل کالبدی و فیزیکی، عوامل محیطی و مورفولوژی زمین، دسترسی به مراکز امدادی و درمانی و همجواری با تاسیسات خطرزا) شناسایی گردیده، در مرحله بعد نتایج حاصل از فرآیند تحلیل شبکه ای با ۴ معیار و ۲۱ زیر معیار تلفیق و نقشه میزان آسیب پذیری بافت های شهری در مناطق شهری شیراز تهیه گردیده است. نتایج تحقیق نشان داده که از میان معیارهای تأثیرگذار عوامل کالبدی و فیزیکی بیشترین امتیاز را دریافت کرده است و مناطق شهری مرکزی و جنوب غربی بیشترین آسیب پذیری را در شهر شیراز در مقابل زلزله را دارند.

لاله پور و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهش خود با عنوان «ارزیابی آسیب پذیری محلات شهری در برابر بحران زلزله (نمونه موردی: محلات شهر ورزقان)» بیان کردند: کل پهنه شهر ورزقان نسبت به رخداد زمین لرزه آسیب پذیر است. در محلاتی که کلاس های آسیب پذیری کم و خیلی کم، وسعت قابل توجهی از شهر را در بر گرفته، کاربری های بایر، فضاهای باز، کشاورزی و فضاهای سبز درصد قابل توجهی از فضای محله را اشغال نموده اند؛ و در نتیجه از آسیب پذیری پایینی در برابر زلزله برخوردار می باشند.

پوریواری و همکاران^۱ (۲۰۲۲) در پژوهش خود با عنوان «آسیب پذیری چند معیاره تحلیل سیستم های حمل و نقل شهری در برابر زلزله با در نظر گرفتن روش توپولوژیکی و جغرافیایی: یک مطالعه موردی» بیان کردند: در این پژوهش با هدف توسعه روشی برای آسیب پذیری شبکه خیابانی با استفاده از تحلیل توپولوژی و تحلیل تصمیم گیری چند معیاره فازی^۲ (FMCDM) رویکردی قطعی مبتنی بر بدترین سناریوی زلزله در محدوده مرکزی شهر تهران به کار گرفته شده است. اولین معیار با استفاده از FMCDM، با در نظر گرفتن شدت زلزله، نسبت ارتفاع

^۱ Pouriyavari et al

^۲ Fuzzy multi-criteria decision analysis

ساختمان کنار جاده به عرض جاده و نوع ساختمان پردازش شده است. دومی با استفاده از تحلیل مرکزیت شبکه که نشان‌دهنده محیط ساخته‌شده در ArcGIS است اندازه‌گیری شده است. شاخص نهایی آسیب‌پذیری با ترکیب این معیارها به‌دست‌آمده است. روش پیشنهادی مرتبط و ساده است که می‌تواند پیوندهای حیاتی را شناسایی کرده و آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه‌های جاده‌ای را ارزیابی کند.

پالازی و همکاران^۱ (۲۰۲۳) در پژوهش خود با عنوان «ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای مرکز تاریخی یونگای در سانتیاگو، شیلی» بیان کردند: این ارزیابی با اصلاح و ادغام یک روش مبتنی بر شاخص آسیب‌پذیری، به‌ویژه روش ماکرو-لرزه‌ای سطح اول که برای پیش‌بینی آسیب‌های زلزله و سناریوهای خسارت از طریق منحنی‌های شکنندگی سازه‌ای به کار می‌رود، انجام شده است. روش پیشنهادی با استفاده از داده‌های خسارت مشاهده‌شده پس از زلزله ۲۰۱۰ شیلی در ۲۹۲ واحد سازه‌ای بنایی غیر مسلح^۲ (URM) کالیبره شد. نتایج این پژوهش منجر به توسعه توابع جرم احتمالی^۳ (PMFs) برای حالات مختلف آسیب و ارائه توابع شکنندگی تجربی اولیه^۴ (EFFs) شد که برای اولین بار به‌صورت عمومی برای ساختمان‌های URM در شیلی منتشر می‌شود.

لی و همکاران^۵ (۲۰۲۴) در پژوهش خود با عنوان «مدل‌های خطر لرزه‌ای برای ساختمان‌های بنایی شهری با استفاده از الگوریتم‌های رگرسیونی بهینه‌شده» بیان کردند: در این تحقیق، سطح آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی به‌روزرسانی شده و یک مدل بهینه‌شده برای ارزیابی ریسک زلزله، براساس داده‌های خسارت ۲۴۰۷ ساختمان بنایی در شهردوجیانگیان، توسعه یافته است. یک الگوریتم نوآورانه برای شاخص عضویت در ریسک زلزله ارائه شد و براساس آن، منحنی آسیب‌پذیری برای ساختمان‌های بنایی با در نظر گرفتن شاخص‌های مختلف ریسک ایجاد گردید. همچنین، یک تابع بهبودیافته برای محاسبه شاخص ریسک زلزله پیشنهاد شده و مدل شاخص ریسک و مدل نواری برای مجموعه‌های ساختمانی بنایی شهری توسعه یافته است.

¹ Pallazi et al

² Unreinforced masonry

³ Probability mass functions

⁴ empirical fragility functions

⁵ Li et al

شکاف پژوهشی

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بخش زیادی از پژوهش‌ها بر ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای با رویکرد تک‌معیاره یا استفاده از مدل‌های سنتی مانند AHP یا روش‌های ماکرو-لرزه‌ای متمرکز بوده‌اند. همچنین، بسیاری از این مطالعات تنها به یکی از ابعاد کالبدی، محیطی یا شبکه‌های حمل‌ونقل پرداخته‌اند و کمتر پژوهشی به تلفیق داده‌های چندبُعدی (سازه‌ای، زمین‌شناسی، شهری) با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری نوین پرداخته است. در عین حال، مطالعات مشابه در ایران غالباً داده‌های میدانی دقیق و ترکیب مدل‌های فازی و شبکه‌ای را به‌طور هم‌زمان در محیط GIS به کار نبرده‌اند.

هدف پژوهش

هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی جامع آسیب‌پذیری لرزه‌ای بافت شهری مطالعه موردی شهر جویم با ترکیب شاخص‌های سازه‌ای، زمین‌شناسی و شهری در قالب یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره و تحلیل فضایی در محیط GIS است.

نوآوری پژوهش

نوآوری این تحقیق در سه بخش است:

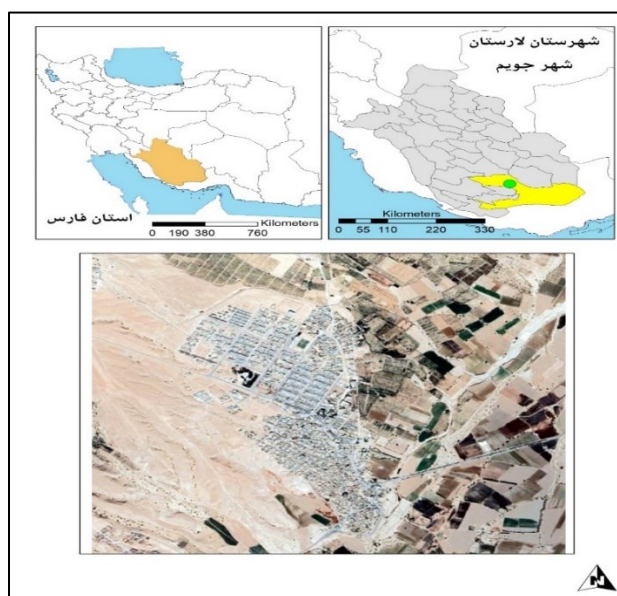
۱. استفاده هم‌زمان از شاخص‌های کالبدی، زمین‌شناسی و زیرساختی با رویکرد یکپارچه در ارزیابی آسیب‌پذیری.
۲. استفاده از داده‌های میدانی دقیق و به‌روز به همراه تحلیل فازی- شبکه‌ای در محیط GIS برای تولید نقشه‌های وزن‌دهی شده و تلفیقی.

منطقه مورد مطالعه

شهر جویم با جمعیتی بالغ بر ۶۵۹۰ نفر و مساحتی معادل ۲۹۰ هکتار، در بخش شمالی شهرستان لارستان واقع شده است. این شهر در مختصات جغرافیایی $53^{\circ}42'$ طول شرقی و $28^{\circ}15'$ عرض شمالی و در ارتفاع ۸۳۵ متر از سطح دریا قرار گرفته است. از سمت غرب، محدوده شهر توسط باغات پراکنده نخل، منطقه ممنوعه و تپه‌های کم‌ارتفاع احاطه شده است. در بخش شرقی، اراضی زراعی و باغات مشاهده می‌گردد و از سوی جنوب،

نخلستان‌ها و اراضی زراعی گسترده شناسایی می‌شود. ارتباط شهر با شهرهای همجوار از طریق دو دروازه اصلی برقرار شده است؛ دروازه جنوبی که با شهرهای شرفویه و بنا رویه مرتبط می‌باشد و دروازه شرقی که مسیر ارتباطی با شهرهای لار و جهرم را فراهم می‌نماید. از نظر کالبدی، بافت شهر عمدتاً ارگانیک و فرسوده ارزیابی شده است، به گونه‌ای که شدت فرسودگی در بخش‌های جنوبی بیشتر از بخش‌های شمالی گزارش شده است. با این حال، در نواحی جنوبی، ساخت‌وسازهای جدید بیشتری مشاهده می‌گردد (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۰).

به علت وجود ارتفاعات در سمت شمالی شهر و وجود آبراهه‌های فراوان، جهت دفع آب‌های سطحی شهر شمالی- جنوبی بوده و جهت باد غالب شهر نیز غربی- شرقی است. شهر در محدوده پهنه با خطر نسبتاً بالای زلزله قرار دارد و تاکنون شهر بارها و بارها در معرض زلزله‌های ویرانگر قرار گرفته است این شهر همانند دیگر نقاط شهرستان از اقلیمی گرم و خشک برخوردار بوده و تابستان‌های گرم و طاقت‌فرسا و مشکل بی‌آبی و کمبود بارش و متعاقباً باران‌های رگباری و سیل‌آسا از مشکلات عمده شهر به حساب می‌آید.



نقشه (۱): موقعیت سیاسی محدوده مورد مطالعه

داده‌ها و روش‌ها

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی-توسعه‌ای و از نظر روش، توصیفی-تحلیلی انجام شده است. داده‌های موردنیاز از طریق روش کتابخانه‌ای و اسنادی، شامل اطلاعات بلوک‌های آماری سال ۱۳۹۵ شهر جویم که توسط مرکز آمار ایران (۱۳۹۵) ارائه گردیده، گردآوری شد. به منظور تعیین و ارزیابی شاخص‌ها، پس از مرور ادبیات

پژوهش و نظرخواهی از متخصصان، ۱۱ زیرمعیار در سه بُعد «ویژگی‌های سازه‌ای»، «ویژگی‌های زمین‌شناسی» و «ویژگی‌های شهری» انتخاب گردید.

فرآیند شاخص‌سازی در محیط نرم‌افزاری Excel و با استفاده از جداول اطلاعات توصیفی در ArcGIS (ESRI, 2022) انجام شد. در ادامه، به منظور اولویت‌بندی پهنه‌های آسیب‌پذیر شهری در برابر زلزله، از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده گردید. لازم به ذکر است که مدل فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره با ساختار سلسله‌مراتبی است که توسط ساعتی^۱ (۲۰۰۸) توسعه یافته و از روش تحلیل شبکه‌ای (ANP) که دارای ساختار شبکه‌ای و وابستگی متقابل بین معیارهاست، متمایز می‌باشد (ویو و همکاران^۲، ۲۰۱۱). تحلیل‌ها و وزن‌دهی معیارها توسط نگارنده انجام شده است.

در جدول (۱)، شاخص‌ها و زیرشاخص‌های پژوهش حاضر بر اساس مرور ادبیات نظری مرتبط (لی و همکاران، ۲۰۲۴؛ همکاران، ۲۰۲۱؛ پالازی و همکاران، ۲۰۲۳) و با بهره‌گیری از نظر کارشناسان محلی و متخصصان حوزه برنامه‌ریزی شهری و مدیریت بحران انتخاب شدند. این شاخص‌ها در سه بُعد اصلی ویژگی‌های سازه‌ای، ویژگی‌های زمین‌شناسی و ویژگی‌های شهری دسته‌بندی گردیدند.

جدول (۱): ابعاد و زیرمعیارهای آسیب‌پذیری شهر جویم

ابعاد	زیرشاخص‌ها
ویژگی‌های سازه‌ای	۱. نوع مصالح ۲. تعداد طبقات ۳. سال ساخت ۴. تراکم ساختمانی ۵. میزان پایداری
ویژگی‌های زمین‌شناسی	۱. جنس خاک ۲. فاصله از گسل ۳. شیب زمین
ویژگی‌های شهری	۱. تراکم جمعیت ۲. دسترسی به خدمات امدادی ۳. کیفیت زیرساخت‌ها

¹ Saaty

² Wu et al

بعد از شناسایی مسئله، مجموعه‌ای از معیارهای ارزیابی (اهداف عینی یا صفات) در کانون توجه قرار می‌گیرند. با تعیین مجموعه‌ای از معیارها برای ارزیابی گزینه‌های تصمیم‌گیری، لازم است که هر معیار به صورت یک لایه در پایگاه داده‌های مبتنی بر GIS نشان داده شود. یک نقشه معیار بیانگر توزیع فضایی از صفتی است که بر پایه آن، درجه دستیابی به اهداف ملازم با آن اندازه‌گیری می‌شود (ارکانی و همکاران، ۱۳۹۹).

یافته‌ها

قضاوت‌های ۲۰ متخصص با استفاده از میانگین هندسی تجمیع گردید و ماتریس مقایسات زوجی برای معیار «ویژگی‌های سازه‌ای» تشکیل شد. مقادیر بر مبنای مقیاس ۱/۹ تا ۹ ساعتی تعیین و تقارن منطقی $a_{ij} = 1/a_{ji}$ رعایت گردید. پس از تشکیل ماتریس، بردار ویژه و بزرگ‌ترین مقدار ویژه λ_{max} محاسبه و نرخ سازگاری (CR) ارزیابی شد. مقدار به دست آمده $CR = 0.002 < 0.1$ بوده و سازگاری قابل قبول قضاوت‌ها تأیید می‌گردد. در این روش، بعد از تشکیل ماتریس مقایسات زوجی، ابتدا میانگین هندسی هر یک از سطرها و ستون‌ها محاسبه می‌شود؛ سپس در مرحله دوم ماتریس ستونی حاصل با تقسیم هر یک از مؤلفه‌هایش بر مجموع مؤلفه‌های موجود نرمالیزه می‌گردد. ماتریس ستونی جدید حاصل شده همان ماتریس وزن شاخص‌های مسئله مورد نظر است. فرم ریاضی این روش را در رابطه زیر می‌توان مشاهده نمود.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \xrightarrow{1} \begin{bmatrix} \sqrt[n]{a_{11} \dots a_{1n}} \\ \vdots \\ \sqrt[n]{a_{n1} \dots a_{nn}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \vdots \\ \pi_n \end{bmatrix} \xrightarrow{2} \begin{bmatrix} \frac{\pi_1}{\sum_{i=1}^n \pi_i} \\ \vdots \\ \frac{\pi_n}{\sum_{i=1}^n \pi_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این پژوهش ۳ معیار به عنوان معیارهای اصلی برای مدل سازی آسیب پذیری ساختمانی شهرها در برابر زلزله انتخاب گردیده است. ماتریس مقایسات زوجی ادغام شده از ۲۰ متخصص که پرسشنامه را پر کرده‌اند در جدول (۲) آمده است همه مقادیر در بازه مجاز ساعتی هستند و تقارن معکوس رعایت شده است.

جدول (۲): ماتریس مقایسات زوجی ویژگی‌های سازه‌ای (AHP، مقیاس ۱/۹ تا ۹)

معیار \ معیار	میزان پایداری	تراکم ساختمانی	سال ساخت	تعداد طبقات	نوع مصالح
نوع مصالح	1	1/2	4	1/2	1
تعداد طبقات	2	1	7	1	2
سال ساخت	1/3	1/6	1	1/7	1/4
تراکم ساختمانی	2	1	6	1	2
میزان پایداری	1	1/2	3	1/2	1

منبع: نگارنده

در جدول (۲)

"تعداد طبقات" نسبت به «سال ساخت» = ۷ (تسلط آشکار طبق ادبیات و تجربه تخصصی) → مقارنش ۱/۷.

"تعداد طبقات" و «تراکم ساختمانی» نسبت به یکدیگر = ۱ (اهمیت تقریباً برابر در خطرپذیری سازه‌ای)

"نوع مصالح" نسبت به «سال ساخت» = ۴ (برتری مشخص مصالح مقاوم)

"پایداری" نسبت به «سال ساخت» = ۳ (مزیت طراحی و اجرای مقاوم‌سازی)

سایر نسبت‌ها در بازه مجاز (۹/۱ تا ۹) و قابل دفاع هستند.

در مرحله بعدی ماتریس غیرفازی بدست آمده، نرمال شده است. بدین منظور هر درایه بر مجموع ستون مربوطه تقسیم می‌گردد. پس از نرمال کردن وزن هر گزینه براساس معیار مورد نظر بدست خواهد آمد. به عبارت دیگر محاسبه مقدار ویژه هر سطر با تخمین میانگین هندسی: میانگین هندسی آن سطر به جمع میانگین هندسی سطرها. پس از نرمال کردن ماتریس و انجام محاسبات نهایی، شاخص‌های اصلی به لحاظ ارجحیت (اهمیت) به قرار زیر می‌باشند:

جدول (۳) - وزن‌ها و رتبه‌بندی ویژگی‌های سازه‌ای (خروجی جدول ۲)

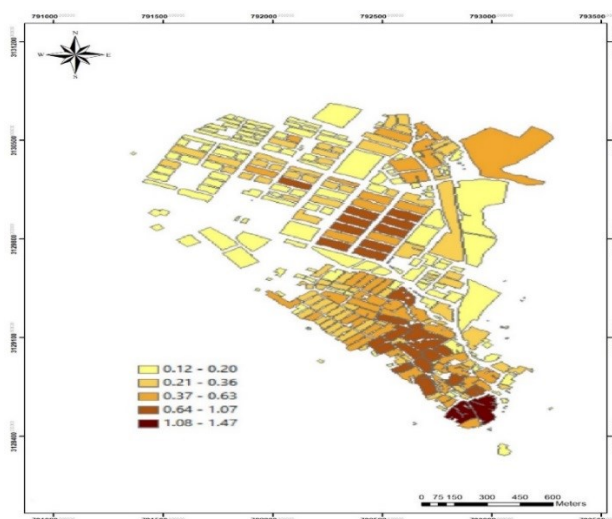
رتبه	وزن نهایی	معیار
1	0.321	تعداد طبقات
2	0.311	تراکم ساختمانی
3	0.165	نوع مصالح
4	0.156	میزان پایداری
5	0.048	سال ساخت

منبع: نگارنده

طبق جدول (۳)، معیار 'تعداد طبقات' با وزن ۰.۳۲۱ در رتبه نخست قرار دارد.

آمارسازگاری: $\lambda_{max} \approx 5,009$, $CI \approx 0.0023$, $CR \approx 0.002 (< 0.1)$

برای ارزیابی آسیب پذیری کلی پس از آنکه وزن معیارها با استفاده از روش AHP مورد محاسبه قرار گرفت، هرکدام از وزن‌ها با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در لایه‌های مربوطه اعمال شده و بدین ترتیب نقشه آسیب‌پذیری شهر جویم در برابر زلزله تهیه شده است:



نقشه (۲): توزیع مکانی شاخص تلفیقی ویژگی‌های سازه‌ای بر اساس وزن‌دهی مدل (AHP) در شهر جویم

منبع: نگارنده

نقشه (۲)، نشان‌دهنده ویژگی‌های سازه‌ای ساختمان‌های یک منطقه است که بر اساس معیارهای مختلف از جمله نوع مصالح، تعداد طبقات، سال ساخت، تراکم ساختمانی و میزان پایداری تحلیل شده است. رنگ‌های مختلف در نقشه نشان‌دهنده توزیع شاخصی خاص، احتمالاً میزان آسیب‌پذیری یا پایداری سازه‌ها، در محدوده‌ای مشخص هستند. بر اساس اولویت‌بندی معیارها، تعداد طبقات بیشترین تأثیر را داشته و پس از آن تراکم ساختمانی، نوع مصالح، میزان پایداری و سال ساخت قرار گرفته‌اند. بنابراین، مناطقی که دارای رنگ‌های تیره‌تر هستند احتمالاً دارای ویژگی‌هایی مانند تعداد طبقات بالا، تراکم ساختمانی زیاد و استفاده از مصالحی با مقاومت کمتر بوده و از نظر پایداری در وضعیت نامطلوب‌تری قرار دارند. از سوی دیگر، بخش‌هایی از نقشه که با رنگ‌های روشن‌تر نمایش داده شده‌اند، معمولاً دارای شرایط بهتری از نظر سازه‌ای هستند. این مناطق ممکن است شامل ساختمان‌های کم‌طبقه، با تراکم کمتر و استفاده از مصالح مقاوم‌تر باشند که موجب افزایش پایداری سازه‌ای می‌شود. بررسی این نقشه می‌تواند برای برنامه‌ریزی‌های شهری، شناسایی نقاط بحرانی و اتخاذ تصمیمات بهینه در حوزه بهسازی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها بسیار مفید باشد. این تحلیل همچنین می‌تواند به تصمیم‌گیری در خصوص توسعه شهری و مدیریت بحران در مناطق مستعد آسیب‌پذیری کمک کند.

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و پردازش داده‌ها در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، آسیب‌پذیری شهر جویم در برابر زلزله ارزیابی شده است. مناطقی با ساختمان‌های بلندمرتبه و تراکم بالا بیشترین خطر را در هنگام زلزله خواهند داشت. بنابراین، شهر جویم دارای درجه‌ای از آسیب‌پذیری در برابر زلزله است که لزوم رعایت استانداردهای مقاوم‌سازی و برنامه‌ریزی شهری ایمن را ضروری می‌سازد. نتایج تحلیل آسیب‌پذیری شهر جویم نشان می‌دهد که تعداد طبقات ساختمان‌ها، تراکم ساختمانی و نوع مصالح نقش مهمی در میزان خطرپذیری این شهر در برابر زلزله دارند. مناطق با ساختمان‌های مرتفع و تراکم بالاتر به دلیل فشار بیشتر بر سازه‌ها و محدودیت در مسیرهای خروج اضطراری، احتمال خسارات بیشتری را در هنگام وقوع زلزله خواهند داشت. همچنین، استفاده از مصالح نامرغوب می‌تواند شدت تخریب را افزایش دهد. با توجه به این عوامل، ضرورت اجرای سیاست‌های مقاوم‌سازی و نظارت بر ساخت‌وساز به‌منظور کاهش خطرات زلزله در جویم کاملاً محسوس است.

در ادامه ماتریس غیرفازی معیار ویژگی‌های زمین‌شناسی ارائه شده است:

برای معیارهای زمین‌شناسی (جنس خاک، شیب زمین، فاصله از گسل) ماتریس مقایسات زوجی بر مبنای مقیاس ساعتی (۱ تا ۹ و معکوس‌ها) تشکیل گردید. تقارن منطقی $a_{ij}=1/a_{ji}$ رعایت شد. سپس بردار ویژه، λ_{max} شاخص ناسازگاری (CI) و نرخ سازگاری (CR) محاسبه گردید. مقدار $CR = 0.008 (< 0.1)$ به دست آمد و سازگاری قضاوت‌ها تأیید می‌گردد.

جدول (۴) - ماتریس مقایسات زوجی ویژگی‌های زمین‌شناسی

معیار \ معیار	جنس خاک	شیب زمین	فاصله از گسل
جنس خاک	1	2	3
شیب زمین	1/2	1	2
فاصله از گسل	1/3	1/2	1

منبع: نگارنده

در مرحله بعدی ماتریس غیرفازی بدست آمده، نرمال شده است. بدین منظور هر درایه بر مجموع ستون مربوطه تقسیم می‌گردد. پس از نرمال کردن وزن هر گزینه براساس معیار موردنظر بدست خواهد آمد. به عبارت دیگر محاسبه مقدار ویژه هر سطر با تخمین میانگین هندسی: میانگین هندسی آن سطر به جمع میانگین هندسی سطرها. پس از نرمال کردن ماتریس و انجام محاسبات نهایی، شاخص‌های اصلی به لحاظ ارجحیت (اهمیت) به قرار زیر می‌باشند:

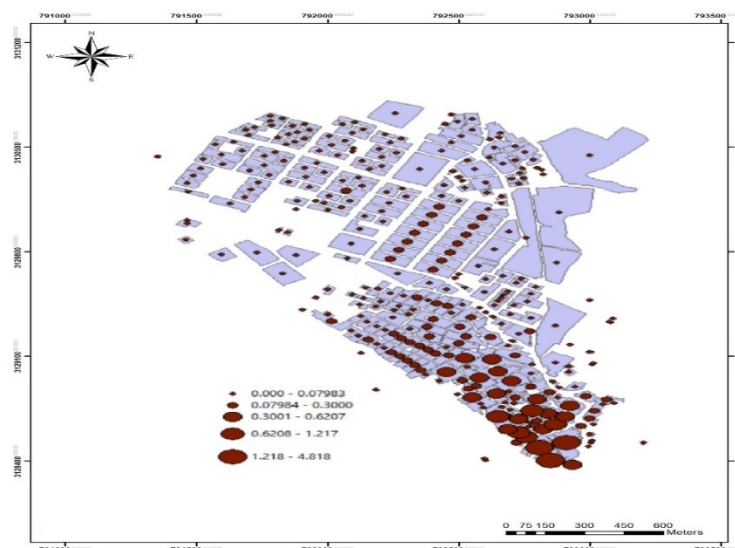
جدول (۵) - وزن‌ها و رتبه‌بندی ویژگی‌های زمین‌شناسی (خروجی جدول ۴)

رتبه	وزن نهایی	معیار
1	0.540	جنس خاک
2	0.297	شیب زمین
3	0.163	فاصله از گسل

منبع: نگارنده

آمار سازگاری: $\lambda_{max} \approx 3.009$ ، $CI \approx 0.0046$ ، $CR \approx 0.008 (< 0.1)$ ، 'جنس خاک' دارای بیشترین وزن (۰.۵۴۰) و 'فاصله از گسل' کمترین وزن (۰.۱۶۳) می‌باشد. طبق جدول (۵)،

برای ارزیابی آسیب پذیری کلی پس از آنکه وزن معیارهای زمین شناسی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، مورد محاسبه قرار گرفت، هرکدام از وزن‌ها با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در لایه‌های مربوطه اعمال شده و بدین ترتیب در نقشه (۳) شاخص‌های وزگی‌های زمین‌شناختی شهر جویم نشان داده می‌شود.



نقشه (۳): شاخص‌های ویژگی‌های زمین‌شناسی شهر جویم بر اساس وزن‌دهی مدل (AHP)

منبع: نگارنده

نقشه ارائه شده تحلیل فضایی معیارهای زمین‌شناسی شامل جنس خاک، فاصله از گسل، و شیب زمین را در یک منطقه شهری نشان می‌دهد. این معیارها بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، وزن‌دهی شده‌اند و تأثیر آن‌ها در مناطق مختلف به کمک دایره‌های قرمز با اندازه‌های متفاوت نمایش داده شده است. محدوده‌ی مورد بررسی از نظر توزیع این ویژگی‌ها دارای تفاوت‌های قابل توجهی است، به طوری که نواحی جنوبی و برخی بخش‌های مرکزی دارای مقادیر بالاتری در شاخص‌های زمین‌شناسی هستند، درحالی‌که نواحی شمالی وضعیت متعادل‌تری دارند. لایه‌های آبی‌رنگ نشان‌دهنده‌ی مرزبندی ساختمان‌ها و کاربری‌های شهری هستند، درحالی‌که اندازه دایره‌ها بیانگر شدت تأثیر معیارهای زمین‌شناسی در هر نقطه است. از نظر جنس خاک، بخش‌های جنوبی دارای خاکی با ویژگی‌های تأثیرگذارتر بر پایداری سازه‌ای هستند، که در تحلیل بیشترین وزن (۰.۵۴۰) را به خود اختصاص داده است. در این نواحی، جنس خاک احتمالاً دارای ترکیبی است که بر مقاومت ساختمان‌ها تأثیر

می‌گذارد. از نظر فاصله از گسل، مناطق مرکزی و شمالی نسبتاً دورتر از گسل‌های اصلی هستند، به همین دلیل در این نواحی دایره‌های کوچک‌تری دیده می‌شود، اما در بخش‌های جنوبی، نزدیکی به گسل باعث افزایش خطرپذیری شده است (با وزن ۰.۱۶۳). شیب زمین نیز یکی دیگر از عوامل مهم محسوب می‌شود (با وزن ۰.۲۹۷) که در بخش‌های جنوبی و برخی مناطق مرتفع مرکزی، شیب تندتری وجود دارد و می‌تواند بر پایداری سازه‌ها تأثیر منفی بگذارد. تحلیل این معیارها به تصمیم‌گیری برای توسعه شهری، شناسایی مناطق پرخطر و بهینه‌سازی زیرساخت‌های شهری کمک می‌کند.

نقشه (۳)، شاخص‌های ویژگی‌های زمین‌شناسی شهر جویم نشان می‌دهد که مناطق شمالی وضعیت متعادل‌تری دارند، درحالی‌که بخش‌های جنوبی و مرکزی به دلیل جنس خاک و نزدیکی به گسل، آسیب‌پذیری بیشتری در برابر زلزله دارند. این توزیع ناهمگون خطرپذیری نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی شهری و توسعه ساخت‌وسازها باید با در نظر گرفتن معیارهای زمین‌شناسی انجام شود. استفاده از مصالح مقاوم، پایداری سازه‌ها و رعایت استانداردهای ایمنی ساختمان‌سازی در مناطق پرخطر، از جمله اقداماتی است که می‌تواند میزان خسارت ناشی از زلزله را در جویم کاهش دهد. این تحلیل‌ها اهمیت توجه به مطالعات زمین‌شناسی را در فرآیند برنامه‌ریزی شهری و مدیریت بحران برجسته می‌سازد.

در ادامه ماتریس غیرفازی معیار ویژگی‌های شهری ارائه شده است:

برای معیارهای شهری (کیفیت زیرساخت‌ها، تراکم جمعیت، دسترسی به خدمات امدادی) ماتریس مقایسات زوجی بر مبنای مقیاس ساعتی تشکیل گردید. تقارن منطقی $a_{ij}=1/a_{ji}$ رعایت شد. سپس بردار ویژه λ_{max} شاخص ناسازگاری (CI) و نرخ سازگاری (CR) محاسبه گردید. به دلیل سازگاری کامل قضاوت‌ها، مقدار $CR = 0.000 (< 0.1)$ به دست آمد.

جدول (۶) - ماتریس مقایسات زوجی ویژگی‌های شهری

معیار \ معیار	کیفیت زیرساخت‌ها	تراکم جمعیت	دسترسی به خدمات امدادی
کیفیت زیرساخت‌ها	1	2	2
تراکم جمعیت	1/2	1	1
دسترسی به خدمات امدادی	1/2	1	1

منبع: نگارنده

در مرحله بعدی ماتریس غیرفازی بدست آمده، نرمال شده است. بدین منظور هر درایه بر مجموع ستون مربوطه تقسیم می‌گردد. پس از نرمال کردن وزن هر گزینه براساس معیار مورد نظر بدست خواهد آمد. به عبارت دیگر محاسبه مقدار ویژه هر سطر با تخمین میانگین هندسی: میانگین هندسی آن سطر به جمع میانگین هندسی سطرها. پس از نرمال کردن ماتریس و انجام محاسبات نهایی، شاخص‌های اصلی به لحاظ ارجحیت (اهمیت) به قرار زیر می‌باشند:

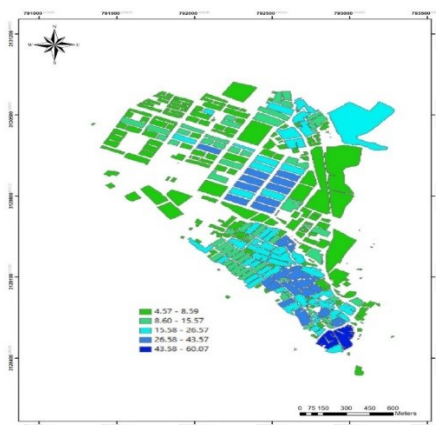
جدول (۷) - وزن‌ها و رتبه‌بندی ویژگی‌های شهری (خروجی جدول ۶)

رتبه	وزن نهایی	معیار
1	0.500	کیفیت زیرساخت‌ها
2	0.250	تراکم جمعیت
2 (مشترک)	0.250	دسترسی به خدمات امدادی

منبع: نگارنده

آمار سازگاری: $\lambda_{\max}=3.000$ ، $CI=0.000$ ، $CR = 0.000 (< 0.1)$

برای ارزیابی آسیب پذیری کلی پس از آنکه وزن معیارها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، مورد محاسبه قرار گرفت، هرکدام از وزن‌ها با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در لایه‌های مربوطه اعمال شده و بدین ترتیب درنقشه (۴) شاخص‌های ویژگی‌های شهری شهر جویم در برابر زلزله تهیه شده است:



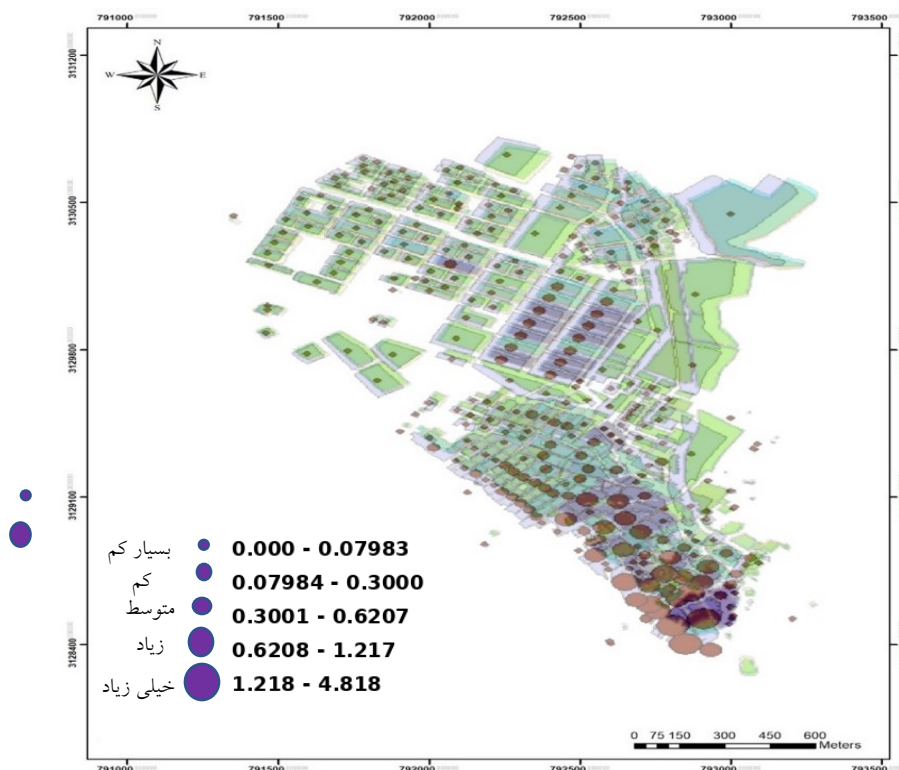
نقشه (۴): شاخص‌های ویژگی‌های شهری شهر جویم بر اساس وزن‌دهی مدل (AHP)

منبع نگارنده

نقشه (۴)، شاخص‌های ویژگی‌های شهری؛ درواقع توزیع فضایی معیارهای تراکم جمعیت، دسترسی به خدمات امدادی و کیفیت زیرساخت‌ها را در یک منطقه شهری نشان می‌دهد. این معیارها بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، وزن‌دهی شده‌اند که در آن کیفیت زیرساخت‌ها با بیشترین وزن (۰.۵۰۰) در رتبه اول، تراکم جمعیت با وزن ۰.۲۵۰ در رتبه دوم و دسترسی به خدمات امدادی با وزن ۰.۲۵۰ در رتبه مشترک قرار گرفته است. طیف رنگی نقشه از سبز روشن تا آبی تیره تغییر می‌کند که نشان‌دهنده اختلاف در شاخص‌های شهری است؛ به‌طوری‌که نواحی با رنگ سبز دارای وضعیت بهتری از نظر این معیارها هستند، درحالی‌که نواحی با رنگ آبی تیره شرایط نامطلوب‌تری دارند. بررسی الگوی توزیع نشان می‌دهد که مناطق شمالی و غربی دارای شرایط بهتری از نظر کیفیت زیرساخت‌ها، تراکم جمعیتی کمتر و احتمالاً دسترسی بهتر به خدمات امدادی هستند. در مقابل، مناطق جنوبی و مرکزی که دارای رنگ‌های آبی تیره و فیروزه‌ای هستند، دارای تراکم جمعیتی بالا، زیرساخت‌های ضعیف‌تر و احتمالاً دسترسی محدودتری به خدمات امدادی‌اند. این نقشه می‌تواند در برنامه‌ریزی شهری، تخصیص منابع و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با توسعه پایدار و کاهش آسیب‌پذیری مناطق شهری مورد استفاده قرار گیرد.

نقشه (۴)، شهر جویم نشان می‌دهد که مناطق شمالی و غربی از نظر زیرساخت‌ها و خدمات امدادی وضعیت بهتری دارند، درحالی‌که نواحی جنوبی و مرکزی به دلیل تراکم بالاتر و ضعف زیرساختی، آسیب‌پذیری بیشتری در برابر زلزله خواهند داشت. این توزیع ناهمگون نشان می‌دهد که برای کاهش خسارات زلزله، باید بر بهبود کیفیت زیرساخت‌ها، توسعه مسیرهای امدادرسانی و مدیریت جمعیت در مناطق پرتراکم تمرکز شود. تقویت ساختمان‌ها، بهبود راه‌های دسترسی و افزایش پایگاه‌های امدادی در نواحی پرخطر می‌تواند تاب‌آوری شهر را افزایش داده و خطرات ناشی از زلزله را کاهش دهد. این تحلیل‌ها اهمیت برنامه‌ریزی شهری دقیق و سرمایه‌گذاری در حوزه زیرساختی را برای کاهش آسیب‌های احتمالی برجسته می‌سازد.

در ادامه نقشه (۵)، نقشه تلفیقی نهایی آسیب‌پذیری ساختمانی شهر جویم در برابر زلزله است که بر اساس وزن‌دهی معیارهای سازه‌ای (مثل قدمت، کیفیت، تراکم و ...) و تحلیل در محیط GIS تولید شده؛ نشان داده شده است. نقشه مورد نظر حاصل ترکیب چند لایه اطلاعاتی (مثل قدمت ساختمان، مصالح، تراکم، کیفیت، دسترسی و ...) با روش وزن‌دهی AHP می‌باشد. هر معیار ابتدا به صورت جداگانه نرمال‌سازی شده، سپس با وزن اختصاصی خود در یک فرمول تلفیق شده و شاخص نهایی آسیب‌پذیری محاسبه گردیده است. نتیجه، یک عدد شاخص برای هر موقعیت است که در بازه ۰ تا حدود ۴.۸ قرار دارد.



نقشه (۵): شاخص تلفیقی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها در شهر جویم را نشان می‌دهد

نقشه (۵)، محدوده شهر جویم به همراه بلوک‌ها و قطعات ساختمانی را نشان می‌دهد که دایره‌های رنگی و اندازه‌دار نشان‌دهنده میزان آسیب‌پذیری نسبی هر بخش و رنگ‌ها بیانگر شدت آسیب‌پذیری هستند. اندازه دایره‌ها معمولاً میزان شاخص یا تراکم مورد نظر را در آن موقعیت نشان می‌دهد.

در نقشه (۵)، در بخش جنوبی و جنوب‌شرقی شهر جویم، خوشه‌های دایره آبی با اندازه نسبتاً بزرگ دیده می‌شود که این مناطق بیشترین آسیب‌پذیری را دارند.

مقدار بیشترین آسیب‌پذیری در این تحلیل حدود ۴.۸۱۸ است که در محدوده آبی قرار می‌گیرد.

بخش‌های شمالی شهر عمدتاً در بازه قرمز و نارنجی هستند → آسیب‌پذیری پایین.

الگوی کلی نشان می‌دهد که مناطق قدیمی‌تر، متراکم‌تر و دارای کیفیت ساخت پایین، به سمت جنوب و جنوب‌شرق، بیشترین آسیب‌پذیری را دارند.

بحث و نتیجه گیری

تحلیل آسیب‌پذیری ساختمانی شهر جویم در برابر زلزله با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS، نتایج قابل توجهی در مورد تأثیر عوامل مختلف بر پایداری سازه‌ها ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های سازه‌ای، عوامل زمین‌شناسی و معیارهای شهری، همگی نقش مهمی در تعیین سطح آسیب‌پذیری دارند. در این راستا، معیارهایی مانند نوع مصالح، تعداد طبقات، سال ساخت، تراکم ساختمانی و میزان پایداری در ارزیابی ساختمان‌ها در نظر گرفته شده‌اند. تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که مناطقی با تعداد طبقات بالا، تراکم ساختمانی زیاد و استفاده از مصالح کم‌دوام از آسیب‌پذیری بیشتری برخوردار هستند. این یافته‌ها اهمیت استفاده از مصالح مقاوم و کنترل ضوابط ساخت‌وساز را در کاهش خطرپذیری زلزله برجسته می‌کند. بررسی معیارهای زمین‌شناسی نیز نقش مهمی در این تحلیل ایفا کرده است. جنس خاک به‌عنوان مهم‌ترین عامل زمین‌شناسی شناخته شده است که در مناطق مختلف تأثیر متفاوتی بر پایداری سازه‌ها دارد. مناطق با خاک‌های سست و ناپایدار در معرض خطر بیشتری قرار دارند، درحالی‌که خاک‌های پایدارتر امکان کاهش خطرات ناشی از زلزله را فراهم می‌کنند. همچنین، نزدیکی به گسل یکی دیگر از عوامل کلیدی است که مناطق جنوبی شهر را در معرض خطر بالاتری قرار می‌دهد. مناطقی که فاصله کمی از گسل دارند، به دلیل قرارگیری در محدوده لرزه‌ای فعال، باید مورد توجه ویژه در طراحی ساختمان‌ها و مقاوم‌سازی قرار گیرند. از طرفی، شیب زمین نیز به‌عنوان یک فاکتور تأثیرگذار مشخص شده است، به‌طوری‌که ساختمان‌های واقع در مناطق شیب‌دار و مرتفع، در صورت عدم رعایت اصول مهندسی، پتانسیل بیشتری برای ناپایداری در برابر زلزله دارند.

علاوه بر عوامل زمین‌شناسی و سازه‌ای، ویژگی‌های شهری نیز تأثیر قابل‌توجهی بر میزان آسیب‌پذیری دارند (آلبالوسکو و همکاران^۱، ۲۰۲۲). در این پژوهش، سه معیار تراکم جمعیت، دسترسی به خدمات امدادی و کیفیت زیرساخت‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. کیفیت زیرساخت‌ها بیشترین تأثیر را در تعیین آسیب‌پذیری شهری دارد؛ بدین معنا که مناطقی با زیرساخت‌های ضعیف، در هنگام وقوع زلزله با مشکلات بیشتری مواجه خواهند شد. تراکم بالای جمعیت نیز به‌عنوان یک عامل خطرزا شناخته شده است، زیرا در مناطق متراکم، احتمال بروز خسارات جانی و مالی بیشتر است. همچنین، دسترسی محدود به خدمات امدادی می‌تواند در شرایط بحران، روند امدادرسانی را با چالش مواجه کند. تحلیل‌های فضایی نشان می‌دهد که مناطق شمالی و غربی شهر جویم، به دلیل

¹Albulescu et al

کیفیت بهتر زیرساخت‌ها، تراکم جمعیتی کمتر و دوری از گسل، نسبت به سایر مناطق در وضعیت مطلوب‌تری قرار دارند. در مقابل، مناطق جنوبی و مرکزی، به دلیل تراکم بالا، کیفیت پایین زیرساخت‌ها و نزدیکی به گسل‌های فعال، از آسیب‌پذیری بیشتری برخوردارند. در این مناطق، اجرای سیاست‌های مقاوم‌سازی و بهسازی زیرساختی باید در اولویت قرار گیرد.

از دیدگاه مدیریت شهری، نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای برنامه‌ریزی کاربری زمین، بهسازی و نوسازی بافت‌های فرسوده و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها قرار گیرد. شناسایی مناطق پرخطر و اجرای پروژه‌های بهسازی در این مناطق می‌تواند میزان خسارات ناشی از زلزله را کاهش دهد. به‌ویژه، تدوین قوانین سخت‌گیرانه‌تر در ساخت‌وساز، استفاده از فناوری‌های نوین در مهندسی زلزله و گسترش سیستم‌های امداد رسانی می‌تواند نقش مهمی در کاهش آسیب‌های احتمالی ایفا کنند. علاوه بر این، آموزش و فرهنگ‌سازی در زمینه زلزله و اقدامات پیشگیرانه برای ساکنان مناطق پرخطر می‌تواند سطح آمادگی جامعه را افزایش دهد. اطلاع‌رسانی درباره راهکارهای ایمن‌سازی ساختمان‌های مسکونی، رفتار صحیح هنگام زلزله و مشارکت شهروندان در برنامه‌های کاهش خطرات بلایای طبیعی، از جمله اقداماتی است که می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش خسارات جانی و مالی داشته باشد. در نهایت، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که ترکیب روش AHP و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ابزار قدرتمندی برای تحلیل و مدل‌سازی آسیب‌پذیری شهری در برابر زلزله است. استفاده از این روش‌ها در سایر شهرها و مناطق لرزه‌خیز می‌تواند به بهینه‌سازی تصمیمات مدیریت بحران، افزایش تاب‌آوری شهری و کاهش خطرات زلزله کمک کند. پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های آینده از مدل‌های تکمیلی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی و یادگیری ماشین برای افزایش دقت پیش‌بینی‌ها بهره ببرند و همچنین، اثرات متغیرهای اجتماعی و اقتصادی را در تحلیل آسیب‌پذیری مدنظر قرار دهند. در نهایت با توجه به آسیب‌پذیری بالای ساختمان‌های قدیمی در شهر جویم، پیشنهاد می‌شود برنامه‌ای جامع برای مقاوم‌سازی سازه‌های فرسوده اجرا شود. این برنامه می‌تواند شامل تقویت اتصالات، به‌روزرسانی مصالح ساختمانی و افزایش پایداری پی و اسکلت ساختمان‌ها باشد. همچنین، ارائه تسهیلات مالی به مالکان برای مقاوم‌سازی بناهای خود می‌تواند انگیزه لازم برای اجرای این اقدامات را فراهم کند. یکی از مشکلات شهر جویم، دسترسی محدود به خدمات امدادی در برخی نواحی پرجمعیت است. پیشنهاد می‌شود که مسیرهای اضطراری جدید طراحی و اجرا شوند تا در صورت وقوع زلزله، دسترسی به مناطق آسیب‌دیده تسهیل شود. همچنین، تجهیز پایگاه‌های امدادی به امکانات موردنیاز و آموزش گروه‌های داوطلب محلی برای مدیریت بحران می‌تواند به افزایش سرعت و کارایی عملیات امداد و نجات کمک

کند. پیشنهاد می‌شود که توسعه شهری در جویم بادر نظر گرفتن معیارهای زمین‌شناسی و خطر زلزله انجام شود. لازم است از ساخت‌وساز در نواحی با خاک سست، شیب تند و مناطق نزدیک به گسل جلوگیری شود. برای این منظور، استفاده از نقشه‌های ریزپهنه‌بندی زلزله در برنامه‌ریزی شهری و صدور مجوزهای ساخت ضروری است.

منابع

۱. ارکانی، احسان، حاتمی‌نژاد، حسین، قره، سهیل. (۱۳۹۹). شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر افزایش ریسک زلزله در بافت‌های فرسوده شهری با رویکرد ترکیبی تکنیک دلفی فازی و مدل فصلنامه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۰(۵۹)، ۲۰۴-۱۸۶.
۲. پویان، محمدحسن، صناعی، علی، انصاری، آذرنوش. (۱۳۹۹). مدل‌سازی آسیب‌پذیری بافت‌های شهری تحت سناریوهای مختلف به‌منظور مدیریت بحران در برابر زلزله (مطالعه موردی: منطقه یک شهرداری تهران). پژوهش‌های جغرافیای انسانی، ۵۲(۴)، ۱۲۷۵-۱۲۹۳.
۳. حسینیان‌راد، امیر، بیرانوندزاده، مریم، فلاحی خوشحی، مصطفی، شرفی، سیامک. (۱۴۰۴). ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های مهم و حیاتی در فضاها شهری (مطالعه موردی: شهر خرم‌آباد). مهندسی جغرافیایی سرزمین، ۹(۳)، ۷۸-۵۹.
۴. خدادادی، فاطمه، انتظاری، مژگان، سا سان‌پور، فرزانه. (۱۳۹۹). تحلیل آسیب‌پذیری شهری در برابر مخاطره زلزله با روش ELECTRE FUZZY (مطالعه موردی: کلان‌شهر کرج). تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۰(۵۶)، ۱۱۳-۹۳.
۵. شاهینی‌فر، حمیدرضا، باغانی، امین، ستائی مختاری، امین، مومن روانبخش، عماد. (۱۴۰۳). آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهری با استفاده از مدل ANP (مطالعه موردی: کلان‌شهر شیراز). نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، ۱۷(۲)، ۲۸-۱۵.
۶. لاله‌پور، منیژه، خیری‌زاده، منصور، ذاکری، مرتضی. (۱۴۰۱). ارزیابی آسیب‌پذیری محلات شهری در برابر بحران زلزله (نمونه موردی: محلات شهر ورزقان). مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱(۳۱)، ۲۴-۱.
۷. ملکی، سعید، مودت، الیاس. (۱۴۰۲). تحلیلی بر مدیریت بحران شهری ناشی از زلزله با تأکید بر شاخص کالبدی (مطالعه موردی: استان ایلام). فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای، ۴(۴)، ۳۸-۲۴.
۸. مرکز آمار ایران. (۱۳۹۵). سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۵: نتایج بلوک‌های آماری. تهران: مرکز آمار ایران.

9. Ahmed, M. S., & Morita, H. (2018). An analysis of housing structures' earthquake vulnerability in two parts of Dhaka city. Sustainability, 10(4), 1106.

10. Albulescu, A. C., Grozavu, A., Larion, D., & Burghiu, G. (2022). Assessing the earthquake systemic vulnerability of the urban centres in the South-East region of Romania. The tale of Galați and Brăila Cities, Romania. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 1106-1133.
11. Alizadeh, M., & others. (2021). Earthquake Vulnerability Assessment for Urban Areas: Integrating Environmental, Social, Economic, and Physical Dimensions. *Remote Sensing*, 13(22), Article 4519.
12. Brecht, H., Deichmann, U., & Wang, H. G. (2013). A Global Urban Risk Index. *Policy Research Working Paper (World Bank)* No. 6506. World Bank.
13. Doğan, A., Başeğmez, M., & Aydın, C. C. (2025). Assessment of the seismic vulnerability in an urban area with the integration of machine learning methods and GIS. *Natural Hazards*, 121, 9613–9652.
14. ESRI. (2022). *ArcGIS Desktop: Release 10.8*. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
15. Gerçek, D., & Güven, İ. T. (2023). Urban Earthquake Vulnerability Assessment and Mapping at the Microscale Based on the Catastrophe Progression Method. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14, 768–781.
16. He, C., Huang, Q., Bai, X., Robinson, D. T., Shi, P., Dou, Y., Zhao, B., Yan, J., Zhang, Q., Xu, F., & Daniell, J. (2021). A Global Analysis of the Relationship Between Urbanization and Fatalities in Earthquake-Prone Areas. *International Journal of Disaster Risk Science*, 12(6), 805-820.
17. Li, S. Q., Li, Y. R., Han, J. C., Qin, P. F., & Du, K. (2021). Seismic hazard models for typical urban masonry structures considering optimized regression algorithms. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(2), 457–478.
18. Li, S. Q., Li, Y. R., Han, J. C., Qin, P. F., & Du, K. (2024). Seismic hazard models for typical urban masonry structures considering optimized regression algorithms. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(6), 2797-2827.
19. Nazmfar, H. (2019). An integrated approach of the analytic network process and fuzzy model mapping of evaluation of urban vulnerability against earthquake. *Geomatics Natural Hazards & Risk*, 10(1), 1512-1528.
20. Palazzi, N. C., Barrientos, M., Sandoval, C., & de la Llera, J. C. (2023). Seismic vulnerability assessment of the Yungay's historic Urban Center in Santiago, Chile. *Journal of Earthquake Engineering*, 27(7), 1821-1848.
21. Pouryari, M., Mahboobi Ardakani, A. R., & Hassani, N. (2022). A Multi-Criteria Vulnerability of Urban Transportation Systems Analysis Against Earthquake Considering Topological and Geographical Method: A Case Study. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(3), 2147-2160.
22. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98.

23. Samuel, M. A., Xiong, E., Haris, M., Lekeufack, B. C., Xie, Y., & Han, Y. (2024). Assessing Seismic Vulnerability Methods for RC-Frame Buildings Pre- and Post-Earthquake. *Sustainability*, 16(23), Article 10392.
24. Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., & Davis, I. (2014). At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters. Routledge.
25. Wu, J., Jenerette, G. D., Buyantuyev, A., & Redman, C. L. (2011). Quantifying spatiotemporal patterns of urbanization: The case of the two fastest growing metropolitan regions in the United States. *Ecological Complexity*, 8(1), 1-8.