

# ارائه یک مدل مکان محور مبتنی بر ریسک برای ارزیابی مقاومت ساختمانهای شهری درمقابل زلزله

یاسر ابراهیمیان قاجاری

استادیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل  
y.ebrahimian@nit.ac.ir

(تاریخ دریافت شهریور ۱۳۹۹، تاریخ تصویب دی ۱۳۹۹)

## چکیده

با توجه به اینکه زلزله از رایج ترین بحران های طبیعی در سراسر دنیا به ویژه ایران می باشد، تاکنون تحقیقات بسیار زیادی در زمینه ارزیابی آسیب پذیری ساختمان ها در مقابل زلزله صورت پذیرفته است. مشکل اساسی در مواجهه با زلزله عدم آمادگی کامل در مقابله با آن می باشد که یکی از راهکارهای اساسی ایجاد این آمادگی، ارزیابی و آگاهی از مقاومت آن ها در مقابل زلزله در سناریوها و شرایط مختلف ریسک می باشد. در این تحقیق با استفاده از نظرات کارشناسان زمین شناسی، سازه، زلزله، شهرسازی، پدافند غیرعامل و معماری ۸ معیار آسیب پذیری استخراج شد و متناسب با هر یک نقشه های معیار فازی تولید شد. همچنین از تکنیک تحلیل سلسله مراتبی فازی برای وزندهی معیارها و برای ترکیب نقشه های معیار از عملگر ترکیب خطی وزندار فازی استفاده شد. برای غیرفازی سازی نقشه های آسیب پذیری فازی و تولید نقشه آسیب پذیری در شرایط مختلف ریسک از عملگر میانگین وزنی مرتب شده (OWA) استفاده شد. با تحلیل نتایج ارزیابی لرزه ای ساختمان های منطقه ۶ تهران به عنوان مطالعه موردی در این تحقیق، این نتیجه حاصل شد که در خوش بینانه ترین سناریو ۳۹ درصد ساختمان ها از آسیب پذیری کم و در بدبینانه ترین سناریو ۴۹ درصد ساختمان ها از آسیب پذیری بالایی برخوردارند. برای ارزیابی مدل از تکنیک تحلیل حساسیت استفاده شد که نتایج حاصل از آن حاکی از ثبات قابل قبول نتایج مدل در سناریوهای مختلف و به عبارتی قابلیت اطمینان بالای نتایج مدل می باشد.

**واژگان کلیدی:** ارزیابی لرزه ای، سامانه های اطلاعات مکانی (GIS)، منطقه ۶ تهران، تحلیل سلسله مراتبی فازی، عملگر میانگین وزنی مرتب شده (OWA)، تحلیل حساسیت

## ۱- مقدمه

زلزله یکی از مهمترین مخاطرات طبیعی است که سالانه جان صدها نفر را می‌گیرد. پیش بینی زلزله هنوز به طور قطعی امکان پذیر نیست، اما می‌توان با ارزیابی مقاومت ساختمان‌ها در مقابل زلزله و تولید نقشه‌های آسیب پذیری در شرایط مختلف ریسک، مناطق با خطر بالا را شناسایی کرد و تدابیری برای مقابله با وضعیت بحرانی آن‌ها در هنگام زلزله اندیشید [۱]. در واقع آنچه که زلزله را به عنوان تهدیدی جدی برای شهرها مطرح می‌کند، عدم آمادگی برای مقابله با آن است، لذا بهترین راه برای مقابله با این بحران ایجاد و حفظ آمادگی در مقابل آن‌ها می‌باشد [۲]. یکی از راه‌های اساسی برای ایجاد آمادگی در برابر زلزله، آگاهی از درجه آسیب‌پذیری شهر و مقاومت ساختمان‌های آن در مقابل زلزله در شرایط مختلف ریسک است. چرا که آسیب‌شناسی مناسب در شهرسازی می‌تواند نقش بسزایی در برنامه‌ریزی‌ها و سیاست‌گذاری‌های حوزه شهری داشته باشد که این خود بیانگر ضرورت مدلسازی آسیب پذیری و ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌ها می‌باشد [۳]. اهمیت این کار از آنجاست که امروزه شهرها اکثر جمعیت یک کشور را در خود جای می‌دهند و تمرکز اقتصادی، سیاسی، فرهنگی، اجتماعی و مراکز حاکمیتی در کشورها می‌باشند [۴]. از طرفی کشور ایران با توجه به قرار گرفتن در مسیر کمربند کوه زایی آلپ- هیمالیا و برخورداری از اقلیم متغیر و ناپایداری‌های موقت و مقطعی، در طول تاریخ زلزله را در بیشتر شهرها تجربه کرده است و این در مورد شهر تهران با وجود گسل‌های فعالی مانند مشا- فشم، شمال تهران و ری و بنا به دلایلی از جمله اینکه تهران پایتخت ایران است صد چندان می‌باشد [۵].

ارزیابی مقاومت لرزه‌ای ساختمان‌ها به بیان ساده تخمین میزان خسارتی است که در صورت بروز زلزله بر حسب ماهیت و کیفیت آن‌ها به ساختمان‌ها وارد می‌شود [۶]. با توجه به اینکه معیارهای مختلفی در ارزیابی مقاومت لرزه‌ای ساختمان‌ها دخیل هستند، لذا مسئله تحقیق یک مسئله ارزیابی چند معیاره است که برای ارزیابی لرزه‌ای ابتدا باید معیارهای آسیب پذیری استخراج و وزندهی شده، سپس با یک قاعده تصمیم‌گیری چند معیاره مناسب با همدیگر تلفیق شده تا بتوان به درجه آسیب پذیری دست یافت. با توجه به اینکه بسیاری از معیارها ماهیت مکانی

دارند، می‌توان گفت سامانه‌های اطلاعات مکانی (GIS) با قابلیت‌های بسیار بالا در اخذ، ذخیره، ویرایش و تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی نقش به سزایی در مدلسازی آسیب پذیری دارد. با توجه به ماهیت چند معیاره بودن مسئله بدیهی است GIS به تنهایی قادر به در نظر گرفتن همزمان معیارها و وزن آن‌ها و ترکیب آن‌ها نبوده لذا باید از مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) استفاده نمود [۷]. در نتیجه مدل مکان محور مدنظر این تحقیق یک مدل GIS-MCDM می‌باشد که قادر به ارزیابی مقاومت ساختمان‌های شهری در مقابل زلزله در شرایط و سناریوهای مختلف (خوش بینانه ترین حالت تا بدبینانه ترین حالت) می‌باشد. در این مقاله به عنوان مطالعه موردی مقاومت ساختمان‌های منطقه ۶ تهران ارزیابی شده و نتایج مدل خود با استفاده از تحلیل حساسیت ارزیابی شده است.

در خصوص مدلسازی آسیب پذیری زلزله تحقیقات زیادی صورت پذیرفته که در این بخش از مقاله به برخی از جدیدترین این تحقیقات که همگی مبتنی بر تحلیل‌های GIS هستند اشاره خواهد شد. لازم به ذکر است که اکثر این تحقیقات در کنار نظرات کارشناسی به عنوان مراجع معتبر در استخراج و دسته بندی معیارها مورد استفاده قرار گرفته شدند. دلاور و صدری‌کیا در تحقیقی به ارزیابی آسیب پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های شهر تبریز با استفاده از منطق فازی، تئوری دمپسترشافر و تحلیل‌های GIS پرداختند [۸]. متد ارائه شده در این تحقیق مناسب برای ارزیابی آسیب پذیری مناطقی است که اطلاعات ناقصی در مورد آن‌ها وجود دارد. گرچه از واژه ریسک به عنوان یک واژه کلیدی در این تحقیق یاد شده است، اما در عمل در این تحقیق به مدیریت ریسک به معنای واقعی پرداخته نشده است. ساهدیو و همکاران با استفاده از متدهای تصمیم‌گیری چند معیاره، تحلیل‌های GIS و آنالیز رگرسیون چند متغیره به ارزیابی آسیب پذیری ساختمان‌های شهر دلهی پرداختند [۹]. در این تحقیق شش نقشه معیار با استفاده از تحلیل‌های GIS تولید شده با آنالیز رگرسیون چندمعیاره با همدیگر تلفیق شد و نقشه نهایی آسیب پذیری تولید گشت. آندرا و همکاران با استفاده از قابلیت‌های GIS و استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به مدلسازی آسیب پذیری مدارس شهر واسلوی در کشور رومانی پرداختند [۱۰]. در این تحقیق هم آسیب پذیری فیزیکی و هم آسیب پذیری اجتماعی مدارس مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص

کاهش یافته با افزودن این پارامتر، میزان آسیب پذیری از شمال به جنوب افزایش یافته است.

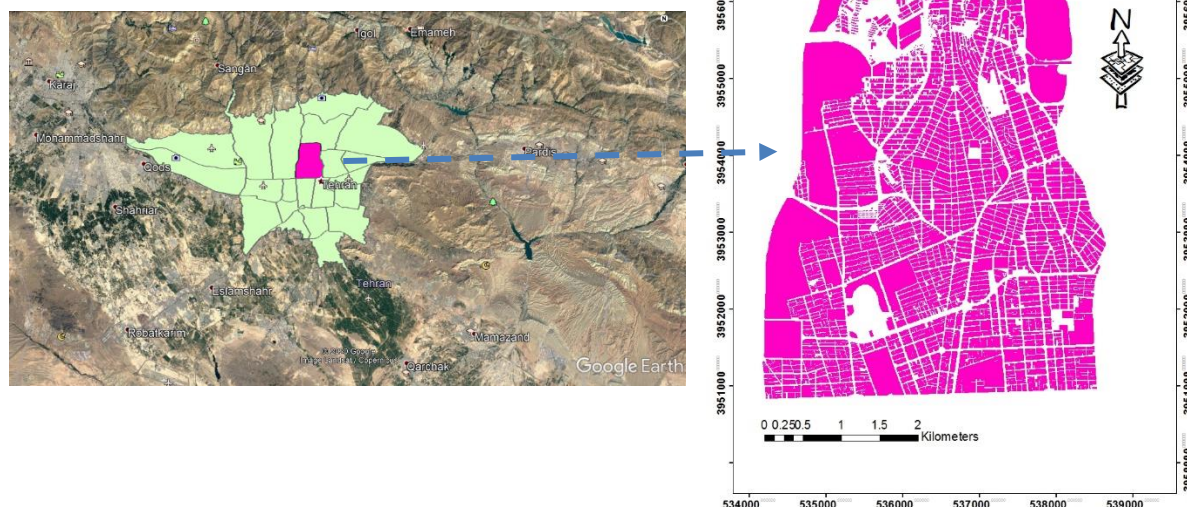
تحقیق حاضر به ارزیابی آسیب پذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها در شرایط مختلف ریسک در سناریوهای مختلف از خوش بینانه ترین حالت تا بدبینانه ترین حالت پرداخته و بیشتر به دنبال رفع یکی از نیازهای اساسی مدیران شهری است که بتوانند در تصمیم گیری‌های مربوطه به الویت بندی درست تری دست پیدا کنند. همچنین در تحقیق حاضر از روش OWA که یکی از ابرازهای تصمیم گیری چندمعیاره است برای غیرفازی سازی استفاده شده است که آن را میتوان به نوعی از نوآوری‌های فنی این تحقیق به شمار آورد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این تحقیق منطقه ۶ تهران می‌باشد که در مختصات طول جغرافیایی بین  $51^{\circ}22'37''$  تا  $51^{\circ}25'41''$  و عرض جغرافیایی بین  $35^{\circ}42'2''$  تا  $35^{\circ}45'9''$  قرار دارد. منطقه ۶ تهران با مساحت ۲۰ کیلومتر مربع (معادل ۳ درصد مساحت کل شهر تهران) و جمعیت حدود ۲۱۷ هزار نفر (۳٫۶ درصد جمعیت کل تهران) از مناطق بسیار مهم و حساس تهران به شمار می‌رود. وجود کاربری‌های مهمی نظیر وزارتخانه‌ها، سفارتخانه‌ها، موسسات آموزش عالی، مراکز درمانی و بیمارستان‌های عمومی، شرکت‌های بزرگ اقتصادی و سازمان‌های مهم دولتی و خصوصی نشان دهنده اهمیت بالای این منطقه از دیدگاه شهری و کشوری است. چرا که خسارات وارده به این منطقه در صورت بروز حوادث احتمالی می‌تواند تبعات بسیار زیادی برای مدیریت شهری و حتی کشوری داشته باشد و زیان‌های اقتصادی و اجتماعی بیشماری را به شهروندان و مسئولین تحمیل کند. علاوه بر این عوامل، منطقه ۶، منطقه مرکزی تهران از نظر موقعیت جغرافیایی می‌باشد. تعداد واحدهای ساختمانی منطقه که همان تعداد گزینه‌ها در ارزیابی چندمعیاره است ۲۸۲۲۸ واحد می‌باشد. محدوده منطقه ۶ در شکل ۱ نشان داده شده است.

شد مدارس قدیمی که در کوچه‌های باریک قرار دارند بیشتر از سایر مدارس در معرض آسیب ناشی از زلزله قرار دارند. یاریان و همکاران با تلفیق تکنیک‌های AHP فازی، شبکه عصبی مصنوعی و تحلیل‌های GIS به ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌های شهر سنجند پرداختند [۱۱]. جعفرنیا و همکاران در تحقیقی به پهنه بندی آسیب پذیری شهر لار در مقابل زلزله با استفاده از منطق فازی و GIS پرداختند [۱۲]. طبق نتایج این تحقیق ۲۹ درصد ساختمان‌های شهر لار در پهنه آسیب پذیری خیلی زیاد، ۱۷ درصد در پهنه آسیب پذیری متوسط و ۵۴ درصد در پهنه آسیب پذیری خیلی کم قرار گرفته‌اند. عیدیوندی و خسروی در تحقیقی به ارزیابی ریسک زلزله زرین شهر با استفاده از GIS پرداختند و به این نتیجه رسیدند که فاصله از گسل، شیب زمین و جنس خاک بیشتر از سایر عوامل در آسیب پذیری ساختمان‌ها تاثیرگذار هستند [۱۳]. زارع و همکاران در تحقیق خود به ارزیابی آسیب پذیری بافت فرسوده شهر مرودشت در برابر زلزله با استفاده از تکنیک AHP و تحلیل‌های GIS پرداختند [۱۴]. در این تحقیق مشخص شد معیار کیفیت ساختمان‌ها بیشترین تاثیر و معیار فاصله از آتش نشانی کمترین تاثیر را در آسیب پذیری ساختمان‌ها در مقابل زلزله دارد. همچنین در نهایت مشخص شد که ۳۲ درصد ساختمان‌ها از آسیب پذیری بالا، ۳۱ درصد از آسیب پذیری متوسط و ۳۷ درصد از آسیب پذیری پایین برخوردارند. عیسی لو و همکاران در تحقیقی به ارزیابی آسیب پذیری کالبدی بافت منطقه ۱ تهران در مقابل زلزله پرداختند [۱۵]. محققان از تکنیک IHWP و تحلیل‌های GIS برای مدلسازی آسیب پذیری استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که نواحی ۹، ۷ و ۵ بسیار ایمن، نواحی ۴، ۶ و ۱۰ ایمن، نواحی ۲ و ۸ دارای ایمنی متوسط و نواحی ۱ و ۳ با ایمنی پایین هستند. همچنین مشخص شد تراکم فروشی غیراصولی شهرداری و روند رو به رشد جمعیت از مهمترین دلایل کاهش ایمنی این مناطق در مقابل زلزله می‌باشد. اسدی و همکاران به مدلسازی آسیب پذیری لرزه-ای ساختمان‌های شهری با تاکید بر تاثیر سفره آب زیرزمینی پرداختند [۱۶]. نتایج این پژوهش نشان داد با توجه به اینکه از شمال به جنوب منطقه مورد مطالعه (مناطق ۱۱، ۱۶ و ۲۰ تهران) عمق سطح آب‌های زیرزمینی



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه (منطقه ۶ تهران)

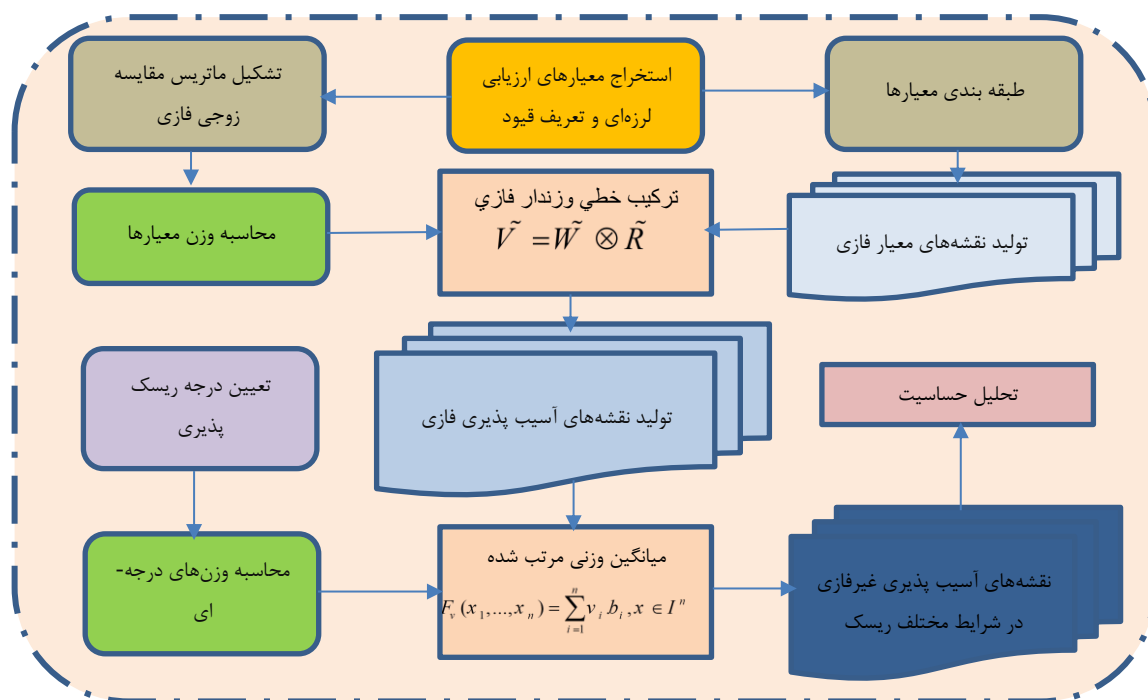
## ۲-۲- روش شناسی تحقیق

از آنجا که ارزیابی لرزه‌ای خود تابعی از چندین معیار می‌باشد، لذا تخمین آسیب‌پذیری یک مسئله ارزیابی چند معیاره می‌باشد که باید به سراغ مدل‌های ارزیابی چند معیاره رفت و از آنجا که بسیاری از معیارها ماهیت مکانی دارند، لذا باید از مدل‌های ارزیابی چندمعیاره مکانی برای ارزیابی آسیب‌پذیری استفاده نمود. مدل‌های ارزیابی چندمعیاره قادر به ارزیابی همزمان معیارهای کیفی و کمی بوده و در مسائلی همچون این تحقیق که معیارها کیفی و کمی‌اند کارآیی بسیار بالایی دارند [۱۷]. یکی از مشکلات اساسی در مسائل ارزیابی چند معیاره فقدان استاندارد برای اندازه‌گیری معیارهای کیفی و همچنین فقدان واحد برای تبدیل معیارها به یکدیگر است [۱۸]. با توجه به مشکلات مربوط به فرآیند ارزیابی با معیارهای چندگانه، می‌توان گفت که در این حالت ارزیابی ساده نبوده و به علت عدم وجود استاندارد، از سرعت و دقت ارزیابی به مقدار زیادی کاسته شده و باعث می‌شود که فرآیند ارزیابی به مقدار بسیار زیادی به افراد تصمیم‌گیر وابسته باشد. به عبارتی قضاوت‌های ذهنی تصمیم‌گیر بسیار در نتایج نهایی ارزیابی تاثیر گذار است که در نتیجه آن می‌توان به طیف وسیعی از نتایج دست یافت. نمونه‌ای از تاثیر قضاوت‌های ذهنی تصمیم‌گیران دیدگاه خوش‌بینانه یا بدبینانه آنهاست. لذا باید در مسائل ارزیابی چندمعیاره از تکنیک‌هایی استفاده نمود که

قادر به تولید نتایج در شرایط مختلف ریسک (طیف وسیع بین دیدگاه خوش‌بینانه (ریسک‌پذیر) تا دیدگاه بدبینانه (ریسک‌گریز) و مدیریت عدم اطمینان و ابهامات باشند. ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌های شهر در شرایط مختلف ریسک که هدف اصلی این مقاله می‌باشد مراحل دارد که در شکل ۲ نشان داده شده است.

## ۲-۳- استخراج معیارهای موثر و قیود

معیارهای ارزیابی لرزه‌ای در این تحقیق با مطالعه تحقیقات گذشته و همچنین استفاده از نظرات کارشناسان زمین‌شناسی، سازه، زلزله، شهرسازی، پدافند غیرعامل و معماری استخراج شده است. در نهایت ۸ معیار آسیب‌پذیری برای ارزیابی آسیب‌پذیری انتخاب شدند که در شکل ۳ به همراه طبقه‌بندی بر اساس درجه آسیب‌پذیری از خیلی کم به خیلی زیاد آورده شده است. قیودی که بر روی نقشه‌های ۱/۲۰۰۰ پایه شهری منطقه ۶ تهران اعمال شد حذف پارسل‌های فاقد بنا و همچنین استخراج ساختمان‌ها بوده است. همچنین پارک‌ها، فضاهای سبز و هر عارضه پلیگونی غیر از ساختمان‌ها که در نقشه‌های پایه شهری منطقه ۶ تهران بوده است حذف شدند و در نهایت ۲۸۲۲۸ واحد ساختمانی به عنوان گزینه‌های تصمیم‌گیری انتخاب شدند.



شکل ۲- مراحل ارزیابی لرزه‌ای در این تحقیق

| درجات آسیب پذیری | فاصله از گسل  | شیب (درجه)  | جنس خاک بستر | سطح آب زیرزمینی | قدمت ساختمان | اسکلت ساختمان    | تعداد طبقات | تعداد همسایگی |
|------------------|---------------|-------------|--------------|-----------------|--------------|------------------|-------------|---------------|
| خیلی کم          | بیشتر از ۳۰۰۰ | ۲ تا ۰      | رس           | بیشتر از ۱۰۰    | کمتر از ۵    | فلزی یا بتن آرمه | ۱ تا ۲      | ۰             |
| کم               | ۲۲۵۰ تا ۳۰۰۰  | ۵ تا ۲      | سیلت         | ۷۵ تا ۱۰۰       | ۱۵ تا ۵      | بتن مسلح         | ۳ تا ۵      | ۱             |
| متوسط            | ۱۵۰۰ تا ۲۲۵۰  | ۱۰ تا ۵     | ماسه         | ۷۵ تا ۵۰        | ۲۵ تا ۱۵     | آجر و آهن        | ۵ تا ۱۰     | ۲             |
| زیاد             | ۷۵۰ تا ۱۵۰۰   | ۲۰ تا ۱۰    | مانده شن     | ۵۰ تا ۲۵        | ۳۵ تا ۲۵     | بلوک سیمانی      | ۱۰ تا ۱۵    | ۳             |
| خیلی زیاد        | کمتر از ۷۵۰   | بیشتر از ۲۰ | شن           | کمتر از ۲۵      | بالای ۳۵     | سایر             | بیشتر از ۱۵ | بیشتر از ۳    |

شکل ۳- معیارهای ارزیابی لرزه‌ای و طبقه بندی آن بر اساس درجه آسیب پذیری (منبع: نظرات کارشناسان)

## ۲-۴- تولید نقشه‌های معیار

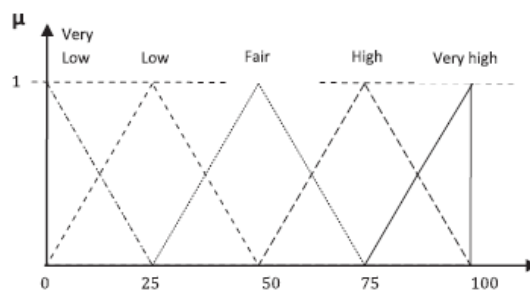
نقشه‌های معیار در این تحقیق نقشه ساختمان‌های منطقه ۶ تهران می‌باشند که به ازای هر معیار آسیب‌پذیری لرزه‌ای تولید می‌شوند، لذا ۸ نقشه معیار در این تحقیق تولید شده است. هر یک از نقشه‌های معیار شامل ۲۸۲۲۸ واحد ساختمانی می‌باشند که از نقشه‌های شهری مقیاس ۱/۲۰۰۰ تهیه شده‌اند. مطابق نمودار شکل ۳ ساختمان‌ها به ازای هر معیار متناسب با درجه آسیب‌پذیری به ۵ دسته از آسیب‌پذیری "خیلی کم" تا "خیلی زیاد" دسته بندی شده‌اند. بدیهی است کاربرد این متغیرهای زبانی نیز عدم قطعیت‌هایی با خود به همراه خواهد داشت چرا که مرز

مشخصی بین دو دسته آسیب‌پذیری وجود ندارد. به عنوان مثال ممکن است ساختمانی با توجه به یک معیار، هم آسیب‌پذیری "زیاد" هم آسیب‌پذیری "خیلی زیاد" داشته باشد. یعنی با یک درجه عضویتی در دسته آسیب‌پذیری "زیاد" قرار داشته باشد و با یک درجه عضویتی هم در دسته آسیب‌پذیری "خیلی زیاد" قرار داشته باشد. در نمودار شکل ۳ ساختمان‌های با تعداد طبقات بین ۱۰ الی ۱۵ در طبقه آسیب‌پذیری "زیاد" و ساختمان‌های ۱۵ طبقه به بالا در دسته آسیب‌پذیری "خیلی زیاد" در نظر گرفته شده‌اند. بدیهی است ساختمان ۱۵ طبقه عضو هر دو دسته است و تعیین دقیق اینکه عضو کدام دسته است به خاطر عدم قطعیت‌های موجود امکان پذیر نیست. البته می‌توان با

قطعیت گفت ساختمان ۵ طبقه در دسته "خیلی زیاد" قرار ندارد، اما تعیین دقیق هر ساختمان در هر دسته دور از واقعیت است. استفاده از مجموعه‌های فازی یکی از روش‌های مدیریت عدم قطعیت می‌باشد که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، چرا که برای مرحله مدلسازی که لازمه آن کمی‌سازی است باید به جای متغیرهای زبانی (کیفی) از متغیرهای کمی استفاده نمود. متغیرهای کمی در این تحقیق اعداد فازی مثلثی هستند. عدد فازی مثلثی نوع خاصی از اعداد فازی است که با استفاده از سه تایی مرتب  $(l, m, u)$  تعریف می‌گردد. در هر عدد فازی مثلثی  $l$  حد پایینی،  $m$  مقدار میانه و  $u$  حد بالایی نامیده می‌شود و درجه عضویت  $\mu$  از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد [۱۹]:

$$\mu_{\tilde{M}} = \begin{cases} (x-l)/(m-l) & l \leq x \leq m \\ (u-x)/(u-m) & m \leq x \leq u \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

در این تحقیق درجات آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در هر نقشه معیار به جای اعداد حقیقی با اعداد فازی مثلثی (از آسیب‌پذیری خیلی کم تا آسیب‌پذیری خیلی زیاد) تعیین می‌گردند که در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- تابع عضویت برای کمی‌سازی درجه آسیب‌پذیری [۲۰]

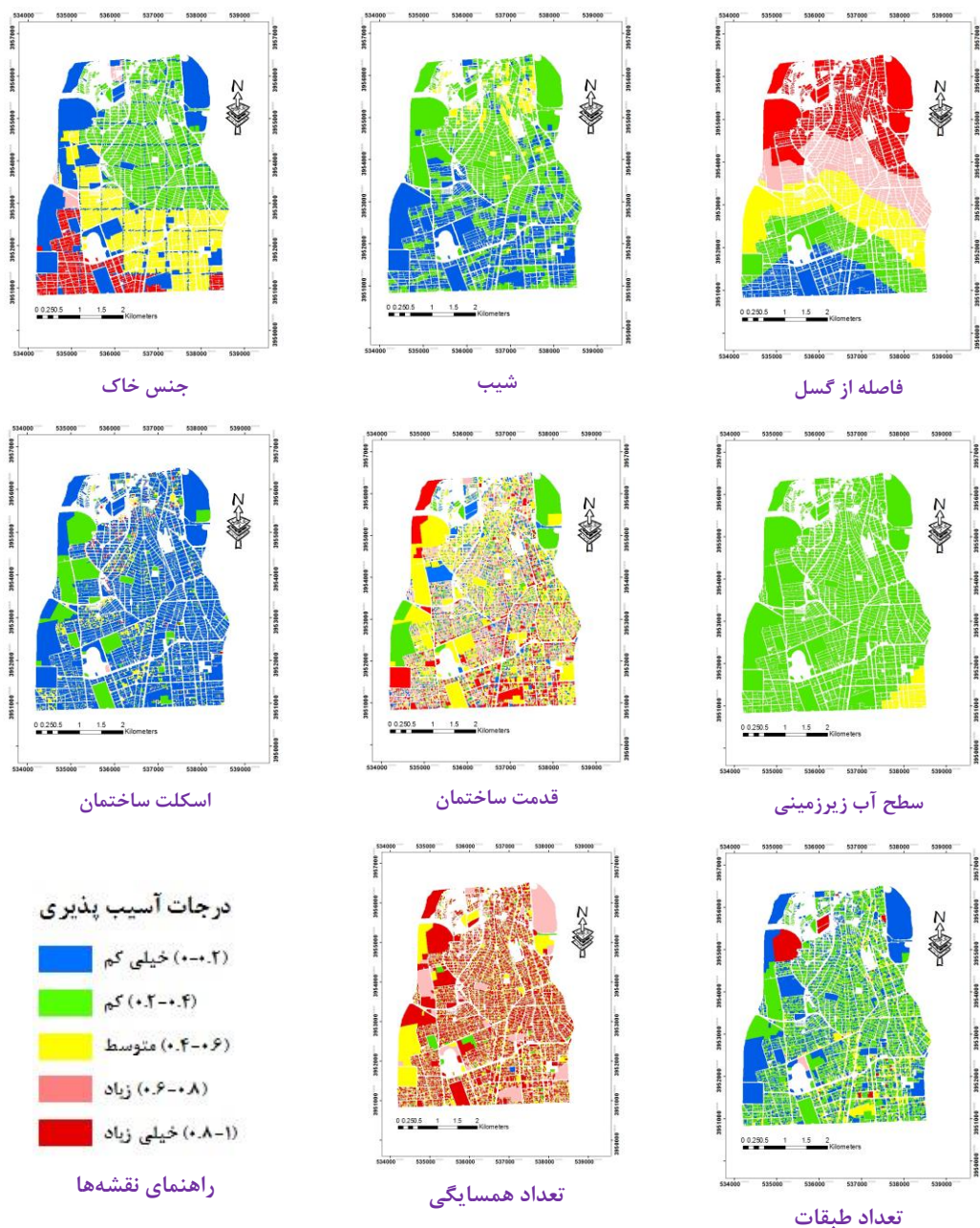
نقشه‌های معیار در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

## ۲-۵- وزن‌دهی معیارها

در این تحقیق برای محاسبه وزن نسبی معیارها از مقایسات زوجی آن‌ها با استفاده از نظر کارشناسان زمین‌شناسی، سازه، زلزله، شهرسازی، پدافند غیرعامل و معماری 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 معیارها و بیان میزان

برتری معیارها نسبت به همدیگر از متغیرهای زبانی استفاده کرده‌اند که خود عدم قطعیت‌هایی به همراه دارد که چنین عدم قطعیت‌هایی که ناشی از متغیرهای زبانی هستند با تئوری مجموعه فازی مدیریت می‌شوند [۲۱]. لذا در این تحقیق از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی استفاده شده است که در آن به جای استفاده از اعداد ۱ تا ۹ برای بیان میزان ارجحیت معیارها به یکدیگر از متغیرهای زبانی و اعداد فازی مثلثی معادل آن‌ها که در جدول ۱ نشان داده شده است استفاده می‌شود.





شکل ۵- نقشه‌های معیار آسیب‌پذیری لرزه‌ای

جدول ۱- متغیرهای زبانی و اعداد مقایسات زوجی و اعداد فازی مثلثی معادل آنها [۲۲]

| متغیرهای زبانی | عدد فازی مثلثی معادل | عدد فازی مثلثی معادل |
|----------------|----------------------|----------------------|
| کاملاً برابر   | (۱و۱و۱)              | (۱و۱و۱)              |
| بینابین        | (۱و۲و۳)              | (۱و۳و۱/۳)            |
| کمی بهتر       | (۲و۳و۴)              | (۱و۴و۱/۴)            |
| بینابین        | (۳و۴و۵)              | (۱و۵و۱/۵)            |
| بهتر           | (۴و۵و۶)              | (۱و۶و۱/۶)            |
| بینابین        | (۵و۶و۷)              | (۱و۷و۱/۷)            |
| خیلی بهتر      | (۶و۷و۸)              | (۱و۸و۱/۸)            |
| بینابین        | (۷و۸و۹)              | (۱و۹و۱/۹)            |
| برتری مطلق     | (۸و۹و۹)              | (۱و۹و۱/۹)            |

ماتریس مقایسه زوجی در جدول شماره ۲ آورده شده است.

| جدول ۲- ماتریس مقایسات زوجی فازی معیارهای آسیب پذیری لرزه‌ای |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                         |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| تعداد همسایگی                                                | تعداد طبقات           | اسکلت ساختمان         | قدمت ساختمان          | سطح آب زیرزمینی       | جنس خاک               | شیب                   | فاصله از گسل          | ماتریس مقایسه زوجی فازی |
| (۱/۹و۱/۸و۱/۷)                                                | (۱/۴و۱/۳و۱/۲)         | (۱/۸و۱/۷و۱/۶)         | (۱/۹و۱/۸و۱/۷)         | (۱/۲و۳)               | (۱/۷و۱/۶و۱/۵)         | (۱/۱و۱)               | (۱/۹و۱/۸و۱/۷)         | فاصله از گسل            |
| (۱/۹و۱/۸و۱/۷)                                                | (۱/۴و۱/۳و۱/۲)         | (۱/۸و۱/۷و۱/۶)         | (۱/۹و۱/۸و۱/۷)         | (۱/۲و۳)               | (۱/۷و۱/۶و۱/۵)         | (۱/۱و۱)               | (۱/۹و۱/۸و۱/۷)         | شیب                     |
| (۱/۹و۱/۸و۱/۷)                                                | (۱/۴و۱/۳و۱/۲)         | (۱/۸و۱/۷و۱/۶)         | (۱/۹و۱/۸و۱/۷)         | (۱/۲و۳)               | (۱/۷و۱/۶و۱/۵)         | (۱/۱و۱)               | (۱/۹و۱/۸و۱/۷)         | جنس خاک                 |
| (۱/۹و۱/۸و۱/۷)                                                | (۱/۴و۱/۳و۱/۲)         | (۱/۸و۱/۷و۱/۶)         | (۱/۹و۱/۸و۱/۷)         | (۱/۲و۳)               | (۱/۷و۱/۶و۱/۵)         | (۱/۱و۱)               | (۱/۹و۱/۸و۱/۷)         | سطح آب زیرزمینی         |
| (۱/۹و۱/۸و۱/۷)                                                | (۱/۴و۱/۳و۱/۲)         | (۱/۸و۱/۷و۱/۶)         | (۱/۹و۱/۸و۱/۷)         | (۱/۲و۳)               | (۱/۷و۱/۶و۱/۵)         | (۱/۱و۱)               | (۱/۹و۱/۸و۱/۷)         | قدمت ساختمان            |
| (۱/۹و۱/۸و۱/۷)                                                | (۱/۴و۱/۳و۱/۲)         | (۱/۸و۱/۷و۱/۶)         | (۱/۹و۱/۸و۱/۷)         | (۱/۲و۳)               | (۱/۷و۱/۶و۱/۵)         | (۱/۱و۱)               | (۱/۹و۱/۸و۱/۷)         | اسکلت ساختمان           |
| (۱/۹و۱/۸و۱/۷)                                                | (۱/۴و۱/۳و۱/۲)         | (۱/۸و۱/۷و۱/۶)         | (۱/۹و۱/۸و۱/۷)         | (۱/۲و۳)               | (۱/۷و۱/۶و۱/۵)         | (۱/۱و۱)               | (۱/۹و۱/۸و۱/۷)         | تعداد طبقات             |
| (۱/۹و۱/۸و۱/۷)                                                | (۱/۴و۱/۳و۱/۲)         | (۱/۸و۱/۷و۱/۶)         | (۱/۹و۱/۸و۱/۷)         | (۱/۲و۳)               | (۱/۷و۱/۶و۱/۵)         | (۱/۱و۱)               | (۱/۹و۱/۸و۱/۷)         | تعداد همسایگی           |
| (۰,۰,۱۴۹و۰,۱۶۴و۰,۱۹۴)                                        | (۰,۰,۱۴۹و۰,۱۶۴و۰,۱۹۴) | (۰,۰,۱۴۹و۰,۱۶۴و۰,۱۹۴) | (۰,۰,۱۴۹و۰,۱۶۴و۰,۱۹۴) | (۰,۰,۱۴۹و۰,۱۶۴و۰,۱۹۴) | (۰,۰,۱۴۹و۰,۱۶۴و۰,۱۹۴) | (۰,۰,۱۴۹و۰,۱۶۴و۰,۱۹۴) | (۰,۰,۱۴۹و۰,۱۶۴و۰,۱۹۴) | وزنهای فازی             |

پذیرفته است که در روابط ۵ الی ۸ آورده شده است. اگر اعداد فازی را با سه تایی  $(l, m, u)$  نشان دهیم عملگرهای پایه عبارتند از [۲۴و۲۵و۲۶]:

$$\begin{aligned}\tilde{A}_1 \oplus \tilde{A}_2 &= (l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \\ \tilde{A}_1 - \tilde{A}_2 &= (l_1, m_1, u_1) - (l_2, m_2, u_2) = (l_1 - l_2, m_1 - m_2, u_1 - u_2) \\ \tilde{A}_1 \otimes \tilde{A}_2 &= (l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) = (l_1 \cdot l_2, m_1 \cdot m_2, u_1 \cdot u_2) \\ \tilde{A}_1^{-1} &= (l, m, u)^{-1} = \left( \frac{1}{u}, \frac{1}{m}, \frac{1}{l} \right)\end{aligned}$$

یکی از مراحل مهم در تحلیل سلسله مراتبی، محاسبه نرخ ناسازگاری ماتریس مقایسه 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 می باشد [۲۷]. در این صورت اگر نرخ سازگاری کمتر از ۰,۱ باشد، نشان دهنده سازگاری قابل قبول مقایسات زوجی طبق نظر کارشناسان می باشد (نظرات کارشناسان با همدیگر سازگاری قابل قبول دارند) [۲۸].

در بین روشهای مختلف محاسبه وزن معیارها در تحلیل سلسله مراتبی فازی، در این تحقیق از روش میانگین هندسی فازی محاسبه شده است. مهمترین مزیت استفاده از میانگین هندسی نسبت به میانگین حسابی کاهش نفوذ بالاترین و کمترین مقادیر (حداکثر، حداقل) است [۲۳]. در این روش ابتدا ماتریس مقایسه زوجی فازی  $\tilde{A}(\tilde{a}_{ij})$  تشکیل می شود و سپس با استفاده از تکنیک میانگین هندسی، میانگین هندسی فازی و وزن فازی هر یک از معیارها محاسبه می گردد که در روابط ۲ تا ۴ نشان داده شده است:

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} \tilde{1} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{m1} & \dots & \tilde{1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\tilde{r}_i = (\tilde{a}_{i1} \otimes \tilde{a}_{i2} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in})^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \quad (4)$$

کلیه محاسبات در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی با یک سری عملگرهای پایه در محاسبات فازی صورت



در مباحث مختلف از جمله طراحی و برنامه ریزی شهری می‌باشد. بدیهی است برای تولید نقشه آسیب‌پذیری نهایی و طبقه بندی آن‌ها به ۵ دسته آسیب‌پذیری باید درجات آسیب‌پذیری را با اعداد حقیقی در بازه [0,1] نشان داد، لذا نیاز به عملیات غیرفازی‌سازی می‌باشد. غیرفازی‌سازی با روش‌های مختلفی قابل انجام می‌باشد که عملگر میانگی وزنی مرتب شده (OWA) در این تحقیق مدنظر می‌باشد.

## ۲-۷-۱- عملگر OWA

این عملگر که توسط یاگر معرفی شد یک عملگر تجمیعی F با بردار وزن  $v$  است به طوریکه به ازای یک مجموعه ورودی از داده‌ها  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  که قرار است با یکدیگر تجمیع شوند رابطه ۱۱ برقرار است [۲۹]:

$$F_v(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n v_i b_i, x \in I^n \quad (11)$$

که  $b_i$ ،  $i$ امین مقدار بزرگ مجموعه مرتب شده صعودی به نزولی مجموعه  $X$  است و  $v_i$  هم عناصر بردار وزن درجه-ای عملگر OWA هستند. عملگر OWA شامل دو مشخصه است که بیانگر رفتار عملگر OWA می‌باشد: ۱- درجه ORness یا ریسک‌پذیری ۲- میزان مصالحه بین معیارها. درجه ORness یا ریسک‌پذیری، موقعیت عملگر OWA را در بین روابط AND (مینیم) و OR (ماکزیم) نشان می‌دهد. این درجه بیانگر میزان تاکید تصمیم‌گیر بر روی مقادیر بهتر و یا بدتر یک مجموعه از معیارها و یا همان ریسک‌پذیری و ریسک‌گریزی تصمیم‌گیر است. درجه ORness به صورت رابطه ۱۲ تعریف می‌شود [۲۹]:

$$ORness = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (n-i)v_i, 0 \leq ORness \leq 1$$

هر چه مقدار ORness بیشتر باشد، میزان خوش بینی و یا ریسک‌پذیری تصمیم‌گیر بیشتر خواهد بود و هرچه مقدار ORness کمتر باشد، میزان بدبینی و یا ریسک‌گریزی تصمیم‌گیر بیشتر خواهد بود. به طور کلی یک عملگر OWA با ORness بزرگتر از ۰.۵ معرف یک تصمیم‌گیر ریسک‌پذیر و خوش بین و  $ORness=0.5$  معرف یک تصمیم‌گیر خنثی و  $ORness$  کمتر از ۰.۵ معرف یک تصمیم‌گیر ریسک‌گریز و بدبین خواهد بود. لازم به ذکر است که هر

روش‌های مختلفی برای غیرفازی‌سازی اعداد فازی ارائه شده است که در این قسمت از روش غیرفازی‌سازی مرکز ثقل استفاده شده است. بهترین مقدار غیرفازی (BNP) برای یک عدد فازی مثلثی  $\tilde{M} = (l, m, u)$  از روش غیرفازی‌سازی مرکز ثقل از رابطه ۹ قابل محاسبه است [۲۸]:

$$BNP = l + \frac{(u-l) + (m-l)}{3} \quad (9)$$

لازم به ذکر است کلیه محاسبات در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزارهای متلب و اکسل صورت پذیرفته است. وزن نهایی معیارها در جدول ۲ آورده شده است. نرخ ناساگاری برای ماتریس مقایسه زوجی در این تحقیق ۰.۰۹۶ بدست آمده که حاکی از سازگاری قابل قبول نظرات کارشناسان می‌باشد.

## ۲-۶- تلفیق نقشه‌های معیار

بعد از تولید نقشه‌های معیار، باید با یک قاعده تصمیم‌گیری مناسب نقشه‌های معیار را تلفیق نمود و به نقشه آسیب‌پذیری نهایی رسید. در این تحقیق از روش ترکیب خطی وزندار فازی استفاده شده است که از رابطه ۱۰ به دست می‌آید:

$$\tilde{V}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{W}_j \otimes \tilde{R}_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

در رابطه فوق  $\tilde{V}_i$  درجه آسیب‌پذیری کلی ساختمان  $i$ ،  $\tilde{W}_j$  وزن معیار  $j$ ،  $\tilde{R}_{ij}$  درجه آسیب‌پذیری ساختمان  $i$  در معیار  $j$  می‌باشد که همگی اعداد فازی می‌باشند. تمامی محاسبات فوق با استفاده از عملگرهای پایه فازی که در روابط ۵ الی ۸ آورده شده است صورت می‌پذیرد.

## ۲-۷- غیرفازی‌سازی

آسیب‌پذیری هر ساختمان از میانگین وزندار درجات آسیب‌پذیری آن در ۸ معیار به دست می‌آید و با توجه به اینکه هم وزن معیارها و هم درجات آسیب‌پذیری اعدادی فازی هستند، مسلماً آسیب‌پذیری کلی هر ساختمان نیز عددی فازی خواهد بود. رتبه‌بندی ساختمان‌ها بر اساس درجه آسیب‌پذیری لرزه‌ای و همچنین طبقه‌بندی آن‌ها به کلاس‌های مختلف آسیب‌پذیری یکی از نیازهای کارشناسان

چه رفتار عملگر OWA به عملگرهای OR یا MAX نزدیکتر باشد مقدار ORness به یک نزدیکتر است. در حالیکه رفتار این عملگر به عملگرهای AND و MIN نزدیکتر باشد مقدار ORness به صفر نزدیکتر است. بنابراین با ملاحظه بردارهای  $V_* = (0, 0, 0, \dots, 1)^T$  به عنوان وزن عملگر AND و  $V^* = (1, 0, 0, \dots, 0)^T$  به عنوان عملگر OR و  $V_A = (\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n})$  به عنوان بردار وزن عملگر میانگین گیری ساده وزنی و که همگی در رابطه ۱۳ نشان داده شده اند.

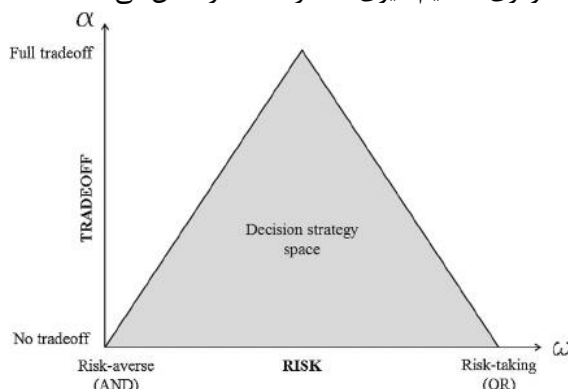
$$orness(V_*) = 0, orness(V^*) = 1, orness(V_A) = 0.5$$

یک معیار سنجش دیگر از ORness به صورت  $ORness = 1 - ANDness$  تعریف شده است.

مشخصه دوم عملگر OWA میزان مصالحه بین معیارهاست. میزان مصالحه، میزان تبادل یا تاثیرپذیری یک معیار از سایر معیارها را نشان می‌دهد. درجه مصالحه به صورت رابطه ۱۴ تعریف می‌شود [۲۹]:

$$trade-off = 1 - \sqrt{\frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \frac{1}{n})^2}, 0 \leq trade-off \leq 1$$

با توجه به دو مشخصه اصلی عملگر OWA می‌توان طیف وسیعی از شرایط مختلف ریسک و توازن تعریف نمود و به ازای هر کدام یک نقشه آسیب‌پذیری تولید نمود. طیف وسیع به صورت شماتیک در محدوده مثلثی قرار می‌گیرد که در شکل ۶ نشان داده شده است. این مثلث به عبارتی دیگر فضای استراتژی تصمیم‌گیری عملگر OWA را نشان می‌دهد.



شکل ۶- فضای استراتژی تصمیم‌گیری با عملگر OWA (شرایط مختلف ریسک) [۲۹]

با توجه به شکل فوق باید گفت حداقل ریسک و بدون توازن همان عملگر AND، حداکثر ریسک بدون توازن

عملگر OR و متوسط ریسک با حداکثر توازن عملگر ترکیب خطی وزندار (WLC) می‌باشد. بدیهی است می‌توان طیف وسیعی از عملگرها بین AND و OR تولید نمود.

## ۲-۷-۲- محاسبه بردار وزن عملگر OWA

یک مسئله مهم در تعریف عملگر OWA محاسبه بردار وزن  $V$  است. روش‌های متعددی برای محاسبه وزن عملگر OWA وجود دارد که در این تحقیق از روش محاسبه بردار وزن با استفاده از کمیت سنج‌های زبانی استفاده شده است. در این روش که توسط یاگر پیشنهاد شد برای محاسبه بردار وزن از کمیت سنج‌های زبانی استفاده می‌گردد که از رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود [۳۰]:

$$V_i = Q\left(\frac{i}{n}\right) - Q\left(\frac{i-1}{n}\right), i = 1, \dots, n \quad (15)$$

در این رابطه  $i$  شماره معیار و  $n$  تعداد معیارها می‌باشد.  $Q$  نیز یک کمیت سنج زبانی است که مفهوم اکثریت فازی را منعکس نموده و برای محاسبه بردار وزن درجه‌ای استفاده می‌شود و به صورت رابطه ۱۶ نشان داده می‌شود [۳۰]:

$$Q(r) = r^\alpha, \alpha > 0 \quad (16)$$

لازم به ذکر است که تابع  $Q$  رابطه بسیار نزدیکی با مقدار خوش بینی دارد که در رابطه ۱۷ نشان داده شده است [۳۰]:

$$orness(v) = \int_0^1 Q(r) dr = \int_0^1 r^\alpha dr = \frac{1}{\alpha + 1} \quad (17)$$

اگر  $\alpha > 1$  باشد،  $ORness(v) < 0.5$  خواهد شد که بیانگر میزان بدبینی یا ریسک‌گریزی تصمیم‌گیر است. اگر  $\alpha = 1$  در نظر گرفته شود،  $ORness(v) = 0.5$  خواهد شد که معرف تصمیم‌گیر خنثی است. و به ازای  $\alpha < 1$ ،  $ORness(v) > 0.5$  خواهد شد که معرف تصمیم‌گیر خوش بین و یا ریسک‌پذیر است. بدیهی است با درجات مختلف خوش بینی می‌توان طیف وسیعی از شرایط ریسک بین عملگرهای AND و OR تعریف نمود و متناسب با هر یک به ارزیابی آسیب‌پذیری در بدبینانه‌ترین حالت (AND)، خوش‌بینانه‌ترین حالت (OR) و بی‌نهایت حالت دیگر بین این دو حالت پرداخت.

## ۲-۷-۳- وزن‌های درجه‌ای در غیرفازی سازی

همانطور که اشاره شد در این تحقیق غیرفازی سازی با عملگر OWA انجام شده است. در غیرفازی سازی، اعداد

### ۳-۲- تحلیل نتایج و بحث

با تحلیل نتایج می‌توان به این نتیجه رسید که درجه آسیب پذیری ناشی از زلزله با افزایش درجه ریسک پذیری افزایش می‌یابد. درجه ریسک پذیری همان میزان نزدیکی عملگر OWA به عملگر OR می‌باشد. با افزایش تدریجی درجه ریسک پذیری تعداد ساختمان‌هایی که در طبقه آسیب‌پذیری "خیلی کم" هستند کمتر شده و تعداد ساختمان‌هایی که در طبقه آسیب‌پذیری "خیلی زیاد" هستند بیشتر می‌شود. نمودار موجود در شکل ۸ به خوبی اطلاعات آماری از درصد ساختمان‌های هر طبقه آسیب پذیری را در درجات مختلف ریسک پذیری نشان می‌دهد. همانطور که در مقدمه اشاره شد، زلزله از بحران‌های رایج در تمامی نقاط جهان بوده و مباحث مربوط به مدیریت بحران زلزله باید در تمامی حوزه‌ها به ویژه در طراحی و برنامه ریزی شهری لحاظ گردد. لذا در پروسه ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌ها در طیف‌های مختلف ریسک در راستای ایجاد آمادگی در برابر این بحران، باید طیفی را ملاک عمل قرار داد که در آن آسیب پذیری ماکزیمم است و اقداماتی را انجام داد که آسیب پذیری شهری را به حداقل ممکن برساند. چرا که بحث جان انسان‌ها و امنیت شهر مطرح می‌باشد و باید طیفی را ملاک عمل قرار داد که آسیب پذیری در آن ماکزیمم است. با توجه به تحلیل آماری آسیب‌پذیری که در نمودارها هم مشخص است، در شرایط  $OR_{ness}=1$  آسیب‌پذیری در حالت ماکزیمم قرار دارد. مطابق نمودار واضح است که در این شرایط حدود نیمی از ساختمان‌های منطقه ۶ تهران از آسیب‌پذیری بالایی برخوردارند که این هشدار است برای مسئولین که اقدامات لازم در خصوص کاهش آسیب‌پذیری را در دستور کار خود قرار دهند.

هدف این مقاله ارائه راهکارهای کاهش آسیب‌پذیری نبوده بلکه با تولید نقشه‌های آسیب‌پذیری در سناریوهای مختلف، اطلاعاتی در خصوص میزان آسیب‌پذیری و دلایل آن ارائه نماید. با تحلیل دقیق نتایج، دلایل اصلی بالابودن آسیب‌پذیری ساختمان‌ها مشخص گردید. از جمله دلایل بالا بودن آسیب‌پذیری ساختمان‌های منطقه ۶ تهران می‌توان به مواردی مانند تراکم بالای ساختمانی منطقه (بیش از مقدار متوسط کل شهر تهران و نتیجتاً ایران)، نزدیکی به گسل و قدمت بالای ۲۵ سال بیش از ۵۰ درصد

فازی مثلثی باید با ترکیب وزندار ۳ مقدار  $l$ ،  $m$  و  $u$  به یک عدد  $c_{rips}$  که بیانگر درجه آسیب‌پذیری هر ساختمان هست تبدیل شوند. لذا نیاز به سه وزن درجه‌ای یعنی  $v_1$ ،  $v_2$  و  $v_3$  می‌باشد که باید در شرایط مختلف ریسک (درجات مختلف خوش بینی) محاسبه گردد. در این تحقیق تولید نقشه آسیب‌پذیری در ۵ شرایط مختلف ریسک از حالت ( $OR_{ness}=0$ ) تا حالت ( $OR_{ness}=1$ ) صورت پذیرفته است که وزن‌های درجه‌ای متناسب با هر مقدار از  $OR_{ness}$  در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- وزن‌های درجه‌ای متناسب با درجات مختلف ریسک

| ضریب ریسک | ضریب حد | وسط (M) | پایین (L) | بالا (U) |
|-----------|---------|---------|-----------|----------|
| پذیری     | ضریب حد | وسط (M) | پایین (L) | بالا (U) |
| AND = ۰   | ۰       | ۱       | ۰         | ۰        |
| ۰,۲۵      | ۰,۷۰۳۷  | ۰,۲۵۹۳  | ۰,۰۳۷     | ۰,۰۳۷    |
| ۰,۵       | ۰,۳۳۳۳  | ۰,۳۳۳۳  | ۰,۳۳۳۳    | ۰,۳۳۳۳   |
| ۰,۷۵      | ۰,۱۲۶۴  | ۰,۱۸۰۲  | ۰,۶۹۳۴    | ۰,۶۹۳۴   |
| OR = ۱    | ۰       | ۰       | ۱         | ۱        |

### ۳- یافته‌های تحقیق

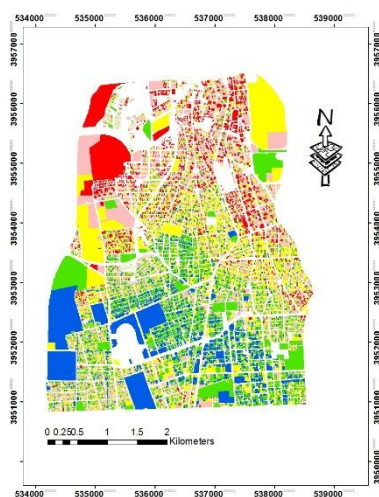
نتایج اصلی تحقیق نقشه‌های ارزیابی مقاومت ساختمان‌های منطقه ۶ تهران در مقابل زلزله در شرایط مختلف ریسک و همچنین تحلیل آماری از درصد ساختمان‌های آسیب پذیر در درجات مختلف آسیب‌پذیری می‌باشد. در این مقاله نتایج ارزیابی لرزه‌ای یا مدلسازی آسیب‌پذیری ناشی از زلزله در ۵ شرایط مختلف ریسک ارائه شده است.

### ۳-۱- نقشه‌های آسیب‌پذیری لرزه‌ای

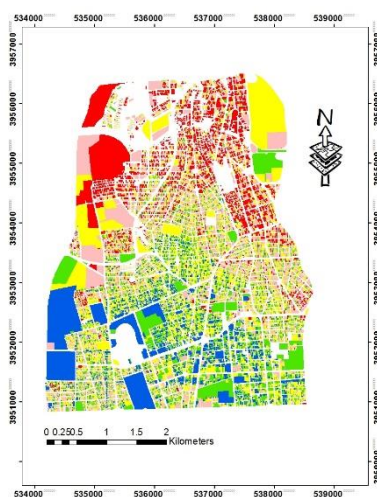
با توجه به روابط ذکر شده در بخش‌های قبل می‌توان در شرایط مختلف ریسک (از بدبینانه ترین حالت تا خوش بینانه ترین حالت) نقشه‌های آسیب‌پذیری را تولید نمود. نقشه‌های آسیب‌پذیری در این تحقیق در ۵ شرایط مختلف ریسک ( $OR_{ness}=0, .25, .5, .75, 1$ ) تولید شده است که در شکل ۷ نشان داده شده است. در این نقشه‌ها درجه آسیب‌پذیری هر ساختمان با یک عدد حقیقی در بازه  $[0,1]$  نشان داده شده و در نهایت ساختمان‌ها به ۵ کلاس آسیب‌پذیری "خیلی کم"  $[0,0.2]$ ، "کم"  $[0.2,0.4]$ ، "متوسط"  $[0.4,0.6]$ ، "زیاد"  $[0.6,0.8]$  و "خیلی زیاد"  $[0.8,1]$  تقسیم شده است.

ساختمان‌های منطقه اشاره نمود. از طرفی عدم نظارت صحیح شهرداری تهران بر ساخت و سازها در منطقه و در نظر نگرفتن رویکرد مدیریت بحران در طراحی و برنامه ریزی شهری خود از جمله دلایل اصلی بالا بودن

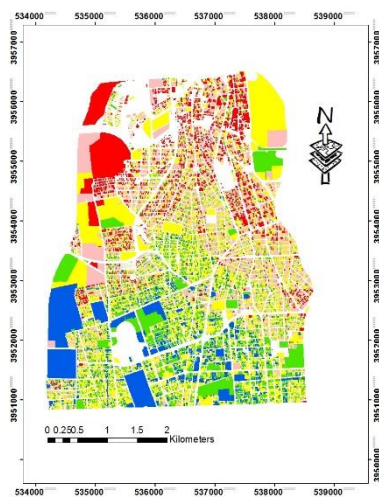
آسیب‌پذیری در این شهر باشد. لذا ضروری است با در نظر گرفتن اصول مدیریت بحران در طراحی و برنامه ریزی شهری و ارایه راهکارهای اساسی، آسیب‌پذیری ساختمان‌ها را در مقابل زلزله کاهش داد.



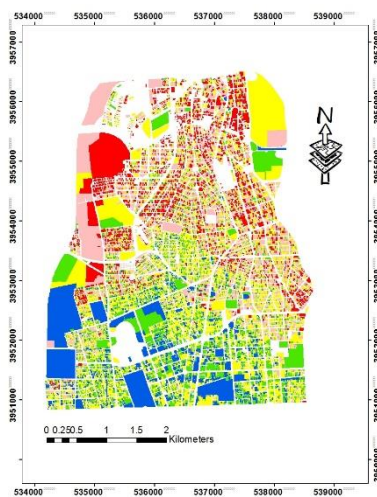
ORness=0



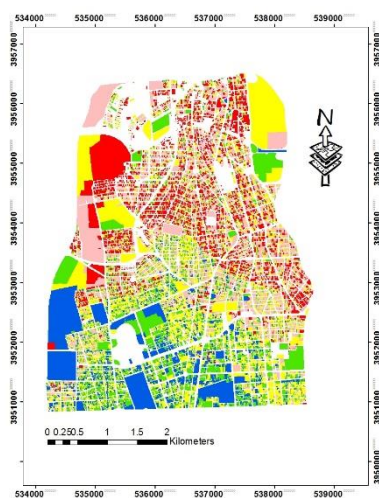
ORness=0.25



ORness=0.5



ORness=0.75



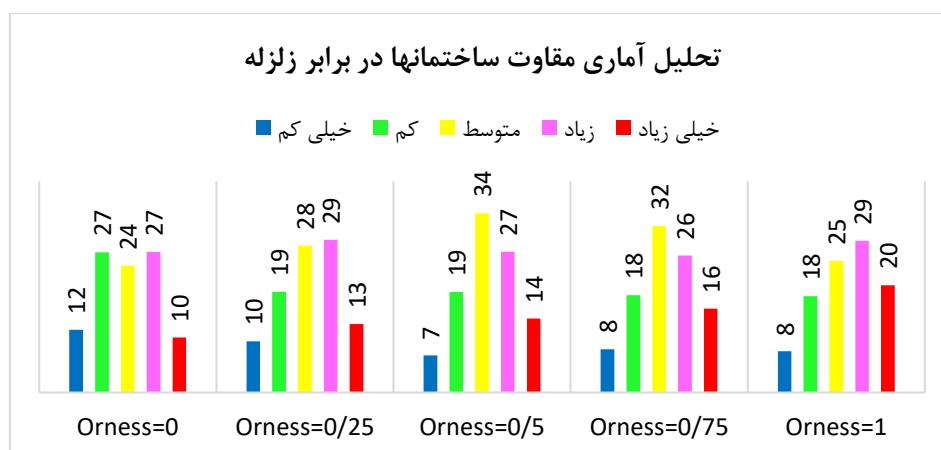
ORness=0.1

#### درجات آسیب پذیری

- 0-0.2 (خیلی کم)
- 0.2-0.4 (کم)
- 0.4-0.6 (متوسط)
- 0.6-0.8 (زیاد)
- 0.8-1.0 (خیلی زیاد)

راهنمای نقشه

شکل ۷- نقشه‌های آسیب‌پذیری در سناریوهای مختلف و در شرایط مختلف ریسک



شکل ۸- تحلیل آماری آسیب‌پذیری لرزه‌ای در شرایط مختلف ریسک

#### ۴- تحلیل حساسیت

یکی از مهمترین مراحل یک تحلیل ارزیابی چندمعیاره تحلیل حساسیت می‌باشد. تحلیل حساسیت در حالت کلی به مطالعه تأثیرپذیری نتایج خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل گفته می‌شود [۳۱]. بدیهی است به علت وجود منابع مختلف خطا، خروجی نهایی مدل‌های ارزیابی که رتبه‌بندی گزینه‌ها می‌باشد نیز تحت تأثیر این خطاها بوده و باید میزان درستی نتایج را بررسی نمود. در ارزیابی چندمعیاره، تحلیل حساسیت با تغییرات سیستماتیک در وزن و مقادیر معیارها و بررسی تأثیر آن در رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها صورت می‌پذیرد. به عبارتی با تحلیل حساسیت یک مدل ارزیابی چندمعیاره، میزان تغییرپذیری نتایج نهایی مدل (ثابت بودن نتایج) بررسی می‌شود [۳۲]. با توجه به اینکه وزن معیارها با استفاده از نظرات کارشناسی که همراه با قضاوت‌های ذهنی همراه می‌باشند به دست می‌آید احتمال وجود خطا در آن‌ها بیشتر بوده، لذا اگر با اعمال تغییراتی در وزن معیارها و ارزیابی مجدد نتایج نهایی ارزیابی تغییرات چشم‌گیری نداشت، می‌توان به نتایج مدل اعتماد نمود [۳۳].

یک روش معمول در تحلیل حساسیت بدین صورت می‌باشد که وزن یک معیار را به اندازه  $P$  درصد افزایش یا کاهش می‌دهند و برای اینکه مجموع وزن‌های جدید هم برابر با یک گردد (رابطه ۱۸)، وزن سایر معیارها ( $C_i$ ) را نیز به نسبتی که در رابطه ۱۹ آمده است کاهش یا افزایش می‌دهند [۳۴].

$$W(P) = \sum_{i=1}^n W(C_i, P) = 1 \quad (18)$$

در رابطه فوق  $W(C_i, P)$  وزن معیار  $i$ ام در تغییرات به میزان  $P$  درصد می‌باشد. اگر معیار  $m$ ام به میزان  $P$  درصد تغییر کند، مقدار جدید آن از رابطه ۱۹ به دست می‌آید [۳۴]:

$$W(C_m, P) = W(C_m, 0) + W(C_m, 0) \times P, 1 \leq m \leq n \quad (19)$$

همچنین وزن سایر معیارها برای برقرار شدن رابطه ۱۸ از رابطه ۲۰ به دست می‌آید [۳۴]:

$$W(C_i, P) = (1 - W(C_m, P)) \times W(C_i, 0) / (1 - W(C_m, 0)), i \neq m, 1 \leq i \leq n$$

در این تحقیق مطابق روابط فوق تحلیل حساسیت ۱۶ بار با تغییر ۱۰ درصد افزایش و ۱۰ درصد کاهش برای تمامی معیارها (۸ معیار) صورت پذیرفت و نقشه‌های آسیب‌پذیری با وزن‌های جدید تولید شد. بیشترین تغییرات ایجاد شده نسبت به حالت اولیه در تحلیل حساسیت نسبت به معیار "فاصله از گسل" و کمترین تغییرات نیز در تحلیل حساسیت نسبت به معیار "سطح آب زیرزمینی" بوده است. به عنوان نمونه نتایج تحلیل حساسیت معیار "فاصله از گسل" در جداول ۴ الی ۶ آورده شده است. با توجه به اینکه با تغییر وزن معیارهای ورودی تغییرات محسوسی در نتایج مدل به وجود نیامد، لذا می‌توان گفت با توجه به تست تحلیل حساسیت نتایج مدل قابل اعتماد است.

جدول ۴- تحلیل آماری آسیب پذیری با وزنهای اولیه

| ORNESS=1 | ORNESS=.75 | ORNESS=.5 | ORNESS=.25 | ORNESS=0 |           |
|----------|------------|-----------|------------|----------|-----------|
| ٪۸       | ٪۸         | ٪۷        | ٪۱۰        | ٪۱۲      | خیلی کم   |
| ٪۱۸      | ٪۱۸        | ٪۱۹       | ٪۱۹        | ٪۲۷      | کم        |
| ٪۲۵      | ٪۳۲        | ٪۳۴       | ٪۲۸        | ٪۲۴      | متوسط     |
| ٪۲۹      | ٪۲۶        | ٪۲۷       | ٪۲۹        | ٪۲۷      | زیاد      |
| ٪۲۰      | ٪۱۶        | ٪۱۳       | ٪۱۴        | ٪۱۰      | خیلی زیاد |

جدول ۵- تحلیل آماری آسیب پذیری با افزایش ۱۰ درصدی وزن معیار "فاصله از گسل"

| ORNESS=1 | ORNESS=.75 | ORNESS=.5 | ORNESS=.25 | ORNESS=0 |           |
|----------|------------|-----------|------------|----------|-----------|
| ٪۸       | ٪۸         | ٪۷        | ٪۱۰        | ٪۱۲      | خیلی کم   |
| ٪۱۸      | ٪۱۷        | ٪۲۲       | ٪۱۹        | ٪۲۸      | کم        |
| ٪۲۴      | ٪۳۳        | ٪۳۵       | ٪۲۸        | ٪۲۴      | متوسط     |
| ٪۳۰      | ٪۲۶        | ٪۲۴       | ٪۲۹        | ٪۲۶      | زیاد      |
| ٪۲۰      | ٪۱۶        | ٪۱۲       | ٪۱۴        | ٪۱۰      | خیلی زیاد |

جدول ۶- تحلیل آماری آسیب پذیری با کاهش ۱۰ درصدی وزن معیار "فاصله از گسل"

| ORNESS=1 | ORNESS=.75 | ORNESS=.5 | ORNESS=.25 | ORNESS=0 |           |
|----------|------------|-----------|------------|----------|-----------|
| ٪۸       | ٪۸         | ٪۷        | ٪۱۰        | ٪۱۱      | خیلی کم   |
| ٪۱۸      | ٪۱۸        | ٪۱۶       | ٪۱۹        | ٪۲۶      | کم        |
| ٪۲۵      | ٪۳۲        | ٪۳۶       | ٪۲۸        | ٪۲۴      | متوسط     |
| ٪۳۰      | ٪۲۶        | ٪۲۷       | ٪۲۹        | ٪۲۸      | زیاد      |
| ٪۱۹      | ٪۱۶        | ٪۱۴       | ٪۱۴        | ٪۱۱      | خیلی زیاد |

این منطقه، ضروری است با در نظر گرفتن اصول مدیریت بحران در طراحی و برنامه ریزی شهری و ارایه راهکارهای اساسی، آسیب پذیری ساختمان های آنرا در مقابل زلزله کاهش داد.

نقشه های آسیب پذیری (نتایج این تحقیق) یکی از ابزارهای ضروری در ارایه راهکارهای کاهش آسیب پذیری می باشد. از جمله کاربردهای دیگر نقشه های آسیب پذیری می توان به استفاده از آن در طرح های آمایش سرزمین، مکان یابی کاربری های، تغییر کاربری ها، تعیین سرانه کاربری ها اشاره نمود. همچنین بدون استفاده از نقشه های آسیب پذیری در طراحی و برنامه ریزی های شهری، تسهیل در مدیریت بحران شهری، تأمین امنیت و سلامت جامعه و در نتیجه کاهش هزینه های کشور امکان پذیر نیست.

از جمله پیشنهاداتی که می توان برای تحقیقات آینده ارائه داد مدلسازی آسیب پذیری کالبدی سایر المان های

همانطور که از جداول فوق مشخص است، بیشترین تغییرات در شرایط  $ORness=0.5$  صورت پذیرفته است که ناچیز می باشد. همانطور که در جداول فوق مشخص است، تغییرات اکثر در حدود ۱ درصد و ماکزیمم ۵ درصد است. نتایج حاصل از تغییر در وزن سایر معیارها به مراتب کمتر بوده که حاکی از ثبات قابل قبول نتایج مدل آسیب پذیری در سناریوهای مختلف تحلیل حساسیت و به عبارتی قابلیت اطمینان بالای نتایج مدل می باشد.

## ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات آینده

با تحلیل ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای ساختمان های منطقه ۶ تهران می توان به این نتیجه رسید که در شرایط ریسکی که مدنظر در مدیریت بحران می باشد ( $ORness=1$ )، حدود نیمی از ساختمان ها از آسیب پذیری بالایی بر خوردارند. با توجه به آسیب پذیری لرزه ای بالای

دستاوردهای جدیدتر در مدیریت نایقینی‌های موجود استفاده شود.

## تشکر و قدردانی

از همه کارشناسان خصوصاً کارشناسان شهرداری منطقه ۶ تهران، اداره کل راه و شهرسازی استان تهران، سازمان مدیریت بحران کشور، سازمان امداد و نجات برای در اختیار قرار دادن داده‌ها و مشارکت در استخراج معیارها و وزندهی آن‌ها جهت نشان دادن نتیجه واقعی کار تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از اساتید گروه سازه و زلزله دانشکده عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل به خاطر مشاوره‌های ارزشمند تشکر و قدردانی می‌گردد. این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از محل گرنت به شماره BNUT/389031/99 انجام شده است که بدینوسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

کالبدی شهر مانند شبکه راه‌ها و تاسیسات می‌باشد. همچنین ارزیابی آسیب‌پذیری اجتماعی، اقتصادی و محیطی ناشی از زلزله پیشنهاد می‌گردد، چرا که تحقیقات صورت گرفته در این زمینه‌ها به مراتب کمتر می‌باشد. با توجه به اینکه یکی از مهمترین مراحل تحقیق یعنی استخراج معیارها با استفاده از نظرات کارشناسان مختلف صورت می‌پذیرد، لذا می‌توان با تکیه بر تکنیک‌های تصمیم‌گیری گروهی به نتایج بهتر و واقعی‌تری دست یافت که این مورد هم پیشنهاد می‌گردد. مباحث مربوط به عدم قطعیت بسیار وسیع می‌باشد و بدیهی است برای دستیابی به مدلی کاملتر باید تحقیقات کاملتری در این زمینه صورت پذیرد. عدم قطعیت موجود در نظرات کارشناسی و داده‌ها را می‌توان با سایر تئوری‌های عدم قطعیت نیز انجام داد و به نتایج بهتری دست یافت. به عنوان مثال پیشنهاد می‌گردد با توجه به توسعه منطق فازی در چند دهه گذشته و مطرح شدن مباحثی مانند فازی نوع دوم و فازی شهودی از این

## مراجع

- [1] Chaulagain, H., Rodrigues, H., Silva, V., Spacone, E., & Varum, H. (2015). Seismic risk assessment and hazard mapping in Nepal. *Natural Hazards*, 78(1), 583-602.
- [2] Zhai, Y., Chen, S., & Ouyang, Q. (2019). GIS-based seismic hazard prediction system for urban earthquake disaster prevention planning. *Sustainability*, 11(9), 2620.
- [3] WANG, D. M., GAO, Y. W., & China, E. D. P. C. (2019). STUDY ON THE PROBABILISTIC SEISMIC DISASTER RISK ASSESSMENT OF URBAN BUILDING COMPLEX. *Engineering Mechanics*, (7), 20.
- [4] Asadzadeh Tarebari, S., & Amini Hosseini, K. (2020). Earthquake Risk-Management Model for Historic Commercial Urban Fabrics. *Natural Hazards Review*, 21(2), 05020002.
- [5] Ebrahimian-Ghajari, Y., AleSheikh, A. A., Modiri, M., Hosnavi, R., & Nekouei, M. A. (2016). Modeling of seismic vulnerability of urban buildings in geographic information system environment: A case study in Babol, Iran. *Journal of Rescue and Relief*, 7(4), 12-25.
- [6] Ghajari, Y. E., Alesheikh, A. A., Modiri, M., Hosnavi, R., Abbasi, M., & Sharifi, A. (2018). Urban vulnerability under various blast loading scenarios: Analysis using GIS-based multi-criteria decision analysis techniques. *Cities*, 72, 102-114.
- [7] Ebrahimian Ghajari, Y. (2020). Designing and implementing a GIS-based model for temporary accommodation planning in the management of earthquake crisis in Babol City. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 29(113), 29-41.
- [8] Delavar, M. R., & Sadrykia, M. (2020). Assessment of Enhanced Dempster-Shafer Theory for Uncertainty Modeling in a GIS-Based Seismic Vulnerability Assessment Model, Case Study—Tabriz City. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 195.
- [9] Sahdev, S., Kumar, M., & Singh, R. B. (2020). Seismic Vulnerability Assessment of NCT of Delhi Using GIS-Based Multiple Criteria Decision Analysis. In *Geocology of Landscape Dynamics* (pp. 11-20). Springer, Singapore.
- [10] ALBULESCU, A. C., Larion, D., & Grozavu, A. (2020). MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF THE SEISMIC VULNERABILITY OF SCHOOL UNITS IN VASLUI CITY, ROMANIA. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 129, 17-28.



- [11] Yariyan, P., Zabihi, H., Wolf, I. D., Karami, M., & Amiryan, S. (2020). Earthquake risk assessment using an integrated Fuzzy Analytic Hierarchy Process with Artificial Neural Networks based on GIS: A case study of Sanandaj in Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 101705.
- [12] Jafarnia, A., Khorram Bakht, A.A., Ghanari, A. (2019). Earthquake Vulnerability Zoning Using Fuzzy Logic in GIS. *Journal of Natural Geography*, 12(43), 105-125.
- [13] eidivandi, A., Khosravi, G. (2019). Zarin Shahr Earthquake Risk Assessment using GIS. *Geography and Environmental Planning*, 30(1), 55-74. doi: 10.22108/gep.2019.115371.1114
- [14] zare, M., rezaee, M., rahimi, E. (2016). Vulnerability Assessment of Old texture of Marvdasht against to Earthquake by Using (AHP) and (GIS). , 7(26), 75-92.
- [15] isalou, S., Latifi, G., GOODARZY, V. (2017). Assessment of Physical Vulnerability of the Texture in District 1 of Tehran city against possible Earthquakes using "IHWP" method and "GIS" system. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 25(100), 73-87. doi: 10.22131/sepehr.2017.24807.
- [16] Asadi, Y., Neisani Samani, N., Kiavarz, M., Abdollahi, M., Argan, M., (2018). Spatial Modeling of Seismic Vulnerability of Urban Buildings with Emphasis on Groundwater Table Effect Using Rough Set Theory, *Journal of Geomatics Science and Technology*, 8(3), 217-230.
- [17] Jelokhani-Niaraki, M. (2020). Collaborative spatial multicriteria evaluation: a review and directions for future research. *International Journal of Geographical Information Science*, 1-34.
- [18] Buchert.T, Neugebauer.S, Schenker.S, Lindow.K, Stark.R. (2015). Multi-criteria Decision Making as a Tool for Sustainable Product Development – Benefits and Obstacles. *Procedia CIRP*, Volume 26, 2015, Pages 70-75.
- [19] Razieh Mosadeghi, Jan Warnken, Rodger Tomlinson, Hamid Mirfenderesk. (2015). Comparison of Fuzzy-AHP and AHP in a spatial multi-criteria decision-making model for urban land-use planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, Volume 49, pp 54-65.
- [20] Vahdat K , Nigel J. Smith, Ghodrati Amiri G. (2014). Fuzzy multicriteria for developing a risk management system in seismically prone areas. *Socio-Economic Planning Sciences*, Volume 48 PP 235-248
- [21] Antonio Celotto, Vincenzo Loia, Sabrina Senatore, (2015), "Fuzzy linguistic approach to quality assessment model for electricity network infrastructure", *Information Sciences*, Volume 304, Pages 1–15
- [22] Bakhtiar Feizizadeh, Majid Shadman Roodposhti, Piotr Jankowski, Thomas Blaschke. (2014). A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. *Computer and Geoscience*, Volume 73, pp 208-221.
- [23] Ebrahimian Ghajari, Y., & Barari Siavoshkolaei, M. (2019). Runoff Production Potential Zoning Using Fuzzy GIS-MCDA Models (Case Study: Tajan River Basin). *Journal of Geomatics Science and Technology*, 9(1), 1-14.
- [24] Kaufmann A, Gupta M. Introduction to fuzzy arithmetic. New York: VNR Company; 1985.
- [25] Zimmermann HJ. Fuzzy set theory and its applications. Boston: Kluwer Academic; 1992.
- [26] Klir G, Yuan B. Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall; 1995.
- [27] Mosadeghi, R., Warnken, J., Tomlinson, R., Mirfenderesk, H. (2015). Comparison of Fuzzy-AHP and AHP in a spatial multi-criteria decision-making model for urban land-use planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, Volume 49, Pages 54–65.
- [28] Zeshui Xu, Senior Member, IEEE, and Huchang Liao. (2014). *IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS*, VOL. 22, NO. 4.
- [29] Yager, R. (1988), "On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multi criteria Decision making", *IEEE Transaction on system, Man, And Cybernetics*, Vol 18, No.1, pp 183-190.
- [30] Yager, R.R., (1996). Quantifier guided aggregation using OWA operators. *International Journal of Intelligent Systems* 11 (1), 49–73.
- [31] Ikonen, T. (2016). Comparison of global sensitivity analysis methods – Application to fuel behavior modeling. *Nuclear Engineering and Design*. Volume 297, February 2016, Pages 72–80.
- [32] Chen, Y., Yu, J., and Khan, S., (2010). Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling & Software*, 25, 1582–1591.
- [33] Sadeghi-Niaraki, A., et al., (2011). Real world representation of a road network for route planning in GIS. *Expert Systems with Applications*, 38, 11999–12008.

- [34] Khalid A. Eldrandaly GISP. (2013). Exploring multi-criteria decision strategies in GIS with linguistic quantifiers: an extension of the analytical network process using ordered weighted averaging operators. International Journal of Geographical Information Science, Volume 27 Issue 12, December 2013, Pages 2455-2482.