

## مدل‌سازی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های

## شهری در محیط GIS

(مطالعه موردی: شهر بابل)

**روش:** معیارهای مختلفی در مدل‌سازی

آسیب‌پذیری شهر دخیل هستند که اکثر آنها ماهیت مکانی دارند، لذا مدل‌سازی آسیب‌پذیری یک مسئله ارزیابی چندمعیاره مکانی می‌باشد. در این تحقیق ۱۱ شاخص آسیب‌پذیری توسط کارشناسان و مطالعه تحقیقات گذشته استخراج شد و مدل‌سازی در شرایط عدم قطعیت با استفاده از منطق فازی و ترکیب خطی وزن‌دار صورت پذیرفت.

**نتیجه‌گیری:** با توجه به اینکه نزدیک به ۷۰ درصد ساختمان‌های شهر بابل از آسیب‌پذیری متوسط به بالا برخوردارند، می‌توان شهر بابل را شهری آسیب‌پذیر در مقابل زلزله دانست که باید اقدامات اساسی مدیریت بحران قبل وقوع زلزله در دستور کار مسئولان مربوطه قرار بگیرد.

**کلمات کلیدی:** آسیب‌پذیری کالبدی، زلزله، سامانه‌های اطلاعات مکانی، ارزیابی چندمعیاره، منطق فازی.

یاسر ابراهیمیان قاجاری<sup>۱</sup>، علی اصغر آل شیخ<sup>۲</sup>، مهدیمدیری<sup>۳</sup>، رضا حسنی<sup>۳</sup>، محمدعلی نکویی<sup>۳</sup>

۱. نویسنده مسئول: دانشجوی دکترای GIS دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی آمایش و پدافند غیرعامل، تهران، ایران.

Email: y\_brahimian@yahoo.com

۲. عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، تهران، ایران.

۳. عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی آمایش و پدافند غیرعامل، تهران، ایران.

دریافت: ۹۴/۳/۲ پذیرش: ۹۴/۱۱/۱۰

**چکیده**

**مقدمه:** انسان همواره با زلزله به عنوان مخاطره‌ای طبیعی در طول تاریخ مواجه بوده است و زیان‌های فیزیکی، اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی فراوانی را بر اثر آن متحمل شده است. بهترین راه مقابله با این تهدید، ایجاد و حفظ آمادگی است که یکی از راهکارهای اساسی، آگاهی از درجه آسیب‌پذیری شهر در مقابل آن است.

## مقدمه

انسان در طول تاریخ همواره با زلزله به عنوان مخاطره‌ای طبیعی مواجه و زیان‌های کالبدی، اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی فراوانی را بر اثر آن متحمل شده است. وقوع چنین حادثه‌ای در بیشتر موارد، تأثیرات ویران‌کننده‌ای بر سکونتگاه‌های انسانی بر جای گذاشته و تلفات سنگینی بر ساکنان آنها تحمیل کرده است. زلزله هر ساله در گوشه و کنار جهان جان هزاران انسان را تهدید و میلیون‌ها دلار خسارت به بار می‌آورد. با به وقوع پیوستن هر زلزله شاهد تخریب بزرگی از بافت شهر و به زیر آوار رفتن هزاران شهروند می‌باشیم. [۱]

اگرچه زلزله همواره در زمرهٔ پیچیده‌ترین پدیده‌های طبیعی مورد توجه متخصصان و کارشناسان است و در سال‌های اخیر با افزایش دانش و معلومات بشر در رابطه با شناسایی زمین‌لرزه و علل بروز آن بحث‌های متفاوت و مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته، ولی کماکان پیش‌بینی زمان وقوع حتمی آن امکان‌پذیر نیست. [۲]

آنچه زلزله را به سانحه تبدیل می‌کند ناآگاهی انسان و توانایی در مواجهه و برخورد با آن است. این مسئله عموماً با گسترده‌ترین دخالت‌های نسنجیده انسانی در محیط طبیعی از جمله ساخت و سازهای بی‌رویه در حریم گسل، فقدان یا بی‌توجهی به ضوابط و استانداردهای ساخت و ساز تشدید می‌گردد. [۳]

زلزله به عنوان پدیده‌ای طبیعی به خودی خود نتیجه نامطلوبی در پی ندارد، آنچه از این پدیده یک فاجعه می‌سازد فقدان پیشگیری از تأثیر آن و نبود آمادگی

برای مقابله با آن است. بنابراین بهترین راه مقابله با این تهدید ایجاد و حفظ آمادگی در مقابل آن است. یکی از راه‌های اساسی برای ایجاد آمادگی در برابر زلزله و آگاهی از درجهٔ آسیب‌پذیری شهر در صورت وقوع می‌باشد. آسیب‌شناسی مناسب در شهرسازی می‌تواند نقش به‌سزایی در برنامه‌ریزی‌ها و سیاست‌گذاری‌های حوزهٔ شهری داشته باشد که این خود بیانگر ضرورت مدل‌سازی آسیب‌پذیری شهری می‌باشد. [۴]

آسیب‌پذیری در حالت کلی انواع مختلفی دارد که عبارتند از آسیب‌پذیری کالبدی، اجتماعی، اقتصادی و محیطی. [۵]

در این تحقیق فقط آسیب‌پذیری کالبدی شهر (ساختمان‌های شهری به عنوان یکی از المان‌های کالبدی) مدل‌سازی خواهد شد. با توجه به اینکه معیارهای مختلفی در تخمین آسیب‌پذیری کالبدی شهر دخیل هستند، لذا مسئله فوق یک مسئله ارزیابی چند معیاره<sup>۱</sup> بود که برای مدل‌سازی آسیب‌پذیری ابتدا باید شاخص‌های آسیب‌پذیری استخراج و وزن‌دهی، سپس با یک قاعده تصمیم‌گیری چند معیاره<sup>۲</sup> مناسب با همدیگر تلفیق شد تا بتوان به آسیب‌پذیری مورد نظر دست یافت. با توجه به اینکه بسیاری از شاخص‌ها، ماهیت مکانی دارند، می‌توان گفت سامانهٔ اطلاعات مکانی (GIS)<sup>۳</sup> با قابلیت‌های بسیار بالا در اخذ، ذخیره، ویرایش و تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی نقش به‌سزایی در مدل‌سازی آسیب‌پذیری دارد. با توجه به ماهیت چندمعیاره بودن مسئله، بدیهی است GIS

<sup>1</sup> Multi-Criteria Evaluation

<sup>2</sup> Multi-Criteria Decision Rule

<sup>3</sup> Geospatial Information Systems (GIS)

به تنهایی قادر به در نظر گرفتن همزمان معیارها و وزن آنها و ترکیب آنها نبود، لذا در اینگونه تحقیقات باید از مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM)<sup>۱</sup> مبتنی بر GIS استفاده کرد، چیزی که در این تحقیق نیز مدنظر می‌باشد.

### پیشینه تحقیق

تا کنون تحقیقات بسیار زیادی در زمینه مدل‌سازی انواع آسیب‌پذیری المان‌های مختلف شهری در مقابل تهدید زلزله با انواع تکنیک‌ها صورت پذیرفته است، اما با این وجود تحقیقی به طور موردی آن‌طور که مدنظر محققان می‌باشد در مورد شهر بابل صورت نگرفته و این مقاله را می‌توان از اولین تحقیقات در زمینه آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های شهر بابل دانست. تحقیقات صورت گرفته در داخل و خارج کشور به صورت پایان‌نامه‌های دانشجویی، طرح‌های تحقیقاتی و پروژه‌های ملی و بین‌المللی می‌باشد که در ادامه به برخی موارد استفاده شده در این تحقیق اشاره می‌شود.

یکی از مهم‌ترین اقدامات برای تعیین آسیب‌پذیری فیزیکی ساختمان‌ها در ایران توکلی‌ها در سال ۱۳۷۲ صورت گرفت که نتیجه بررسی‌های ایشان، به برآورد منحنی‌های شکنندگی برای سه نوع مختلف ساختمان براساس زلزله رودبار و منجیل گردیده است. وی خسارت وارده به روستاهای نزدیک به مرکز زمین‌لرزه ۱۳۶۹ شهرستان منجیل را مطالعه کرد و رابطه بین پیشینه شتاب زمین و خسارت‌دیدگی ساختمان‌ها را استخراج کرد. [۶]

مورد دیگر مربوط به ارزیابی آسیب‌پذیری پروژه شرکت جایکا<sup>۲</sup> برای شهر تهران است. در این پروژه آسیب‌پذیری شهر تهران از جنبه‌های گوناگون فیزیکی، انسانی و همچنین برای اماکن خاص بر اساس منحنی‌های شکنندگی تهیه و توسط توکلی‌ها بررسی شده است. [۷]

تقوایی و رنجبر نیز با استفاده از تکنیک تحلیل سلسله مراتبی، هفت معیار آسیب‌پذیری را وزن‌دهی و با یک مدل چندهدفه در محیط GIS به ارزیابی آسیب‌پذیری کالبدی واحدهای مسکونی شهر شیراز پرداختند. [۸]

طلوع سیلاوی و همکاران با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و مبتنی بر ریاضیات، بازه‌های نقشه آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر تهران را تولید کردند. [۹]

آقا طاهر و همکاران در تحقیقی با عنوان «وزن‌دهی فاکتورهای موثر در آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر تهران» به ارائه روشی نوین برای وزن‌دهی و ترکیب نقشه‌های معیارهای مختلف با استفاده از منطق فازی پرداختند. [۱۰]

احدنژاد روشتی در رساله دکتری خود با استفاده از دو مدل RISK\_UE و AHP آسیب‌پذیری شهر زنجان را در برابر زلزله مدل‌سازی کرد و در نهایت با ارائه سناریوهای مختلف زلزله در شدت‌های مختلف و با استفاده از مدل‌های موجود در زمینه تخمین خسارات، به ارزیابی خسارات انسانی و اقتصادی و اجتماعی شهر زنجان پرداخته است. [۱۱]

<sup>2</sup> Japan International Cooperation Agency (JICA)

<sup>1</sup> Multi-Criteria Decision Model

تخمین و مدل‌سازی خسارات ناشی از زلزله‌های احتمالی پرداخته است. [۱۵]

گیو وینازی در پژوهشی ابتدا به بررسی مدل‌های مختلف آسیب‌پذیری از جمله مدل RISK\_UE و سناریوهای مختلف آسیب پرداخته و سپس با استفاده از مدل RISK\_UE ارزیابی آسیب‌پذیری منطقه لیکوریان ایتالیا را بررسی و سناریوهای آسیب را انجام داده است. [۱۶]

لاتادا و همکاران در تحقیقی ضمن مدل‌سازی آسیب‌پذیری شهر بارسلون با استفاده از مدل RISK\_UE با به‌کارگیری مدل‌های موجود در زمینه تخمین خسارات، به ارزیابی خسارات انسانی و اقتصادی در شهر بارسلون پرداختند. [۱۷]

تانگ و ون<sup>۱</sup> در تحقیقی سیستم هوش مصنوعی برای ارزیابی خطر زلزله در شهر دیانگ در کشور چین را مبتنی بر توسعه GIS و شبکه مصنوعی مورد استفاده قرار دادند. این سیستم برای تشخیص ضعف لرزه‌ای ساختارهای در شرایط پیش از زلزله، ارزیابی سریع خسارت زلزله و فراهم ساختن شرایط فوری هوشمند پاسخگویی عمومی و دولتی در طول زلزله و بعد از آن کاربرد دارد. [۱۸]

### محدوده مورد مطالعه

مطالعه موردی در این تحقیق شهر بابل از شهرهای بزرگ و مرکزی استان مازندران است که در ۱۳ کیلومتری جنوب دریای خزر قرار گرفته است و رشته کوه البرز نیز حدوداً در ۱۰ کیلومتری جنوب آن قرار دارد. بابل بین ۳۶ درجه و ۵ دقیقه و ۳۶ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۲ درجه و ۳۰

عزیزی و اکبری با به‌کارگیری معیارهای شهرسازی و با استفاده از AHP و GIS و با استفاده از ده معیار به ارزیابی آسیب‌پذیری شهر تهران در برابر زلزله پرداخته‌اند. [۱۲]

زنگی‌آبادی و همکاران در پژوهشی که به صورت پیمایشی، تحلیلی و مبتنی بر مشخصات کمی و کیفی بوده است، به تحلیل شاخص‌های آسیب‌پذیری مسکن شهر اصفهان در برابر زلزله پرداختند. مطالعه آنها نشان داد میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهر اصفهان در برابر خطر زلزله بسیار بالا و دسترسی به مراکز امداد و نجات در مواقع بحرانی مانند وقوع زلزله در وضعیت نامطلوبی قرار دارد. [۱۳]

حاتمی‌نژاد با استفاده از روش تحلیلی ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و با بهره‌گیری از AHP و GIS، آسیب‌پذیری منطقه ۱۰ شهر تهران را بررسی کرده است. [۳]

بیتروفرنادکس در رساله دکتری خود به ارزیابی نقش اطلاعات و داده‌های جغرافیایی در مطالعات مربوط به اندازه‌گیری آسیب‌پذیری شهرها در برابر زلزله اشاره کرد و با استفاده از زیرساخت داده‌های مکانی به پهنه‌بندی آسیب‌پذیری اجتماعی و کالبدی شهر مدیلمین واقع در کلمبیا پرداخته است. [۱۴]

مارتینلی در مقاله‌ای با عنوان «ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها و ارائه سناریوهای آسیب برای شهرهای ایتالیا» ابتدا با استفاده از مدل‌های ارزیابی آسیب‌پذیری از جمله مدل Risk-UE میزان آسیب‌پذیری ساختمانی را ارزیابی و در نهایت با ارائه سناریوهای زلزله در شدت‌های مختلف به

<sup>1</sup> Tang & Wen

مقایسات زوجی توسط کارشناسان با استفاده از روش تحلیل توسعه‌ای چانگ محاسبه شد. بعد از استخراج شاخص‌ها و محاسبه وزن آنها، با استفاده از یک مدل مناسب ارزیابی چند معیاره، شاخص‌های فوق ترکیب و مدل‌سازی نهایی در محدوده مطالعاتی مورد نظر انجام گردید. همانطور که اشاره شد مسئله این تحقیق در واقع یک ارزیابی چندمعیاره است و مراحلی دارد که در شکل شماره ۲ نشان داده شده است. مراحل اصلی یک ارزیابی چندمعیاره عبارتند از آگاهی، طراحی و انتخاب. در مرحله آگاهی شاخصهای ارزیابی آسیب‌پذیری با نظر کارشناسان و تحقیقات گذشته استخراج می‌گردد. در مرحله طراحی با استفاده از تحلیل‌های GIS گزینه‌های ارزیابی تولید می‌شود. در مرحله انتخاب وزن شاخص‌ها محاسبه و با ترکیب نقشه‌های معیار نقشه آسیب‌پذیری نهایی تولید می‌شود. در ادامه ارزیابی چندمعیاره که چهارچوب نظری تحقیق می‌باشد به طور اجمالی معرفی و بعد از آن در قسمت مواد و روش‌ها مراحل مختلف تحقیق تشریح می‌گردد.

### چارچوب نظری تحقیق

#### ارزیابی چندمعیاره

با توجه به اینکه عوامل مختلفی در آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهر دخیل هستند، لذا محققان با یک مسئله ارزیابی یا تصمیم‌گیری چندمعیاره روبه‌رو می‌باشند. مدل‌های چند معیاره خود انواع مختلفی دارند که در یک دسته‌بندی کلی می‌توان آنها را به

دقیقه و ۵۲ درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. مساحت آن حدود ۱۴۳۱ کیلومتر مربع معادل ۵/۹۴ درصد کل استان می‌باشد. بابل تقریباً در ۴۵ کیلومتری شمال غربی ساری بوده و با تهران ۲۱۰ کیلومتر فاصله دارد. گسل‌های خزر به طول ۶۰۰ کیلومتر و البرز به طول ۶۸۰ کیلومتر از گسل‌های تأثیر گذار این محدوده بوده که از جنوب شهر بابل می‌گذرد. شکل شماره ۱ محدوده مورد مطالعه را به همراه گسل‌های مذکور نشان می‌دهد. در این شکل شهرستان بابل با رنگی متمایز از سایر شهرستان‌ها و شهر بابل با رنگی متمایز در محدوده شهرستان بابل نشان داده شده است.

### روش تحقیق

این تحقیق از نظر ماهیت و روش توصیفی - کمی و تحلیلی است، زیرا با ارایه اطلاعاتی از گزینه مورد مطالعه (در این تحقیق ساختمان‌های شهری) به توصیفی از آن پرداخته و سپس با روش‌های مختلف به تجزیه و تحلیل اطلاعات اقدام شده است. [۱۹] همچنین محقق به دنبال مدل‌سازی آسیب‌پذیری کالبدی شهر می‌باشد. به عبارتی محقق به دنبال عوامل و شاخص‌های آسیب‌پذیری و روابط بین آنهاست که همگی مجهول و به نوعی ماهیت تحقیق را اکتشافی می‌کند. در این تحقیق ابتدا ادبیات تحقیق مطالعه شد و با بررسی کارهای انجام شده یک سری شاخص‌های آسیب‌پذیری استخراج شد. برای تکمیل تحقیقات با مشورت و مصاحبه با کارشناسان شهرسازی، سازه، معماری و زلزله، شاخص‌های استخراج نهایی و تکمیل شد. وزن شاخص‌ها با

ساختمان‌ها می‌باشد. از طرفی ممکن است ساختمانی از نظر شاخص کیفیت ساخت امتیاز پایینی داشته باشد، اما از نظر قدمت ساختمان از امتیاز بالایی برخوردار باشد و در نهایت ضعف ناشی از کیفیت ساخت با قدمت ساختمان جبران شود. با توجه به اینکه بسیاری از شاخص‌های موثر در آسیب‌پذیری لرزه‌ای ماهیت مکانی دارند، بدیهی است مدل مورد نظر در این تحقیق مبتنی بر GIS و به عبارتی یک مدل GIS-MADM باشد.

ارزیابی چندمعیاره یک فرآیند شامل مراحل مختلف است که این مراحل با توجه به نوع ارزیابی (چند هدفه یا چند شاخصه) متفاوت می‌باشد. مراحل کلی تصمیم‌گیری چند شاخصه شامل سه مرحله «آگاهی»، «طراحی» و «انتخاب» است. [۲۰]

مرحله آگاهی مرحله شناخت، نیازسنجی و ساختاردهی مسئله می‌باشد. در پایان این مرحله معیارهای تصمیم‌گیری استخراج می‌شود و ساختار سلسله مراتبی تصمیم‌گیری مشخص می‌گردد. هدف نهایی مرحله طراحی تولید گزینه‌ها می‌باشد. این گزینه‌ها با توجه به هدف مسئله و قیود تعریف شده در مسئله از روی داده‌های موجود تولید می‌گردند. در مرحله انتخاب گزینه‌های تولید شده در مرحله طراحی با توجه به مقادیر شاخص‌ها برای هر گزینه و وزن شاخص‌ها با یکدیگر مقایسه شده و در پایان بهترین گزینه انتخاب شده یا گزینه‌های موجود ارزیابی و مرتب می‌شوند. [۲۴]

مدل‌سازی در این تحقیق نیز در سه مرحله آگاهی، طراحی و انتخاب صورت پذیرفته که در ادامه تشریح خواهد شد.

دو دسته مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه<sup>۱</sup> و مدل‌های تصمیم‌گیری چندهدفه<sup>۲</sup> تقسیم کرد. [۲۰] در تصمیم‌گیری چندهدفه، چندین هدف به طور همزمان برای بهینه شدن و تولید گزینه برتر مورد توجه قرار می‌گیرند، در حالیکه در تصمیم‌گیری چندشاخصه، انتخاب بهترین گزینه از بین گزینه‌های موجود یا ارزیابی گزینه‌ها (مرتب کردن گزینه‌ها) مد نظر است. [۲۱]

تفاوت اصلی مدل‌های تصمیم‌گیری چندهدفه با مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه در آن است که اولی در فضای تصمیم‌گیری پیوسته و دومی در فضای تصمیم‌گیری گسسته تعریف می‌گردند. [۲۲] در جدول شماره ۱ مقایسه بین این دو دسته مدل نشان داده شده است.

مدل‌های چندشاخصه خود به دو دسته مدل‌های جبرانی و غیرجبرانی تقسیم می‌شوند. مدل‌های جبرانی از شاخص‌هایی تشکیل شده‌اند که با یکدیگر در تعاملند، به این معنی که مقادیر نامطلوب یک شاخص می‌تواند توسط مقادیر مطلوب شاخص‌های دیگر پوشانده یا جبران شود. در مدل‌های غیرجبرانی تعامل و مبادله میان شاخص‌ها مجاز نیست. به عبارت دیگر نقطه ضعف موجود در یک شاخص توسط مزیت موجود در یک شاخص دیگر جبران یا پوشش داده نمی‌شود. [۲۳]

مدل ارزیابی آسیب‌پذیری در این تحقیق از نوع مدل‌های چندشاخصه جبرانی است زیرا، گزینه‌های تصمیم‌گیری ساختمان‌ها و هدف در نهایت محاسبه آسیب‌پذیری لرزه‌ای این

<sup>۱</sup> Multi Attribute Decision Model (MADM)

<sup>۲</sup> Multi Objective Decision Model (MODM)

## مرحله آگاهی

مهم‌ترین خروجی مرحله آگاهی شاخص‌های آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌هاست که در این تحقیق، ۱۱ شاخص با استفاده از نظرات کارشناسان و تحقیقات گذشته و با در نظر گرفتن شرایط خاص شهر بابل استخراج و در جدول شماره ۲ آورده شده است. در این جدول مقادیر هر کدام از شاخص‌ها به ۵ دسته بر اساس درجه آسیب‌پذیری از "خیلی کم" تا "خیلی زیاد" طبقه بندی شده است.

مهم‌ترین شاخص، "فاصله از گسل" می‌باشد که بدیهی است هرچه ساختمان‌ها به گسل‌های موجود نزدیک‌تر باشند، آسیب‌پذیرترند. شاخص مهم بعدی «تعداد طبقات» ساختمان می‌باشد که معادل با ارتفاع ساختمان است. اگر افزایش ارتفاع ساختمان‌ها با اصول ایمنی همراه نباشد آسیب‌پذیری را بالا خواهد برد، حتی اگر افزایش ارتفاع با رعایت ضوابط و محاسبات مناسب صورت گیرد. چون در این صورت عملیات تخلیه، جستجو و کمک‌رسانی را با سختی مواجه می‌کند. شاخص «کیفیت ابنیه» نیز تأثیر مهمی بر میزان آسیب‌پذیری ساختمان دارد. بدیهی است احتمال مقاومت ساختمان‌های با کیفیت بالا (نوساز) در مقابل زلزله نسبت به ساختمان‌های مخروبه و تخریبی بیشتر است. «عرض معبر» شاخص مهم دیگری است که هر چه کوچک‌تر باشد احتمال آسیب‌پذیری بیشتر خواهد بود زیرا با آوار شدن در خیابان، عملیات کمک‌رسانی به سختی صورت می‌گیرد. همچنین هرچه عرض معابر کمتر باشد، امکان ایجاد ترافیک عبوری نیز کمتر خواهد شد. [۲۵]

شاخص دیگری که در این مدل‌سازی در نظر گرفته شده است شاخص "قدمت ابنیه" می‌باشد که نقش مهمی در میزان آسیب‌پذیری بناها دارد. عملاً حتی اگر در یک ساختمان تمامی موازین مقاوم‌سازی رعایت شده باشد، بناهایی که قدمت بیشتری دارند از خطر تخریب بیشتری برخوردارند. بنابراین هر چه قدمت ابنیه بالاتر باشد، آسیب‌پذیری بیشتر می‌شود. طبیعتاً بافت‌های فرسوده شهر که قدمت ساختمان‌ها در آن بالاست جزو مناطقی هستند که در هنگام وقوع زلزله آسیب‌پذیرتر هستند. «تراکم ساختمانی» نیز دیگر شاخص مهمی است که با بیشتر شدن آن احتمال تخریب و آسیب‌پذیری بیشتر می‌شود. شاخص بعدی «درجه محصوریت» به معنای نسبت ارتفاع ساختمان به عرض معبر آن است که با افزایش مقدار آن آسیب‌پذیری ساختمان‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش درجه محصوریت احتمال بسته شدن معابر افزایش می‌یابد که باعث می‌شود با ریختن آوار ساختمان‌ها بر خیابان‌ها و بسته شدن آن‌ها، کمک‌رسانی‌های مختلف مانند خاموش کردن آتش ساختمان به مشکل بر بخورد. شاخص «مصالح ابنیه» هم بسیار مهم است، زیرا تأثیر مهمی در چگونگی پایداری ساختمان‌ها بر عهده دارد. اسکلت‌های فلزی و بتن مسلح نسبت به سایر مصالح آسیب‌پذیری کمتری داشته و حتی در صورت تخریب، آتش‌سوزی ایجاد شده در آن‌ها کمتر است. با وجود مصالح مقاوم‌تر درصد آسیب‌پذیری کمتر خواهد شد و البته در به کارگیری مصالح باید سعی گردد از مصالح سبک‌تر استفاده گردد تا در صورت خراب شدن آسیب کمتری رخ

دهد. شاخص مهم دیگر «مساحت قطعات» در نظر گرفته شده است، زیرا آسیب‌پذیری در قطعات کوچکتر به علت خرد شدن فضای باز و کاسته شدن فضای مفید و امن برای کمک رسانی نسبت به قطعات بزرگ بیشتر است. بنابراین هر چه مساحت قطعات پایین‌تر باشد به تبع آن آسیب‌پذیری نیز بیشتر خواهد بود. به عنوان نمونه باید گفت بافت‌های فرسوده شهری که متراژ قطعات عموماً کمتر از ۲۰۰ مترمربع است در صورت وقوع زلزله آسیب بیشتری خواهند دید. [۲۶]

«شیب زمین» هم به عنوان یکی از شاخص‌های آسیب‌پذیری لرزه‌ای مطرح می‌باشد چون تخریب در زمین‌های با توپوگرافی پرشیب به ویژه در خط‌الراس‌ها و قله‌ها به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد. طبق ضوابط ساخت و ساز، شیب مناسب برای شهرسازی ۵ تا ۶ درصد و حداکثر ۹ درصد می‌باشد. [۲۷] آخرین شاخص آسیب‌پذیری لرزه‌ای «سطح اشغال» به معنای نسبت اعیانی به عرصه می‌باشد که با افزایش آن آسیب‌پذیری افزایش می‌یابد.

#### مرحله طراحی

گزینه‌های تصمیم‌گیری در این تحقیق، ساختمان‌های شهر بابل می‌باشند که از نقشه‌های ۱/۲۰۰۰ شهری تهیه شده‌اند. تمامی داده‌ها از شهرداری بابل و برداشت‌های میدانی و گوگل ارث تهیه شده است. با توجه به اینکه برخی پارسل‌های موجود در منطقه مورد مطالعه فاقد بنا بوده‌اند، لذا قیدی روی داده‌ها اعمال شد و تنها پارسل‌هایی که دارای بنا بوده‌اند استخراج شدند. از ۱۰۹۷۵ پارسل موجود در شهر

بابل، ۲۰۵ پارسل فاقد بنا بوده‌اند، بنابراین تعداد گزینه‌های تصمیم‌گیری در این تحقیق ۱۰۷۷۰ ساختمان می‌باشد. همانطور که اشاره شد مطابق جدول شماره ۲ ساختمان‌های دارای بنا یا همان گزینه‌های تصمیم‌گیری متناسب با هر شاخص به طبقات مختلفی متناسب با درجه آسیب‌پذیری ناشی از هر شاخص دسته‌بندی شده‌اند. در این مرحله، این طبقه‌بندی در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.1 روی لایه ساختمان‌ها انجام شد که نتایج آن در شکل شماره ۳ آمده است. به نقشه‌های آسیب‌پذیری متناسب با هر معیار، نقشه‌های معیار آسیب‌پذیری گویند که در این تحقیق ۱۱ نقشه معیار آسیب‌پذیری تولید شده است. در هر کدام از نقشه‌های فوق ساختمان‌های شهر بابل متناسب با درجه آسیب‌پذیری به ازای هر معیار به ۵ دسته طبقه‌بندی شده‌اند. بدیهی است نقشه آسیب‌پذیری نهایی از ترکیب این ۱۱ نقشه معیار حاصل خواهد شد.

#### مرحله انتخاب

بعد از استخراج شاخص‌های آسیب‌پذیری و تولید گزینه‌ها، باید آسیب‌پذیری نهایی گزینه‌ها محاسبه شود. آسیب‌پذیری خود تابعی است از چندین شاخص که هر شاخص نسبتی نسبت به سایر شاخص‌ها دارد. بدیهی است برای محاسبه آسیب‌پذیری نهایی هر ساختمان ابتدا باید وزن شاخص‌ها مشخص شود، سپس با محاسبه میانگین وزن دار آسیب‌پذیری متناسب با هر شاخص، آسیب‌پذیری نهایی هر ساختمان محاسبه گردد. آنچه در این مرحله انجام می‌شود محاسبه وزن شاخص‌ها و میانگین وزن دار آسیب‌پذیری هر گزینه است.



مدل‌سازی که لازمه آن کمی‌سازی است باید به جای متغیرهای زبانی (کیفی) از متغیرهای کمی استفاده کرد. متغیرهای کمی در این تحقیق اعداد فازی مثلثی هستند که به همراه متغیرهای زبانی معادلشان در جدول شماره ۳ آورده شده‌اند.

بنابراین در این تحقیق، مقادیر شاخص‌ها اعداد فازی بود که برای محاسبه آسیب‌پذیری نهایی باید ترکیب خطی وزن‌دار فازی<sup>۱</sup> را طبق رابطه شماره ۱ محاسبه کرد. بدیهی است درجه آسیب‌پذیری نهایی هر ساختمان نیز عددی فازی خواهد بود.

$$\tilde{V}_i = \sum_{j=1}^n w_j * \tilde{r}_{ij}, i = 1, 2, \dots, m$$

در رابطه فوق  $\tilde{V}_i$  درجه آسیب‌پذیری فازی گزینه  $i$ ،  $w_j$  وزن شاخص  $j$  و  $\tilde{r}_{ij}$  مقدار فازی شاخص  $j$  برای گزینه  $i$  می‌باشد. بعد از تمامی محاسبات، با غیرفازی‌سازی درجه آسیب‌پذیری ساختمان‌ها، گزینه‌ها (ساختمان‌ها) بر اساس درجه آسیب‌پذیری غیرفازی شده مرتب می‌شوند و به طبقات مختلف از آسیب‌پذیری «خیلی کم» تا «خیلی زیاد» تقسیم می‌شوند.

همانطور که در رابطه شماره ۱ آمده است برای تعیین آسیب‌پذیری نهایی هر ساختمان باید میانگین وزن‌دار آسیب‌پذیری‌های متناسب با هر شاخص محاسبه شود. لذا محاسبه وزن شاخص‌ها خود از مهم‌ترین مراحل مدل‌سازی است که در این تحقیق از روش تحلیل توسعه‌ای چانگ از انواع Fuzzy AHP استفاده شده است که در بخش بعدی معرفی خواهد شد.

همانطور که اشاره شد ساختمان‌ها به ازای هر شاخص متناسب با درجه آسیب‌پذیری به ۵ دسته از آسیب‌پذیری «خیلی کم» تا «خیلی زیاد» طبقه‌بندی شده‌اند که در جدول شماره ۲ آورده شده است. بدیهی است کاربرد این متغیرهای زبانی عدم قطعیت‌هایی با خود به همراه خواهد داشت، چرا که مرز مشخصی بین دو طبقه آسیب‌پذیری وجود ندارد. یعنی آسیب‌پذیری زیاد با آسیب‌پذیری خیلی زیاد می‌تواند درجات مختلفی متناسب با خصوصیات ذهنی کارشناسان داشته باشد. به عنوان مثال ممکن است ساختمانی با توجه به یک شاخص، هم آسیب‌پذیری «زیاد» هم آسیب‌پذیری «خیلی زیاد» داشته باشد. یعنی با یک درجه عضویتی در طبقه آسیب‌پذیری «زیاد» قرار داشته باشد و با یک درجه عضویتی هم در طبقه آسیب‌پذیری «خیلی زیاد» قرار داشته باشد. به عنوان مثال در جدول شماره ۲ ساختمان‌های با عرض معبر ۱۵ تا ۲۴ متر در دسته آسیب‌پذیری «زیاد» و ساختمان‌های با عرض معبر بیشتر از ۲۴ متر در دسته آسیب‌پذیری «خیلی زیاد» در نظر گرفته شده‌اند. بدیهی است ساختمان با عرض معبر ۲۴ متر می‌تواند عضو هر دو دسته باشد و تعیین دقیق اینکه عضو کدام طبقه است به خاطر عدم قطعیت‌های موجود امکان‌پذیر نیست. البته می‌توان با قطعیت گفت ساختمان با ارتفاع ۱۰ متر در طبقه «خیلی زیاد» قرار ندارد، اما تعیین دقیق هر ساختمان در هر دسته دور از واقعیت است. استفاده از مجموعه‌های فازی بهترین روش مدیریت عدم قطعیت ناشی از متغیرهای زبانی می‌باشد که در این تحقیق استفاده شده است، چرا که برای مرحله

<sup>۱</sup> Fuzzy Weighted Linear Combination

## محاسبه وزن شاخص‌ها با روش تحلیل توسعه‌ای چانگ

محاسبه وزن شاخص‌ها بسیار مهم است چون تأثیر مستقیم در محاسبات آسیب‌پذیری و محصول نهایی تحقیق دارد. از آنجا که در این تحقیق برای محاسبه وزن نسبی شاخص‌ها از مقایسات زوجی آنها با استفاده از نظر کارشناسان استفاده شده است، لذا اهمیت محاسبه وزن در این حالت بیشتر می‌شود، چون عدم قطعیت‌هایی ناشی از قضاوت‌های ذهنی کارشناسان باید در محاسبات وزن در نظر گرفته شوند. کارشناسان برای مقایسه زوجی شاخص‌ها و بیان میزان برتری شاخص‌ها نسبت به همدیگر از متغیرهای زبانی استفاده کرده‌اند که در جدول شماره ۴ آورده شده است.

در جدول فوق متغیرهای زبانی، اعداد مقایسه زوجی در تکنیک AHP کلاسیک و اعداد فازی مثلثی متناظر با آنها آمده است. عدد فازی مثلثی نوع خاصی از اعداد فازی است که با استفاده از سه تایی مرتب (l,m,u) و رابطه ۲ تعریف می‌گردد. در هر عدد فازی مثلثی l حد پایینی، m مقدار میانه و u حد بالایی نامیده می‌شود [۳۱]:

$$\mu_{\tilde{M}} = \begin{cases} (x-l)/(m-l) & l \leq x \leq m \\ (u-x)/(u-m) & m \leq x \leq u \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

با تشکیل ماتریس مقایسه زوجی فازی می‌توان با یکی از روش‌های موجود به محاسبه وزن نسبی شاخص‌ها پرداخت، در این تحقیق از روش تحلیل توسعه‌ای استفاده شده است. فرآیند تحلیل توسعه‌ای یکی از روش‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی

۱۶ است که توسط آقای چانگ ارائه شد. [۲۸] پس از آن برخی دیگر از محققان روش‌های تحلیل سلسله مراتبی فازی متعددی را در زمینه‌های مختلف ارائه کردند که به مراتب پیچیده‌تر از این روش می‌باشند. [۲۹] در این روش پس از مشخص شدن شاخص‌ها، مقایسات زوجی بین شاخص‌ها با متغیرهای زبانی که در جدول شماره ۴ آمده است صورت می‌پذیرد و به جای متغیرهای زبانی از اعداد فازی مثلثی متناظر با هر متغیر زبانی استفاده می‌شود. به طور خلاصه می‌توان مراحل روش تحلیل توسعه‌ای چانگ را به صورت زیر بیان کرد:

مرحله ۱: تشکیل ماتریس مقایسه زوجی با اعداد فازی مثلثی ( $M_{n \times n}$ ) (n تعداد شاخص‌هاست)

$$\tilde{M}_{lm} = \begin{pmatrix} \tilde{m}_{11} & \dots & \tilde{m}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{m}_{n1} & \dots & \tilde{m}_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (l_{11}, m_{11}, u_{11}) & \dots & (l_{1n}, m_{1n}, u_{1n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (l_{n1}, m_{n1}, u_{n1}) & \dots & (l_{nn}, m_{nn}, u_{nn}) \end{pmatrix}$$

مرحله ۲: محاسبه میانگین هندسی ترکیبی فازی هر شاخص با روابط ۴ تا ۶ ( $\tilde{S}_i$ ) (i شماره سطر و j شماره ستون ماتریس)

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^n M_{ij} \otimes \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij} \right]^{-1}, i = 1, 2, \dots, n.$$

$$\sum_{j=1}^n M_{ij} = \left( \sum_{j=1}^n l_{ij}, \sum_{j=1}^n m_{ij}, \sum_{j=1}^n u_{ij} \right)$$

$$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij} \right]^{-1} = \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij}} \right)$$

لازم به ذکر است که در تحلیل توسعه‌ای چانگ چنانچه دو عدد مثلثی ( $\tilde{M}_1 = (l_1, m_1, u_1)$ ) و

$$\mu(d) = V(\tilde{M}_i \geq \tilde{M}_j) = \begin{cases} 1 & m_j \geq m_i \\ 0 & l_j \geq u_i \\ \frac{u_j - l_i}{(u_j - m_j) - (m_i - l_i)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

در این رابطه،  $d$  مختصات بالاترین نقطه تقاطع بین  $\mu_{\tilde{M}_2}$  و  $\mu_{\tilde{M}_1}$  است که در شکل ۴ نشان داده شده و مقدار آن از رابطه ۱۳ به دست می‌آید:

$$hgt(\tilde{M}_i \cap \tilde{M}_j) = \frac{u_j - l_i}{(u_j - m_j) - (m_i - l_i)}$$

مرحله ۴: محاسبه درجه بزرگی هر  $\tilde{S}_i$  نسبت به سایر  $\tilde{S}_i$ ها که برای  $k$  عدد فازی از رابطه ۱۴ قابل محاسبه است:

$$V(\tilde{M} \geq \tilde{M}_1, \tilde{M}_2, \dots, \tilde{M}_k) = \min V(M \geq M_i) \quad i=1, 2, \dots, k$$

چنانچه رابطه ۱۵ مفروض گردد:

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k) \quad k=1, 2, \dots, n; k \neq i$$

در این صورت بردار وزن به استفاده از رابطه ۱۶ به دست می‌آید:

$$W' = (w'_1, w'_2, \dots, w'_n)^T = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T$$

مرحله ۵: در این مرحله باید وزن‌های محاسبه شده طبق رابطه ۱۷ نرمال‌سازی شوند:

$$w_i = \frac{w'_i}{\sum_{i=1}^n w'_i}$$

مرحله ۶: محاسبه نرخ ناسازگاری

یکی از مراحل مهم در تحلیل سلسله مراتبی کلاسیک محاسبه نرخ ناسازگاری ماتریس مقایسه

$\tilde{M}_2 = (l_2, m_2, u_2)$  در نظر گرفته شود،

عملگرهای ریاضی به صورت روابط ۷ تا ۹ تعریف خواهند شد: [۳۳]

$$M_1 + M_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2)$$

$$M_1 \times M_2 = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2)$$

$$M_1^{-1} = \left(\frac{1}{u_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{l_1}\right), M_2^{-1} = \left(\frac{1}{u_2}, \frac{1}{m_2}, \frac{1}{l_2}\right)$$

البته باید توجه داشت که حاصلضرب دو عدد فازی مثلثی یا معکوس یک عدد فازی مثلثی، دیگر عدد فازی مثلثی نیست. این روابط فقط تقریبی از حاصلضرب واقعی دو عدد فازی مثلثی و معکوس یک عدد فازی مثلثی را بیان می‌کنند [۳۰]. بنابراین رابطه شماره ۴ به صورت رابطه ۱۰ قابل محاسبه خواهد بود:

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^n M_{ij} \otimes \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij} \right]^{-1} = \left( \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{ij} m_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{ij} u_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{ij} m_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{ij} m_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{ij} u_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{ij} l_{ij}} \right)$$

مرحله ۳: محاسبه درجه بزرگی یا ارجحیت  $\tilde{S}_i$ ها نسبت به همدیگر  $V(\tilde{M}_i \geq \tilde{M}_j)$  طبق رابطه ۱۱:

$$V(\tilde{M}_i \geq \tilde{M}_j) = \sup_{y \geq x} [\min(\mu_{\tilde{M}_1}(x), \mu_{\tilde{M}_2}(y))]$$

که این مقدار برای اعداد فازی مثلثی از رابطه ۱۲ به دست می‌آید:

زوجی است. روش‌های مختلفی برای محاسبه نرخ ناسازگاری در تحلیل سلسله مراتبی فازی ارائه شده است که یکی از آن روش‌ها غیرفازی سازی عناصر ماتریس مقایسه زوجی با یکی از روش‌های موجود و محاسبه نرخ ناسازگاری با روش کلاسیک می‌باشد. [۳۱ و ۳۲] در این صورت اگر نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱ باشد، نشان دهنده سازگاری قابل قبول مقایسات زوجی (نظرات کارشناسان) می‌باشد. روش‌های مختلفی برای غیرفازی‌سازی اعداد فازی ارائه شده است که در این تحقیق از روش غیرفازی‌سازی مرکز ثقل استفاده شده است.

بهترین مقدار غیرفازی یک عدد فازی  $(BNP)^{33}$  برای عدد فازی مثلثی  $\tilde{M} = (l, m, u)$  از روش غیرفازی‌سازی مرکز ثقل از رابطه ۱۸ قابل محاسبه است: [۳۶]

$$BNP = l + \frac{(u-l) + (m-l)}{3}$$

## یافته‌ها

مدل آسیب‌پذیری تشریح شده در این تحقیق برای ساختمان‌های شهر بابل پیاده‌سازی شده است. تعداد کل ساختمان‌های دارای بنای منطقه مورد مطالعه ۱۰۷۷۰ واحد (پارسل) می‌باشد. داده‌های توصیفی هر ساختمان متناسب با ۱۱ شاخص از شهرداری بابل و اداره راه و شهرسازی بابل، بازدیدهای میدانی و یک سری پردازش روی داده‌های خام تهیه شده است. وزن‌دهی شاخص‌ها در تحقیق با استفاده از نظرات کارشناسان از طریق مقایسات زوجی و روش تحلیل توسعه‌ای چانگ صورت گرفته است. مقایسات زوجی و وزن نهایی شاخص‌ها در جدول شماره ۵ آورده شده است. همچنین برای اطمینان از

سازگاری بین نظرات کارشناسان نرخ ناسازگاری به روش که توضیح داده شده محاسبه گشته و میزان نرخ ناسازگاری ۰/۰۴۹ به دست آمده که حاکی از سازگاری قابل قبول نظرات کارشناسان است. لازم به ذکر است تمامی محاسبات در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزارهای متلب (نسخه ۸/۶)، اکسل (نسخه ۲۰۱۰) و ArcGIS (نسخه ۱۰/۱) صورت پذیرفته است. نقشه نهایی آسیب‌پذیری که در آن عدد آسیب‌پذیری هر ساختمان میانگین وزن‌دار آسیب‌پذیری‌های متناسب با هر شاخص می‌باشد در شکل شماره ۵ نشان داده شده است.

بعد از ارزیابی آسیب‌پذیری کالبدی در محدوده مورد مطالعه این نتایج حاصل شد که از ۱۰۷۷۰ واحد ساختمان شهر بابل تعداد ۱۰۴۵ واحد معادل ۱۰ درصد ساختمان‌ها از آسیب‌پذیری خیلی کمی برخوردارند، ۲۶۰۵ ساختمان یعنی حدود ۲۴ درصد ساختمان‌ها آسیب‌پذیری کم، ۲۸۵۲ ساختمان معادل ۲۷ درصد آسیب متوسط، ۳۰۵۹ واحد معادل ۲۸ درصد آسیب‌پذیری زیاد و ۱۲۰۹ واحد یعنی حدود ۱۱ درصد ساختمان‌ها از آسیب‌پذیری خیلی زیادی برخوردارند. با توجه به اینکه نزدیک به ۷۰ درصد ساختمان‌های بابل از آسیب‌پذیری متوسط به بالایی برخوردارند، لذا بابل شهری آسیب‌پذیر در برابر زلزله بوده که باید اقداماتی جدی در زمینه مقاوم‌سازی سازه‌ها، مدیریت بحران، امداد و نجات و به کارگیری راهکارهای شهرسازی و برنامه‌ریزی شهری برای ایجاد آمادگی در مقابل زلزله در این شهر صورت پذیرد.

## بحث و نتیجه‌گیری

محصول نهایی این تحقیق نقشه آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهر بابل در مقابل زلزله (شکل شماره ۵) می‌باشد که نمایانگر این است نزدیک به ۷۰ درصد ساختمان‌های شهر بابل از آسیب‌پذیری لرزه‌ای بالایی برخوردارند. با بررسی دقیق نقشه آسیب‌پذیری می‌توان به این نتیجه رسید اکثر ساختمان‌های در محدوده جنوب شهر بابل (محدوده‌های حوالی پل محمدحسن خان، میدان امام حسین، تقاطع غذیر و میدان انتفاضه) از آسیب‌پذیری بالاتری نسبت به سایر نقاط شهر برخوردارند. با بررسی دقیق‌تر نقشه‌ها و مطالعات میدانی می‌توان به این نتیجه رسید که آسیب‌پذیری بالاتر ساختمان‌های محدوده جنوبی بابل هم به دلیل نزدیکی نسبی بیشتر به گسل‌های منطقه و هم به خاطر قدمت بالاتر ساختمان‌ها (متوسط ۳۰ سال) در این محدوده از شهر می‌باشد. از طرفی بالابودن درجه محصوریت در این محدوده از شهر نسبت به سایر ساختمان‌های شهر خود مدرکی دال بر بی‌توجهی شهرداری به ساخت و ساز در این محدوده شهری است که خود از دیگر دلایل افزایش آسیب‌پذیری این محدوده می‌باشد. لازم به ذکر است که در اکثر شهرهای استان مازندران از جمله بابل به علت قیمت بالای زمین و تراکم جمعیتی زیاد، درجه محصوریت و تراکم ساختمانی بالاست که نتیجه آن بالارفتن درجه آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در برابر زلزله می‌شود. همچنین سطح اشغال بالاتر از سطح اشغال استاندارد (۶۰ درصد) ساختمان‌های بابل به

ویژه در محدوده جنوبی از دیگر دلایل آسیب‌پذیری بالای ساختمان‌ها در برابر زلزله می‌باشد. محصول نهایی این تحقیق (نقشه آسیب‌پذیری) می‌تواند به عنوان یکی از لایه‌های مهم در انواع مسایل مرتبط با برنامه‌ریزی شهری همانند مکان‌یابی انواع کاربری‌ها، تغییر کاربری‌ها، تعیین سرانه کاربری‌ها در هر منطقه، طرح‌های آمایش سرزمین، طرح‌های جامع شهری، برنامه‌ریزی حمل و نقل، تخمین آسیب‌پذیری سایر المان‌های شهری (مانند شبکه راه‌ها) و ارائه راهکارهای عملی در راستای کاهش آسیب‌پذیری و به ویژه در مدیریت بحران و امداد و نجات استفاده شود.

## پیشنهادات

با توجه به نتایج تحقیق که حکایت از آسیب‌پذیری بالای شهر بابل در مقابل زلزله دارد و همچنین ضرورت بسیار بالای ایجاد و حفظ آمادگی در برابر هر گونه بحران، پیشنهاد می‌شود نتایج این تحقیق به صورت عملیاتی در دستور کار متخصصان مربوطه قرار گیرد. همچنین پیاده‌سازی مدل ارائه شده در قالب یک نرم افزار تجاری و در واقع توسعه یک سامانه تصمیم یار مکانی<sup>۱</sup> به عنوان ابزاری مهم در مباحث شهری پیشنهاد می‌گردد. از جمله پیشنهاداتی که می‌توان برای تحقیقات آینده ارائه داد مدل‌سازی آسیب‌پذیری سایر المان‌های کالبدی شهر مانند شبکه راه‌ها و تأسیسات می‌باشد. همچنین مدل‌سازی سایر آسیب‌پذیری‌ها مانند آسیب‌پذیری اجتماعی یا اقتصادی پیشنهاد می‌گردد. در ضمن، عدم قطعیت موجود در نظرات کارشناسی و داده‌ها را می‌توان با

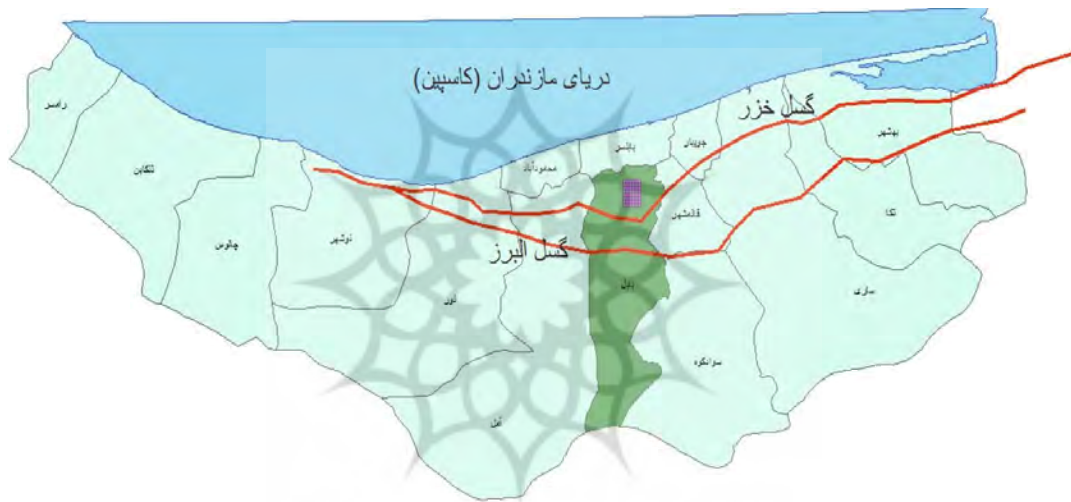
<sup>۱</sup> Spatial Decision Support System

### سپاسگزاری

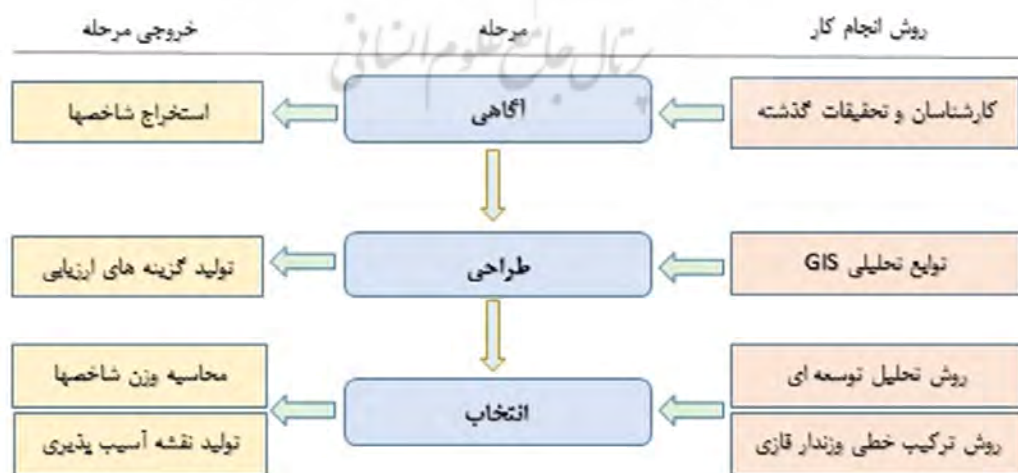
در پایان از زحمات آقای مهندس محمد جواد طاهری امیری و خانم مانده جواهری بارفروشی در مراحل تحقیق به ویژه گردآوری اطلاعات توصیفی ساختمان‌های شهر بابل تقدیر به عمل می‌آید. همچنین از کارشناسان شهرداری بابل به خاطر در اختیار قرار دادن نقشه‌های شهر بابل تقدیر و تشکر می‌شود.

سایر تئوری‌های عدم قطعیت غیر از فازی کلاسیک نیز انجام داد و به نتایج دقیق‌تری دست یافت. لذا پیشنهاد می‌گردد با توجه به توسعه منطقه فازی در چند دهه گذشته و مطرح شدن مباحثی مانند فازی نوع دوم و فازی شهودی از این دستاوردهای جدیدتر در مدیریت عدم قطعیت‌های موجود استفاده شود.

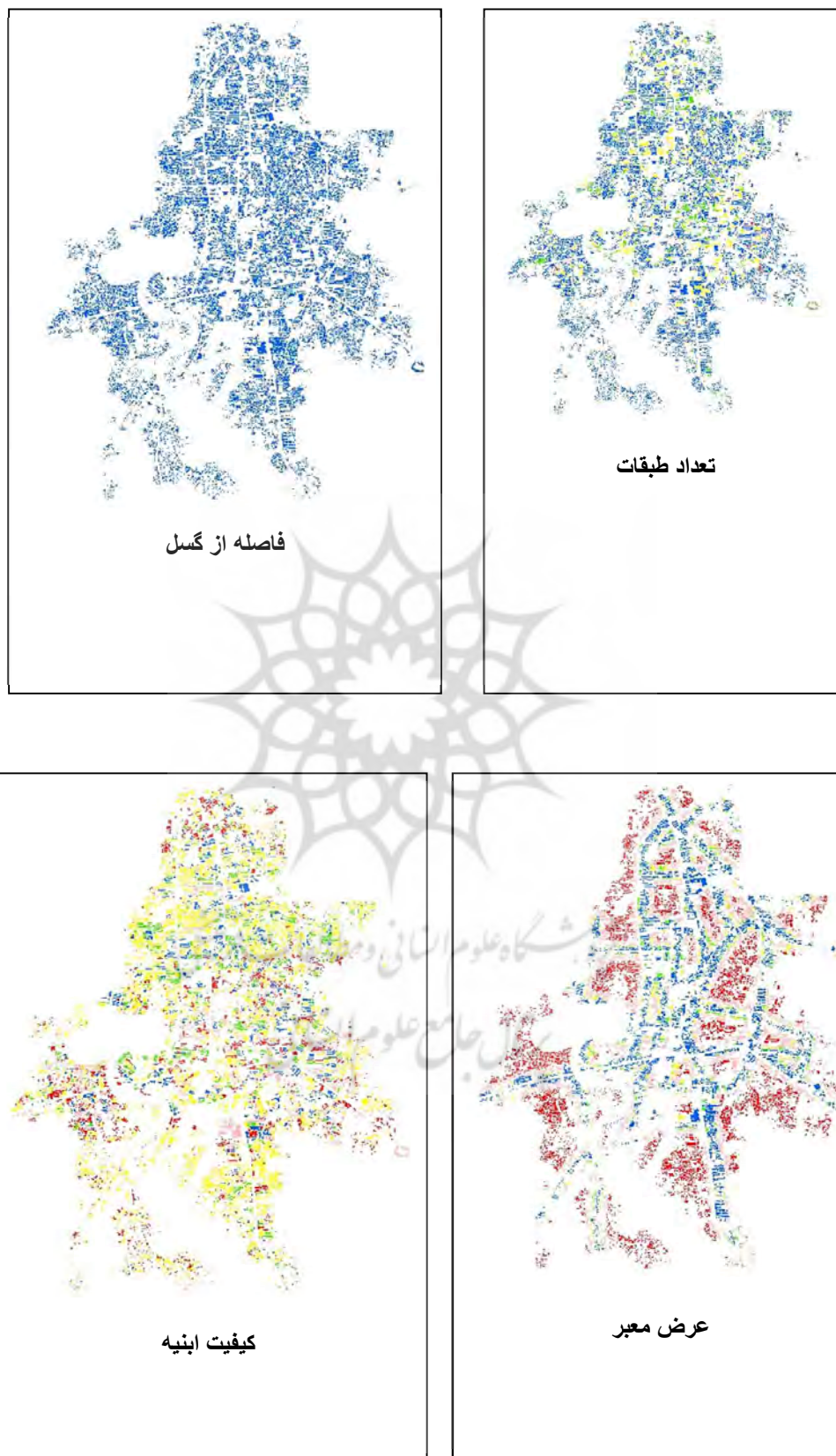
شکل شماره ۱: محدوده مورد مطالعه و گسل‌های آن



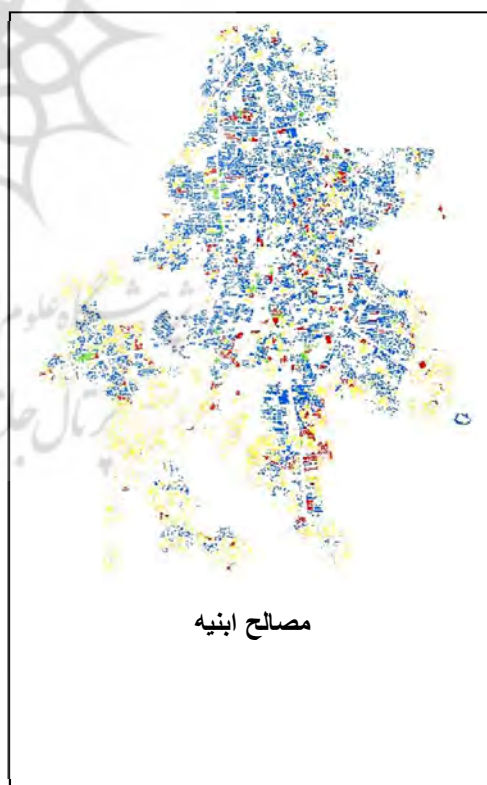
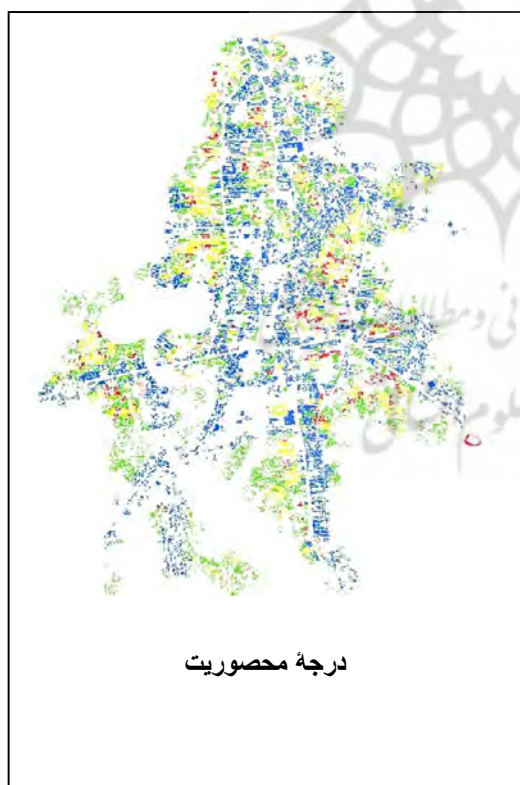
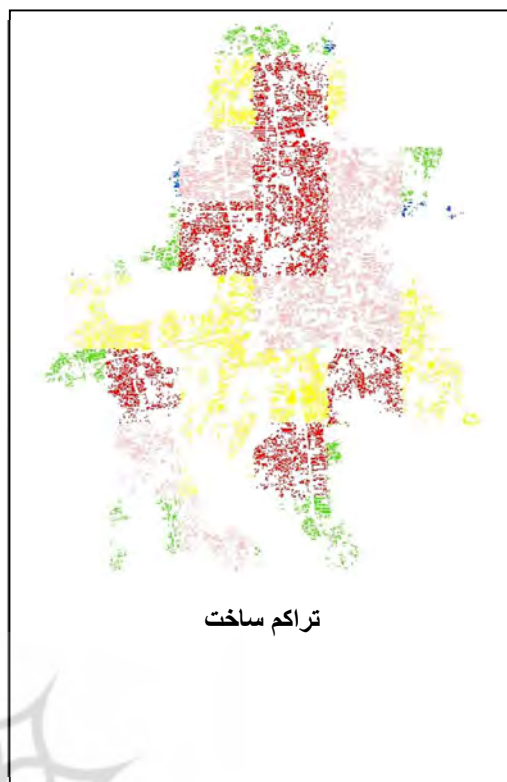
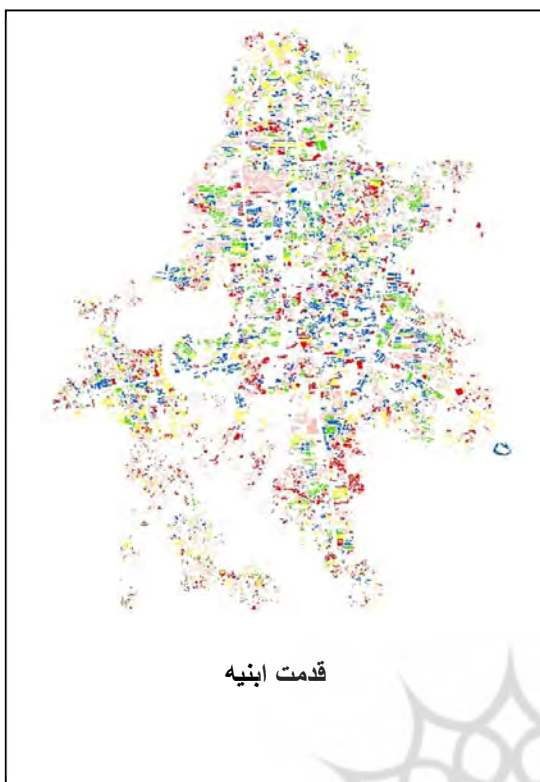
شکل شماره ۲: مراحل کلی انجام تحقیق



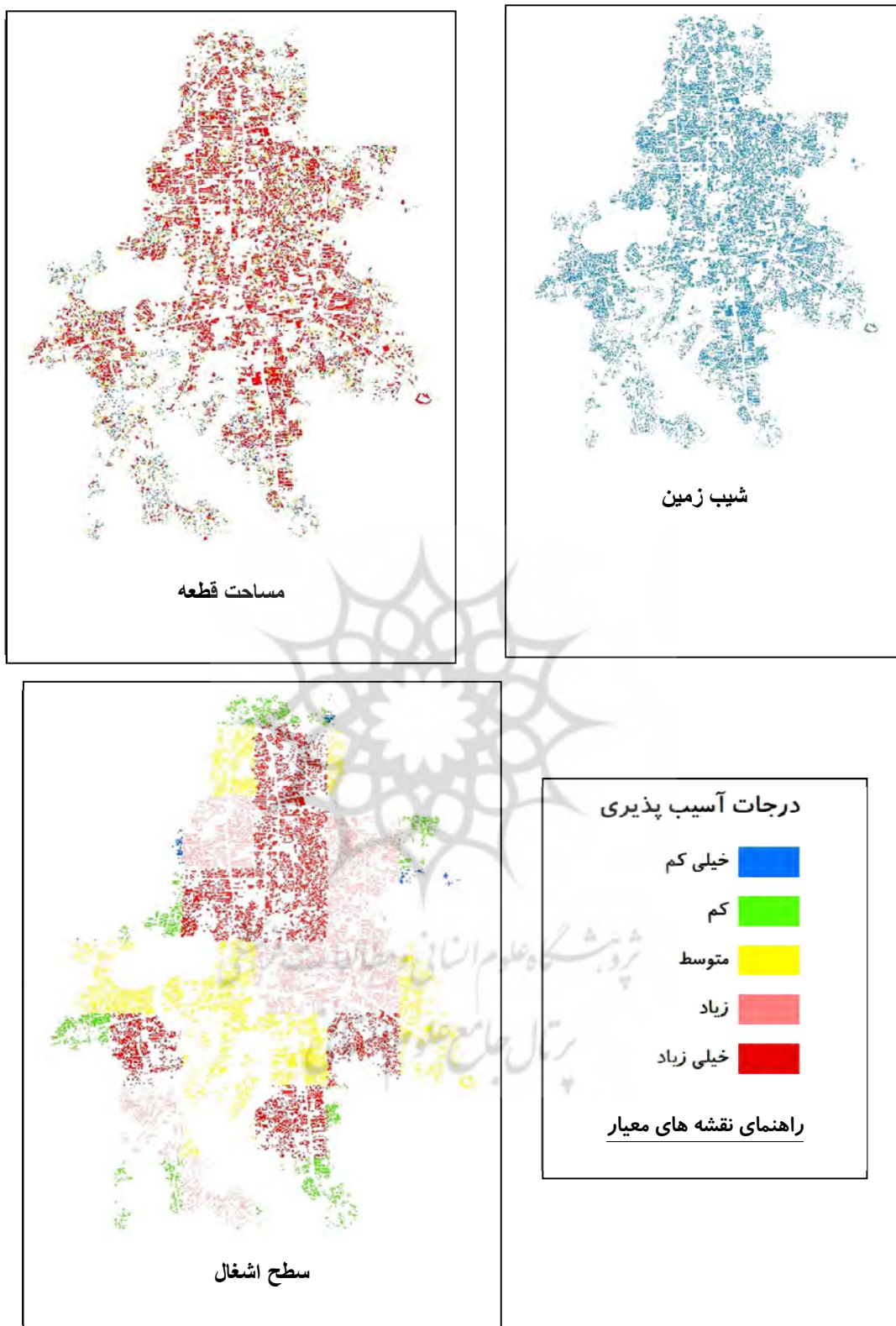
شکل شماره ۳: نقشه‌های معیار آسیب‌پذیری متناسب با هر شاخص



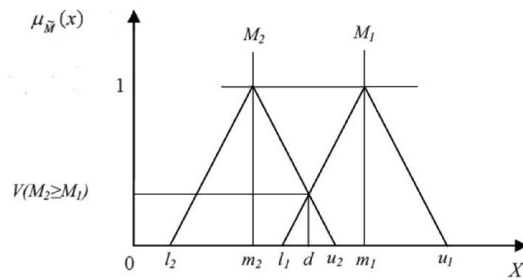




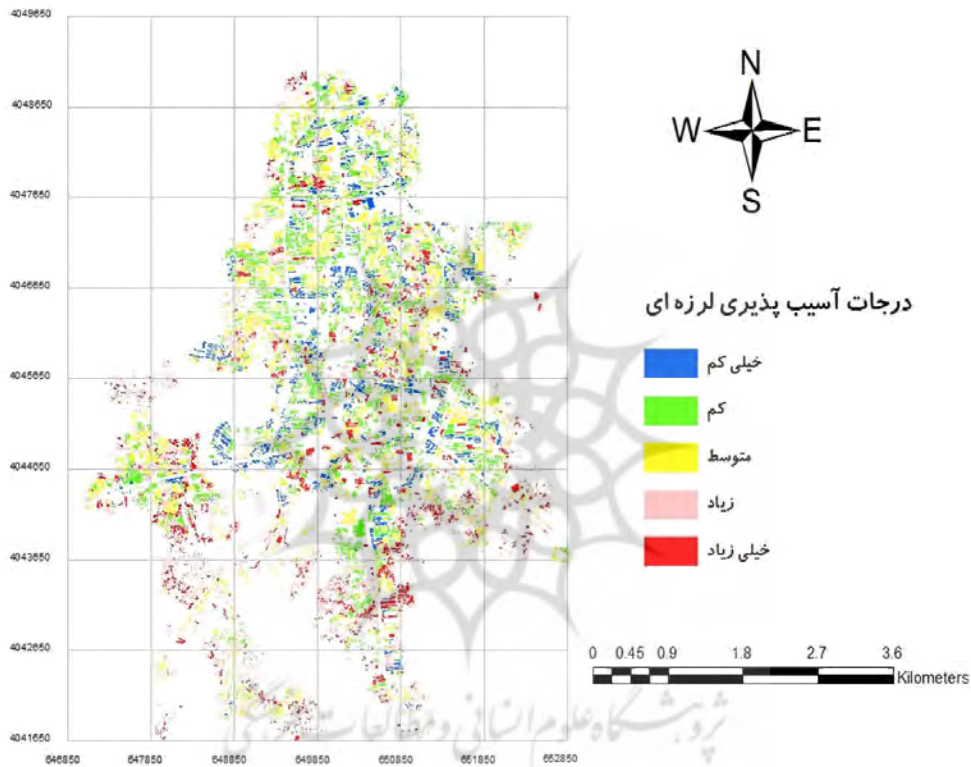




شكل شماره ٤: محاسبه درجه بزرگى دو عدد فazy نسبت به يكديگر



شكل شماره ٥: نقشه آسيب پذيرى لرزه اى نهايى شهر بابل



جدول شماره ١: تفاوتهاى MODM و MADM [٢٩]

موارد	تصميم گيرى چند	تصميم گيرى چند شاخصه
معايرها	اهداف	شاخصها
اهداف	صريح	ضمنى
شاخصها	ضمنى	صريح
محدوديتها	صريح	ضمنى
گزينهها	ضمنى	صريح
تعداد گزينهها	نامحدود (بزرگ)	محدود (کوچک)
کنترل تصميم گير	کافى	محدود
ساختار فضا	پيوسته	گسته
مناسب براى	طراحي/جستجو	انتخاب/ارزيابى

جدول شماره ۲: شاخص‌های آسیب‌پذیری لرزه‌ای

شاخص‌های آسیب‌پذیری					درجه آسیب‌پذیری
خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	
بیش از ۲۰۰۰	۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰	۵۰۰ تا ۱۰۰۰	۳۰۰ تا ۵۰۰	زیر ۳۰۰	فاصله از گسل
۱ و ۲ طبقه	۳ و ۴ طبقه	۵ و ۶ طبقه	۷ و ۸ طبقه	بالای ۸ طبقه	تعداد طبقات
نوساز	در دست احداث	قابل نگهداری	مرمتی	تخریبی	کیفیت ابنیه
بالای ۲۴ متر	۱۵ تا ۲۴ متر	۱۰ تا ۱۵ متر	۶ تا ۱۰ متر	کمتر از ۶ متر	عرض معبر
کمتر از ۵ سال	۵ تا ۱۵ سال	۱۵ تا ۲۵ سال	۲۵ تا ۳۵ سال	بیشتر از ۳۵ سال	قدمت ابنیه
کمتر از ۵۰	۵۰ تا ۲۰۰	۲۰۰ تا ۳۵۰	۳۵۰ تا ۵۰۰	بیشتر از ۵۰۰	تراکم ساخت
کمتر از ۰.۵	۰.۵ تا ۱	۱ تا ۱.۵	۱.۵ تا ۲	بیشتر از ۲	درجه محصوریت
بتنی	فلزی	آجر و آهن	بلوک سیمانی	سایر	مصالح ابنیه
بیش از ۵۰۰	۴۰۰ تا ۵۰۰	۳۰۰ تا ۴۰۰	۲۰۰ تا ۳۰۰	کمتر از ۲۰۰	مساحت قطعه
۰ تا ۲	۲ تا ۴	۴ تا ۶	۶ تا ۸	بیش از ۸	شیب زمین (درصد)
۲۰-۰	۴۰-۲۰	۶۰-۴۰	۸۰-۶۰	۱۰۰-۸۰	سطح اشغال

جدول شماره ۳: متغیرهای زبانی و اعداد فازی مثلثی معادل آنها [۳۳]

متغیرهای زبانی	عدد فازی مثلثی معادل
آسیب‌پذیری خیلی کم	(۱ و ۱ و ۳)
آسیب‌پذیری کم	(۱ و ۳ و ۵)
آسیب‌پذیری متوسط	(۳ و ۵ و ۷)
آسیب‌پذیری زیاد	(۵ و ۷ و ۹)
آسیب‌پذیری خیلی زیاد	(۷ و ۹ و ۹)

جدول شماره ۴: متغیرهای زبانی و اعداد مقایسه زوجی در AHP کلاسیک و اعداد فازی مثلثی معادل آنها [۳۴]

متغیرهای زبانی	عدد مقایسه زوجی	عدد فازی مثلثی معادل	عدد فازی مثلثی معکوس
کاملاً برابر	۱	(۱ و ۱ و ۱)	(۱ و ۱ و ۱)
بینابین	۲	(۱ و ۲ و ۳)	(۱ و ۳ و ۲)
کمی بهتر	۳	(۲ و ۳ و ۴)	(۱ و ۴ و ۳)
بینابین	۴	(۳ و ۴ و ۵)	(۱ و ۵ و ۴)
بهتر	۵	(۴ و ۵ و ۶)	(۱ و ۶ و ۵)
بینابین	۶	(۵ و ۶ و ۷)	(۱ و ۷ و ۶)
خیلی بهتر	۷	(۶ و ۷ و ۸)	(۱ و ۸ و ۷)
بینابین	۸	(۷ و ۸ و ۹)	(۱ و ۹ و ۸)
برتری مطلق	۹	(۸ و ۹ و ۹)	(۱ و ۹ و ۸)

جدول شماره ۵: ماتریس مقایسات زوجی فازی به همراه وزن نهایی و نرخ ناسازگاری

وزن نهایی	محصورت	شیب	کیفیت	مساحت	ارتفاع	سطح اشغال	مصالح ابنیه	قدمت ابنیه	عرض معبر	تراکم ساخت	فاصله از گسل	مقایسه زوجی
۰.۰۲۳۴	(۱/۶ و ۱/۵ و ۱/۴)	(۱/۹ و ۱/۸ و ۱/۷)	(۱/۶ و ۱/۳ و ۱/۲)	(۱/۹ و ۱/۸ و ۱/۷)	(۱/۶ و ۱/۵ و ۱/۴)	(۱/۷ و ۱/۶ و ۱/۵)	(۱/۴ و ۱/۳ و ۱/۲)	(۱/۳ و ۱/۲ و ۱)	(۱/۶ و ۱/۵ و ۱/۴)	(۱/۶ و ۱/۵ و ۱/۴)	(۱ و ۱)	فاصله از گسل
۰.۰۴۶۳	(شود ۳)	(۱/۴ و ۱/۳ و ۱/۲)	(۱ و ۲)	(۱/۵ و ۱/۴ و ۱/۳)	(۱ و ۲)	(۱/۳ و ۱/۲ و ۱)	(شود ۳)	(۲ و ۳ و ۴)	(۲ و ۳)	(۱ و ۱)	(عروضه ۴)	تراکم ساخت
۰.۰۶۷۱	(۱ و ۱)	(۱/۵ و ۱/۴ و ۱/۳)	(۲ و ۳ و ۴)	(۱/۷ و ۱/۶ و ۱/۵)	(۱ و ۱)	(۱/۴ و ۱/۳ و ۱/۲)	(شود ۳)	(۲ و ۳ و ۴)	(۱ و ۱)	(۱/۴ و ۱/۳ و ۱/۲)	(عروضه ۴)	عرض معبر
۰.۰۱۴۷۷	(۱/۴ و ۱/۳ و ۱/۲)	(۱/۷ و ۱/۶ و ۱/۵)	(۱/۳ و ۱/۲ و ۱)	(۱/۸ و ۱/۷ و ۱/۶)	(۱/۴ و ۱/۳ و ۱/۲)	(۱/۵ و ۱/۴ و ۱/۳)	(۱ و ۱)	(۱ و ۱)	(۱/۶ و ۱/۵ و ۱/۴)	(۱/۴ و ۱/۳ و ۱/۲)	(۳ و ۲ و ۱)	قدمت ابنیه
۰.۰۱۷۲۲	(۱/۵ و ۱/۴ و ۱/۳)	(۱/۸ و ۱/۷ و ۱/۶)	(۱/۶ و ۱/۳ و ۱/۲)	(۱/۹ و ۱/۸ و ۱/۷)	(۱/۵ و ۱/۴ و ۱/۳)	(۱/۶ و ۱/۵ و ۱/۴)	(۱ و ۱)	(۱ و ۱)	(۱/۵ و ۱/۴ و ۱/۳)	(۱/۵ و ۱/۴ و ۱/۳)	(۲ و ۱ و ۲)	مصالح ابنیه
۰.۰۳۱۷	(عروضه ۴)	(۱/۳ و ۱/۲ و ۱)	(۲ و ۳ و ۴)	(۱/۴ و ۱/۳ و ۱/۲)	(۲ و ۱ و ۲)	(۱ و ۱)	(عروضه ۴)	(۳ و ۲ و ۱)	(۲ و ۳ و ۴)	(۱ و ۲ و ۳)	(۵ و ۴ و ۳ و ۲ و ۱)	سطح اشغال
۰.۰۶۴۴	(۱ و ۱)	(۱/۵ و ۱/۴ و ۱/۳)	(۱ و ۲ و ۳)	(۱/۶ و ۱/۵ و ۱/۴)	(۱ و ۱)	(۱/۴ و ۱/۳ و ۱/۲)	(شود ۳)	(۲ و ۳ و ۴)	(۱ و ۱)	(۱/۳ و ۱/۲ و ۱)	(عروضه ۴)	ارتفاع
۰.۰۱۴۷	(عروضه ۴)	(۲ و ۳ و ۴)	(۵ و ۴ و ۳ و ۲ و ۱)	(۱ و ۱)	(عروضه ۴)	(۲ و ۳ و ۴)	(۷ و ۸ و ۹)	(۶ و ۵ و ۴ و ۳ و ۲ و ۱)	(۷ و ۶ و ۵)	(شود ۳)	(۸ و ۹ و ۸)	مساحت
۰.۰۱۰۰۲	(۱/۳ و ۱/۲ و ۱)	(۱/۶ و ۱/۵ و ۱/۴)	(۱ و ۱)	(۱/۷ و ۱/۶ و ۱/۵)	(۱/۳ و ۱/۲ و ۱)	(۱/۴ و ۱/۳ و ۱/۲)	(۲ و ۳ و ۴)	(۱ و ۲ و ۳ و ۴)	(۱/۶ و ۱/۵ و ۱/۴)	(۱/۶ و ۱/۵ و ۱/۴)	(۲ و ۱ و ۲)	کیفیت
۰.۰۲۱۹	(۷ و ۶ و ۵ و ۴ و ۳ و ۲ و ۱)	(۱ و ۱)	(عروضه ۴)	(۱/۴ و ۱/۳ و ۱/۲)	(شود ۳)	(۱ و ۱)	(۶ و ۵ و ۴ و ۳ و ۲ و ۱)	(۷ و ۶ و ۵ و ۴ و ۳ و ۲ و ۱)	(۳ و ۲ و ۱)	(۲ و ۱ و ۲)	(۷ و ۶ و ۵)	شیب
۰.۰۸۰۵	(۱ و ۱)	(۱/۷ و ۱/۶ و ۱/۵)	(۳ و ۲ و ۱)	(۱/۶ و ۱/۵ و ۱/۴)	(۱ و ۱)	(۱/۶ و ۱/۵ و ۱/۴)	(شود ۳)	(۲ و ۳ و ۴)	(۱ و ۱)	(۱/۵ و ۱/۴ و ۱/۳)	(عروضه ۴)	محصورت

نرخ ناسازگاری = ۰.۰۴۹

## References

1. Qadiri MA. *Usage urban planning methods to reduce the vulnerability of urban areas against earthquakes*, MSc thesis, Tarbiat Modarres University; 2002. (In Persian)
2. Sotudeh, B. *Landuse planning and modification of passages to secure against earthquakes*, MA Thesis, University of Shiraz; 2001 (In Persian)
3. Hataminezhad et al. *Assessment of urban seismic vulnerability: Case study of district 10 of Tehran*. Human Geography Researches, ; 2009, No.68, Tehran (In Persian)
4. Hosseini, Seyyed Behshid et al., *The study of the ways to improve the quality of performance of urban elements of passive defense*, Congress of Architecture with passive defense approach, Malek Ashtar Industrial University; 2011. (In Persian)
5. Ahsan.N, Warner.J. *The socioeconomic vulnerability index: A pragmatic approach for assessing climate change led risks, Case study: south-western coastal Bangladesh*, International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol 8, June 2014, pp 32-49.
6. Tavakoli, B. & Tavakoli, S. *Estimating the Vulnerability and Loss functions of Residential Buildings*, Journal of the International Society for the Presentational litigation of Natural Hazard; 1993 7(2). (In Persian)
7. Japan International Cooperation Agency, *Seismic sub-zone project for Tehran*, JICA; 2001
8. Taghvaei, M., et al. *Assessment the vulnerability of residential units in Shiraz city based on physical characteristics*, Quarterly Journal of rescue & relief, the sixth year, No. 3. Iran Helal Institute of Applied Science & Technology; 2014. (In Persian)
9. Silavi, Tolou, et al. *Provide a seismic vulnerability mapping using multi-criteria decision-making based on interval mathematics and Geographic Information System*, Proceedings of the First International Conference on comprehensive crisis management in disasters; 2005, Tehran (In Persian)
10. Aghataher R, et al. *Effective weighting factors in seismic vulnerability of Tehran*, Publication: College of Engineering, Vol. 40, No.8, Tehran University; 2006. (In Persian)
11. Ahadnejad Roshti, M. *Modeling of vulnerability of cities in earthquake in case study: Zanjan*. Doctoral thesis in geography and urban planning, Tehran University; 2009. (In Persian)
12. Azizi, M et al. *Planning considerations in assessing the vulnerability of cities case study: Tehran Farahzad area*, Journal of Fine Arts; 2008. No. 34, pages 25-36 (In Persian)
13. Zangiabadi, A, et al. *Analysis of Indicators of vulnerability of urban buildings against earthquake, case study: Isfahan buildings*, Geography and Development; 2007. No.1, pp:61-79 (In Persian)
14. Botero V. *Geo-information for measuring vulnerability to Earthquake: a fitness for use approach*; 2009. PhD thesis, ITC, Netherland.
15. Martinelli A, Cifani G. *Building vulnerability assessment and damage scenarios in celano (Italy) by using a quick survey data-based methodology*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering; 2008. 28:875-889.
16. Giovinazzi S., Lagomarsino, S & Pampanin, S. *Vulnerability Methods and Damage Scenario for Seismic Risk Analysis as Support to Retrofit Strategies: a European Perspective*, NZSEE Conference; 2006
17. Lantada, N., Pujades, L., & Barbat, A. *Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison*, Nat Hazards; 2009. 51:501-524
18. Tang, A., & Wen, A. *An intelligent simulation system for earthquake disaster assessment*, Computers & Geosciences; 2009. 35, 871– 879
19. Hafeznia, M. *Intoroduction to research methods in humanities*. Publisher:

- SAMT. Tehran. Eighth Edition; 2003, pp. 45-65. (In Persian)
20. Malczewski J. *GIS and Multi-criteria Decision Analysis*, Wiley & Sons INC. 1999. pp 84-85
  21. Juan M. Sánchez-Lozano, Jerónimo Teruel-Solano, Pedro L. Soto-Elvira, M. Socorro García-Cascales. *Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 24, August 2013, pp 544-556
  22. Ferretti, V. *Integrating Multi-criteria Analysis and Geographic Information Systems: a survey and classification of the literature*, 74<sup>th</sup> Meeting of the European Working Group Multiple Criteria Decision Aiding; 2012. pp 3-4
  23. Tzeng. G, Huang.J. *Multi Attribute Decision Making methods and applications*. CRC Press, Taylor & Francis group, 2011. pp 2-7
  24. Malczewski J. *GIS-based multi criteria decision analysis: a survey of the literature*, International journal of geographical science; 2006. Vol 20, No 7, pp 703-726.
  25. Habibi, K. et al. *Determining the structural factors contributing to the vulnerability of the old structure of Zanzan using GIS & FUZZY LOGIC*, Journal of Fine Arts; 2008.No. 33, pp. 27-36. (In Persian)
  26. Zahraei, SM, et al. *Evaluation of seismic vulnerability of buildings in Qazvin*, publication: College of Engineering; 2005. Vol. 39, No 3, Tehran University.
  27. Kamel Basmenj, B. et al. *Evaluation of seismic vulnerability of n District 1 in Tabriz city using Spatial multi-criteria analysis*, lecturer in human sciences and spatial planning; 2012. Vol. 16, No.2, p. 131(In Persian)
  28. Chang D.Y. *Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP*. European Journal of Operational Research; 1996. Vol 95(3), pp 649-655.
  29. Razieh Mosadeghi, Jan Warnken, Rodger Tomlinson, Hamid Mirfenderesk. *Comparison of Fuzzy-AHP and AHP in a spatial multi-criteria decision making model for urban land-use planning*. Computers, Environment and Urban Systems; 2015. Vol 49, pp 54-65. (In Persian)
  30. Chen-Hui Chou, Gin-Shuh Liang, Hung-Chung Chang. A fuzzy AHP approach based on the concept of possibility extent. Qual Quant; 2013. Vol 47, pp 1-14.
  31. Tzeng. G, Huang.J. *Multi Attribute Decision Making methods and applications*. CRC Press, Taylor & Francis group; 2011
  32. Zeshui Xu, Senior Member, IEEE, and Huchang Liao. *IEEE transactions on fuzzy systems*; 2014. Vol.22, NO.4.
  33. Anjali Awasthi, S.S. Chauhan, S.K. Goyal. *Multi-criteria decision making approach for location planning of urban distribution centers under uncertainty*, Mathematical and Computer Modelling, Vol.30, pp. 289-307.
  34. Feizizadeh. Bakhtiar, MajidShadmanRoodposhti, PiotrJankowski, ThomasBlaschke.A *GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping*. Computer and Geoscience; 2014 Vol 73, pp 208-221. (In Persian)

## **Modeling of seismic vulnerability of urban buildings in geographic information system environment (case study: Babol city)**

**Corresponding author: Yaser Ebrahimian-Ghajari**, PhD Student of GIS, Malek Ashtar University of Technology, University Complex of Logistics and Passive Defense, Tehran, Iran **Email:** y.ebrahimian@nit.ac.ir

**Ali Asghar AleSheikh**, Faculty member, K. N. Toosi University of Technology, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, Tehran, Iran

**Mehdi Modiri**, Faculty member, Malek Ashtar University of Technology, University Complex of Logistics and passive defense, Tehran, Iran

**Reza Hosnavi**, Faculty member, Malek Ashtar University of Technology, University Complex of Logistics and passive defense, Tehran, Iran

**Mohammad Ali Nekouei**, Faculty Member, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

**Received:** May 23, 2015

**Accepted:** 30 January, 2016

### **Abstract**

**Background:** Throughout history, humans have always been faced earthquakes as a natural disaster and incurred physical, social, economic and environmental harm. The best way to deal with this threat is being ready; one of the basic strategies is to have knowledge about the degree of vulnerability of the city against earthquake.

**Method:** Different criteria are involved in modeling of the vulnerability of the city most of them are of the nature of the place; so, modeling of the vulnerability is a multi-criteria evaluation of the place. In this study, 11 criteria were extracted via reviewing previous researches and consulting the experts. Then, the modeling was done for Babol city, Iran, using fuzzy logic model and weighted linear combination method under conditions of uncertainty.

**Findings:** Modeling in Babol city showed that 10%, 24%, 27%, 28% and 11% of the buildings were in the condition of very low, low, medium, high, and very high vulnerability.

**Conclusion:** Babol city can be considered as vulnerable to earthquake as nearly 70% of the buildings were labeled “medium” to “high” vulnerable. Hence, basic interventions for crisis management should be taken on the agenda of the relevant officials before an earthquake occurs.

**Keywords:** Structural vulnerability; Earthquake; Geographic information system; Multi-criteria evaluation; Fuzzy logic