

An Analysis of the Vulnerability of Tehran Urban Blocks to Earthquake Via Designing and Implementing a Location-Base Model

Rasoul Afsari^{1*}, Saman Nadizadeh Shorabeh²

- 1. Assistant Professor, Department of Urban Planning-Passive Defense, Superme National Defense University, Tehran*
- 2. PhD Student, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran*

(Received: August 21, 2022; Accepted: November 23, 2022)

Abstract

The vulnerability appraisal is one of the prerequisites of risk analysis in disaster management. Vulnerability to earthquake, especially in urban areas, has increased over years due to the existence of complex urban structures and rapid development. In order to take preemptive measures and reduce the damages of earthquake, the determination of vulnerable areas and implementation of necessary measures seem inevitable. Accordingly, the present study set out to examine the vulnerability of Tehran urban blocks via a location-base model. To attain this objective, first the criteria effective on the evaluation of earthquake vulnerability were divided into three groups, namely exposure, sensitivity, and adaptation capability (16 location criteria in general). Using the expert opinions and network analysis model, the importance of each of the criteria was determined. Fuzzy functions and ordered weighted averaging method were used to normalize the criteria map and develop vulnerability maps under various scenarios. Finally, the sensitivity analysis of the criteria was carried out. The results showed that vulnerable population density and average slope were the criteria with the most and least importance, respectively. The vulnerability maps demonstrated that the areas to the north of the area under study are in the vulnerable class under all scenarios. The stability and dependability of the output results were assessed using sensitivity analysis. The results indicated that changing the weight of the criteria does not have a significant effect on the model outputs, a finding that clearly proves the stability of the model.

Keywords

vulnerability, earthquake, urban blocks, location-base, Tehran.

* Corresponding Author, Email: r.afsari@sndu.ac.ir

تحلیل آسیب‌پذیری بلوک‌های شهری تهران در برابر زلزله با استفاده از طراحی و اجرای یک مدل مکان-مینا*

رسول افسری^{۱*}، سامان نادری‌زاده^۲

۱. استادیار، گروه شهرسازی- پدافند غیرعامل، دانشگاه عالی دفاع ملی، تهران
۲. دانشجوی دکتری، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲)

چکیده

ارزیابی آسیب‌پذیری یکی از پیش‌نیازهای تحلیل ریسک در مدیریت بلااست. آسیب‌پذیری در برابر زلزله به‌ویژه در مناطق شهری در طول سالیان متمادی به دلیل وجود ساختارهای پیچیده شهری و توسعه سریع افزایش یافته است. به منظور انجام دادن اقدامات پیشگیرانه و کاهش خسارات ناشی از زلزله، تعیین مناطق آسیب‌پذیر و اندیشیدن به تمهیدات لازم ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، هدف از این مطالعه بررسی آسیب‌پذیری بلوک‌ها شهری در تهران با استفاده از یک مدل مکان-مینا بود. برای نیل به این هدف، ابتدا معیارهای مؤثر جهت ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در سه گروه در معرض قرار گرفتن، حساسیت، و ظرفیت انطباق‌پذیری (مجموعاً ۱۶ معیار مکانی) قرار گرفتند. با استفاده از نظر کارشناسان و مدل فرایند تحلیل شبکه‌ای اهمیت هر یک از معیارها مشخص شد. از توابع فازی و مدل روش میانگین وزنی مرتب‌شده به ترتیب جهت نرمال‌سازی نقشه معیارها و تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری در سناریوهای مختلف استفاده شد. در نهایت آنالیز حساسیت معیارها انجام شد. نتایج نشان داد معیارهای تراکم جمعیت آسیب‌پذیر و میانگین شیب به ترتیب دارای بیشترین و کمترین اهمیت‌اند. نقشه‌های آسیب‌پذیری مختلف نشان داد مناطق شمالی منطقه مورد مطالعه در همه سناریوها در کلاس آسیب‌پذیری قرار دارند. پایداری و قابلیت اطمینان نتایج خروجی با روش آنالیز حساسیت ارزیابی شد. نتایج نشان داد تغییر وزن معیارها تأثیر قابل توجهی بر خروجی‌های مدل ندارد و به‌وضوح پایداری مدل پیشنهادی را اثبات می‌کند.

کلیدواژگان

آسیب‌پذیری، بلوک‌های شهری، تهران، زلزله، مکان-مینا.

* مقاله حاضر مستخرج از طرح پژوهشی، تحت عنوان «طراحی و پیاده‌سازی یک مدل مکان-مینا جهت تعیین آسیب‌پذیری مناطق شهری در برابر مخاطرات طبیعی با تأکید بر سیل و زلزله: مطالعه موردی شهر تهران» در پژوهشگاه علوم و معارف دفاع مقدس است.

** رایانامه نویسنده مسئول: r.afsari@sndu.ac.ir

بیان مسئله و پیشینه پژوهش

زلزله یکی از بلاهای طبیعی است که هر ساله خسارات شدید جسمی و اجتماعی و مالی در سراسر جهان به همراه دارد (Delavar & Sadrykia 2020: 1). در قرن بیستم، زلزله نزدیک به دویست میلیون نفر را در سراسر جهان قربانی کرده است (Yariyan et al. 2020: 2). هدف از برنامه‌ریزی شهری کاهش آثار ناشی از بلاهای طبیعی و افزایش ایمنی است (Cruz-Milán et al. 2016: 115). در کشورهای در حال توسعه، با وجود توسعه بی‌رویه، برنامه‌ریزی نامناسب و مسائل طراحی و شکست ساختاری پیشرفت بشر با اقداماتی در جهت مقابله با چالش‌های پیچیده ناشی از زلزله محدود شده است (Zhang & Jia 2010: 13). زلزله خسارات اقتصادی قابل توجهی به همراه داشته و جان افراد زیادی را گرفته است (Leggieri et al. 2022: 2). از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰، بیش از ۸۰۰ هزار تلفات، ۱/۴ میلیون مجروح، ۳۰ میلیون بی‌خانمان، و همچنین حدود ۹۵۰ میلیارد دلار خسارت اقتصادی از پیامدهای زلزله‌های مخرب بوده است (Swiss Reinsurance Company 2020). پنج کشوری که بیشترین آسیب را از زمین‌لرزه‌های مخرب جهان داشته‌اند به ترتیب عبارت‌اند از: چین (۱۶٪)، اندونزی (۱۰٪)، ایران (۸٪)، ترکیه (۴/۵٪)، و ژاپن (۴٪) (CRED 2020). در این میان، ایران، با قرار گرفتن در کمربند لرزه‌ای فعال آلپ-هممالیا، کشوری زلزله‌خیز است که در قرون گذشته بیش از ۱۳۰ زلزله قوی با بزرگی ۷/۵ ریشتر یا بیشتر را تجربه کرده است. بر اساس آخرین نقشه جهانی خطر لرزه‌ای (Silva et al. 2020: 375)، در حال حاضر هفده کلان‌شهر در سراسر جهان با جمعیتی بیش از ۱۰ میلیون نفر وجود دارد که در بالاترین سطح خطر قرار دارند؛ از جمله توکیو، جاکارتا، دهلی، پکن، مانیل، مکزیکوسیتی، اوزاکا، لس‌آنجلس، داکا، چنگدو، کراچی، تهران، استانبول، لاهور، ناگویا، بوگوتا، و لیما.

ایران یکی از بدترین شاخص‌های آسیب‌پذیری زلزله در جهان را دارد که به عنوان میزان خسارت وارده به اموال در معرض خطر زلزله با قدرت‌های مختلف تعریف شده است (Barbat et al. 2010: 19; Omidvar et al. 2012: 349; Karimzadeh et al. 2017: 25; Ghajari et al. 2018: 103). به طور کلی ۸ درصد از مخرب‌ترین زمین‌لرزه‌ها در این کشور رخ داده است (OECD 2020). تهران، پایتخت سیاسی و اقتصادی ایران، در سطح جهان یکی از شهرهای پرجمعیت با خطر لرزه‌ای بالاست (Kamranzad et al. 2020). پیشینه لرزه‌نگاری تهران نشان می‌دهد دوره بازگشت زمین‌لرزه‌های شدید در مناطق شهری حدود ۱۵۰ سال است و آخرین زلزله نسبتاً زیاد

($M > 7$) در سال ۱۸۳۰ رخ داده است (Ghaychi Afrouz et al. 2021). بالا بودن جمعیت شهری و تراکم ساختمانی، علاوه بر تمرکز منابع در شهر تهران، پیچیدگی طرح‌های مدیریت بحران در مواقع زلزله را افزایش می‌دهد. بنابراین، اگر آثار فاجعه‌بار زلزله از قبل محاسبه شود، می‌توان با برنامه‌ریزی مناسب و به‌موقع خسارات جانی و مالی را کاهش داد.

از آنجا که اتخاذ تصمیم صحیح و به‌موقع می‌تواند تأثیری بسزا در انتخاب گزینه‌های مناسب با استفاده از معیارهای مختلف داشته باشد، ضرورت وجود یک مدل قوی کاملاً محسوس است. بر اساس این رویکرد، تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی می‌تواند فرایند ترکیب و تبدیل داده‌های مکانی (نقشه‌های معیار) و ارزش‌های مربوط به داوری افراد (اولویت تصمیم‌گیران) به منظور به دست آوردن اطلاعات ارزشمند برای تصمیم‌گیری محسوب شود (Shorabeh et al. 2019). از طرفی، GIS ابزاری عالی برای ذخیره‌سازی، دستکاری، تجزیه و تحلیل، و مدیریت داده‌های مکانی است. از این رو، ادغام GIS و MCDA به تصمیم‌گیر کمک می‌کند توابع آنالیز تصمیم، نظیر رتبه‌بندی گزینه‌ها، را برای انتخاب پهنه مناسب انجام دهد (Firozjaei et al. 2019).

محققان مختلف در داخل و خارج از کشور به بررسی آسیب‌پذیری ناشی از زلزله با استفاده از ترکیب سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخته‌اند که در ادامه به مهم‌ترین این تحقیقات اشاره می‌شود. علم^۱ و هاگ^۲ (۲۰۲۲) در پژوهشی در شهر میمن‌سینگ^۳ کشور بنگلادش به ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله مناطق مسکونی با استفاده از یک رویکرد بر مبنای تحلیل‌های چندمعیاره مکانی پرداختند. در این مطالعه از مجموع ۲۳ معیار مکانی در چهار بعد معیارهای زمین‌شناسی، سیستماتیک، ساختاری، و اجتماعی-اقتصادی استفاده شد. برای محاسبه وزن معیارها روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری روش ترکیب خطی وزنی به کار گرفته شد. یافته‌ها نشان داد از ۲۴۱ محله مسکونی شهر میمن‌سینگ ۵۱ محله به‌شدت آسیب‌پذیر، ۱۲۳ محله در معرض آسیب‌پذیری متوسط، و ۶۷ محله در معرض آسیب‌پذیری پایین قرار دارند. یاریان^۳ و همکارانش (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای به ارزیابی ریسک زلزله در شهر سنندج با استفاده از

1. Alam
2. Mymensingh
3. Yariyan

ترکیب GIS-MCDA پرداختند. در این مطالعه از مجموع معیارها در سه گروه محیطی و فیزیکی و جمعیتی استفاده شد. همچنین از ترکیب روش‌های FAHP و شبکه عصبی مصنوعی برای تهیه وزن معیارها و تهیه نقشه تناسب استفاده شد. نتایج مطالعه آنها نشان داد زمانی که از ترکیب روش FAHP-ANN استفاده می‌شود نقشه ریسک زلزله دارای انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان بیشتری است؛ به صورتی که روش FAHP-ANN با دقت بالایی آسیب‌پذیری زلزله را در مناطق پرجمعیت با زیرساخت‌های ساختمانی فرسوده شناسایی کرده است. یاوز کوملو^۱ و تودش (۲۰۱۹) با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر GIS مناطق پرخطر زلزله در مرکز شهر یالووا^۲ (منطقه مرمره، ترکیه) را تعیین کردند. آنها معیارها را در دو بعد زمین‌شناسی (زمین‌شناسی، لیتولوژی، روان‌گرایی) و زیرساخت (مراکز درمانی، دسترسی، کیفیت مصالح، تعداد طبقات) در نظر گرفتند. نتیجه نشان داد مرکز شهر واقع در سمت شرق رودخانه به دلیل داشتن ساختمان‌های کم‌کیفیت و بلندمرتبه و چسبیده بیشترین خطر زلزله را دارد. محله‌ای که در ضلع غربی رودخانه قرار دارد به دلیل داشتن ساختمان‌های باکیفیت و مساحت کم و مجزا از خطر زلزله کمتری برخوردار است. ضلع جنوبی محله فوزی چاکمک^۳ با وجود داشتن ساختمان‌های چسبیده و با کیفیت متوسط، به دلیل داشتن ساختمان‌های کم‌مرتبه و روان‌گرایی پایین، دارای ریسک پایینی است. خدمت‌زاده و همکارانش (۱۴۰۰) به بررسی تحلیل شاخص‌های آسیب‌پذیری شهری با رویکرد مدیریت بحران زلزله در شهر ارومیه پرداختند. آنها از ۹ معیار مکانی شامل تراکم جمعیت، بافت فرسوده، نوع مصالح، عرض معابر، شیب، کاربری، خانوار جمعیتی در بلوک، نوع اسکلت، زیربنای ساختمان استفاده کردند و جهت تهیه نقشه آسیب‌پذیری روش FAHP را به کار بردند. نتیجه نشان داد بیشترین آسیب‌پذیری در مناطق با شیب‌های بیشتر از ۲۰ درصد و نواحی با تراکم جمعیتی بالا مشاهده می‌شود و ۴۵/۹۳ درصد از کل مساحت منطقه مورد مطالعه آسیب‌پذیر (کلاس آسیب‌پذیری خیلی زیاد و زیاد) است. حیدری‌فر و محمودی (۱۴۰۰) در پژوهشی که در شهر جوانرود انجام دادند به تحلیل آسیب‌پذیری کاربری اراضی شهری در برابر زلزله پرداختند. آنها از مجموع ۱۱ معیار مکانی

1. Yavuz Kumlu
2. Yalova
3. Fevzi Çakmak

در سه بعد همسایگی و سازه‌ای و محیطی استفاده کردند و برای وزندهی به معیارها روش ANP و برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری روش WLC را به کار بردند. نتایج نشان داد حدود ۲۰ درصد از فضاهای ساخته‌شده شهری جوان‌رود در برابر این نوع مخاطرات آسیب‌پذیری متوسط به بالایی دارد و ساختار کالبدی مطلوبی در چارچوب مدیریت زلزله ارائه نمی‌کند.

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد جهت تهیه نقشه آسیب‌پذیری ناشی از زلزله باید ابتدا معیارهای مؤثر شناسایی شود و در مرحله بعد با استفاده از ترکیب معیارهای مختلف نقشه آسیب‌پذیری کلاس‌بندی شده تهیه شود. با این حال، در هیچ‌یک از مدل‌های استفاده‌شده در مطالعات گذشته مفهوم ریسک در تصمیم‌گیری جهت تهیه نقشه آسیب‌پذیری زلزله لحاظ نشده است. بر این اساس برای پر کردن این خلأ مهم در زمینه مدل‌سازی آسیب‌پذیری زلزله در این مطالعه برای اولین بار از مدل OWA جهت در نظر گرفتن مفهوم ریسک در تصمیم‌گیری و تهیه نقشه آسیب‌پذیری در ۱۱ سناریوی مختلف جهت تصمیم‌گیری مدیران و برنامه‌ریزان استفاده شد.

مبانی نظری پژوهش

اصطلاح آسیب‌پذیری از واژه لاتین vulnerare به معنای «آسیب»^۱ سرچشمه گرفته است. بنابراین، آسیب‌پذیری می‌تواند «ظرفیت آسیب‌دیده»^۲ در نظر گرفته شود (Dow 1992: 418). مفهوم آسیب‌پذیری اولین بار در دهه ۱۹۷۰ در زمینه مخاطرات طبیعی استفاده شد و از آن زمان تا کنون در رشته‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. تعدادی از مطالعات موجود درباره مفهوم VM^۳ و همچنین در مورد رویکردهای تحلیلی VAM^۴ به تغییرات محیطی بیشتر در زمینه تغییرات آب‌وهوایی بوده‌اند (مثلاً: Adger 1999: 250; Kelly & Adger 2000: 226; Alwang et al. 2001: 9; Singh, 2003; Downing & Patwardhan 2003; Füssel 2005: 12; Cutter et al. 2009: 5; Pearson et al. 2011: 114; Fellmann 2012: 12). علاوه بر این، مطالعات متعددی چارچوب‌های مفهومی را برای ارزیابی آسیب‌پذیری ارائه می‌دهند (مثلاً: Adger & Kelly 1999: 254; Pritchett et al. 2000; Turner et al.

-
1. wound
 2. the capacity to be wounded
 3. vulnerability mapping
 4. vulnerability assessment and mapping

2003: 8075; Brooks, 2003: 3; Cutter et al. 2012: 144; Schröter et al. 2005: 574; Füssel 2007: 156; Polsky et al. 2007: 473; Moreno & Becken 2009: 474; Cinner et al. 2012: 13

طی دهه‌های گذشته، از آسیب‌پذیری در مطالعات بین‌رشته‌ای برای توصیف میزان آمادگی سیستم‌های اجتماعی-اقتصادی و زیست‌محیطی در معرض آسیب یا خطر استفاده شده است. با وجود منابع فراوان، که به این موضوع اختصاص دارد، به دست آوردن یک تعریف واحد که همه زمینه‌ها را شامل شود دشوار است. در این میان، یکی از تعاریف شناخته‌شده را سازمان ملل در قالب استراتژی بین‌المللی برای کاهش بلایا مطرح کرده است که بر مبنای آن آسیب‌پذیری شرایطی است که عوامل یا فرایندهای فیزیکی، اجتماعی، اقتصادی، و زیست‌محیطی آن را ایجاد می‌کنند و آمادگی جوامع را در مقابل آثار و پیامدهای ناشی از بلایا کاهش می‌دهند (ISDR 2004). در مقابل، برنامه توسعه ملی سازمان ملل آسیب‌پذیری را شرایط یا فرایندهای انسانی تلقی می‌کند که از عوامل فیزیکی، اجتماعی، اقتصادی، و زیست‌محیطی منتج می‌شود و احتمال و میزان خسارات ناشی از بلایا را تعیین می‌کند (UNDP 2004). در حالی که تعریف نخست آسیب‌پذیری را شرایط مختلفی معرفی می‌کند که بر آمادگی جامعه تأثیر می‌گذارد، تعریف دوم آسیب‌پذیری را شرایط یا فرایندهای انسانی می‌داند. علاوه بر آن، آسیب‌پذیری به میزان زیادی به شرایط و زمینه محیطی وابسته است؛ به نحوی که در بسیاری از موارد پیامدهای مشابه در موقعیت‌های اجتماعی و اقتصادی مختلف متفاوت است و می‌توان این تفاوت‌ها را به تمایز مکانی آسیب‌پذیری نسبت داد (Muris et al. 2001: 559). همچنین آسیب‌پذیری عاملی پویاست که می‌تواند پیامد تعامل موجود میان طیف وسیعی از عوامل اجتماعی-اقتصادی قلمداد شود (Antypa et al. 2017: 1129). در نتیجه فرایندهای زیست‌محیطی ممکن است برای یک جامعه خاص تهدیدی جدی تلقی شوند، ولی برای جامعه دارای ویژگی‌های متفاوت به منزله بلای طبیعی محسوب نشود.

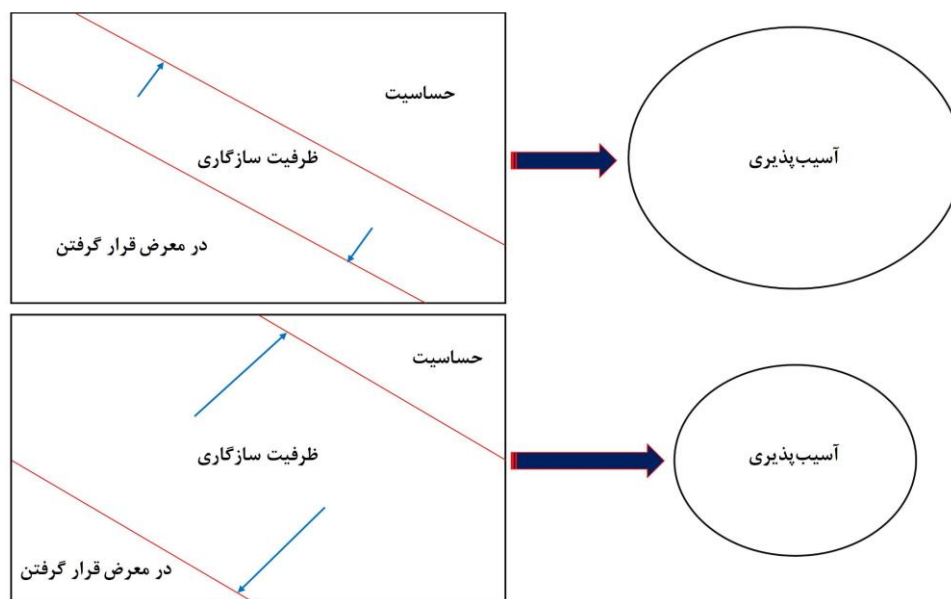
بر اساس نظریه آسیب‌پذیری و ویژگی‌های مفهومی آن در هر فضای شهری مفروض مقدار معینی از خطرپذیری وجود دارد. اما سطوح و دامنه آسیب‌پذیری و ایمنی در سطح شهر به طور یکنواخت توزیع نشده است. زیرا فضاهایی با عنوان آلوده و بی‌دفاع و آسیب‌پذیر محل رخداد انواع خشونت‌ها، جرائم، و حتی مخاطرات محیطی هستند؛ در حالی که در محل‌های دیگر هیچ‌گونه الگوی ناامنی شهری و به تبع آن آسیب‌پذیری وجود ندارد یا آسیب‌پذیری کمتری رخ می‌دهد (Kohn 2014).

با استناد به نظریه آسیب‌پذیری، احتمال بروز حوادث و مخاطرات برای گروهی از شهروندان در بخش‌های خاصی از شهر همواره بیشتر از دیگران است. این افراد را حادثه‌پذیر، دفاع‌ناپذیر، مستعد حادثه، یا اقشار آسیب‌پذیر و در معرض خطر می‌نامند. دوو (۱۹۹۲)، با پذیرش اصل تئوری، آسیب‌پذیری را ظرفیت متفاوت گروه‌ها و افرادی می‌داند که بنا به شرایط مکانی و زمانی متفاوت با مخاطرات مواجه هستند. در ابعاد اجتماعی و اقتصادی و تحلیل‌های کلان از تئوری آسیب‌پذیری تعاریف عمومی‌تری بیان شده است. در بسیاری از موارد، برای رتبه‌بندی کیفی آسیب‌پذیری آن را با معیارهای «زیاد»، «متوسط»، و «کم» تقسیم‌بندی می‌کنند.

طبقه‌بندی‌های مختلفی از دیدگاه‌های آسیب‌پذیری ارائه شده است که در مجموع سه دیدگاه متمایز از پژوهش و تبیین «آسیب‌پذیری» را می‌توان بدین شرح مشخص کرد: ۱. دیدگاه زیستی-فیزیکی: آسیب‌پذیری به منزله ریسک در معرض بودن (خطر محور و فن‌گرا)؛ ۲. دیدگاه ساخت اجتماعی: آسیب‌پذیری به منزله ساخت‌های اجتماعی (اجتماعی و انسان‌محور)؛ ۳. دیدگاه ترکیبی: آسیب‌پذیری به منزله تأثیرپذیری بالقوه و ظرفیت رسیدگی و انطباق (یکپارچگی و پایداری) (Zakour & Gillespie 2013).

آسیب‌پذیری را می‌توان تابعی از سه مؤلفه در معرض قرار گرفتن، حساسیت، و ظرفیت سازگاری در نظر گرفت و آن را توانایی سازگاری یک سیستم از سه جنبه آسیب‌پذیری (در معرض قرار گرفتن، حساسیت، ظرفیت سازگاری) در برابر شرایط غیرعادی و نیروهای خارجی مرتبط با مخاطره تعریف کرد (Füssel & Klein 2006: 304). به بیان دیگر آسیب‌پذیری را می‌توان حساسیت یک سیستم دانست که با قرار گرفتن در معرض تغییرات زیست‌محیطی و اجتماعی، به دلیل فقدان ظرفیت برای سازگاری، آسیب می‌بیند (Smit & Wandel 2006: 284). درک آسیب‌پذیری و فعل و انفعالاتی که بین ساختار و فرایندهای مختلف آن روی می‌دهد از این جهت مفید است که با شناخت سیستم می‌توان اقدامات بهینه‌ای برای کاهش و تعدیل آثار مخرب آن تدارک دید. از این رو، ارزیابی آسیب‌پذیری را می‌توان ابزاری مؤثر برای تعیین حساسیت یک سیستم دانست که اطلاعات لازم را جهت اولویت‌بندی برنامه‌های مدیریتی و حفاظتی در اختیار مدیران قرار می‌دهد و خروجی‌های آن می‌تواند راه‌حل‌هایی برای کاهش میزان آسیب‌پذیری از طریق کاهش تهدیدات و ارائه راهکارهای

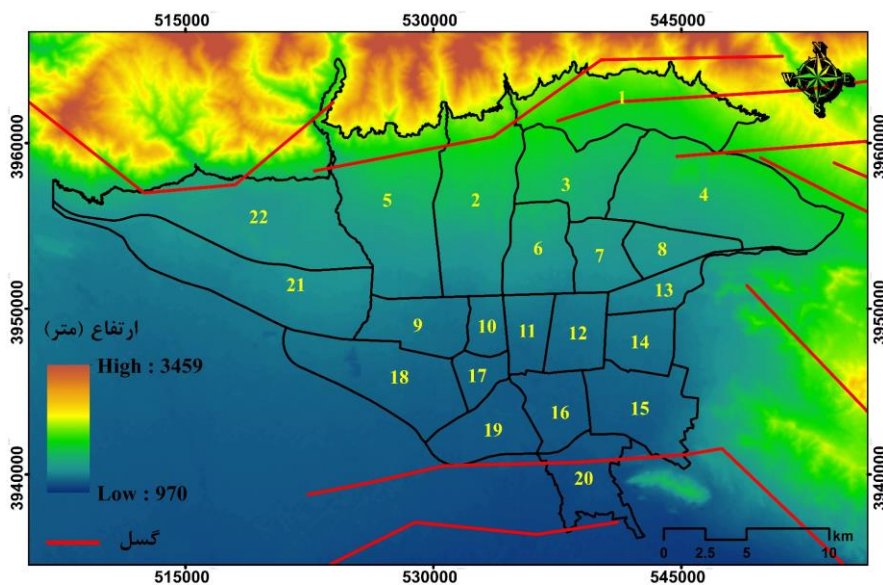
فنی باشد. در این تعریف، آسیب‌پذیری قرار گرفتن در معرض مجموعه‌ای از روش‌های برخورد با استرس‌های محیطی و اجتماعی و اقتصادی است. قرار گرفتن در معرض خطر اشاره به فشارهای ناشی از تغییر در دفعات، ماهیت، شدت، مدت، و ناحیه تغییرات استرس‌ها دارد (Pearce et al. 2010: 159). حساسیت اشاره به ویژگی‌های درونی گونه‌ها یا سیستم‌ها دارد و درجه‌ای است که سیستم بر اساس آن تحت تأثیر عامل بیرونی قرار می‌گیرد. همچنین حساسیت را می‌توان احتمال برخورد با درجات مختلفی از آثار مواجه شدن با اختلالات و شوک‌ها تعریف کرد (Füssel 2007: 157). ظرفیت سازگاری به توانایی یک سیستم اطلاق می‌شود؛ طوری که قادر باشد با تنش‌های اجتماعی و اقتصادی و زیست‌محیطی مقابله کند یا آن‌ها را حل کند. توانایی پاسخ‌دهی یک سیستم در مواجهه با استرس‌ها و تنش‌ها را، به منظور تطبیق و مقابله با آثار آن‌ها، ظرفیت سازگاری گویند (Lindner et al. 2010: 700). شکل ۱ نشان می‌دهد که چگونه ظرفیت سازگاری نقش مهمی در تعیین آسیب‌پذیری با تعدیل دو مؤلفه در معرض قرار گرفتن و حساسیت دارد.



شکل ۱. تأثیر ظرفیت سازگاری در آسیب‌پذیری (Engle 2011)

محدوده و قلمرو مورد مطالعه

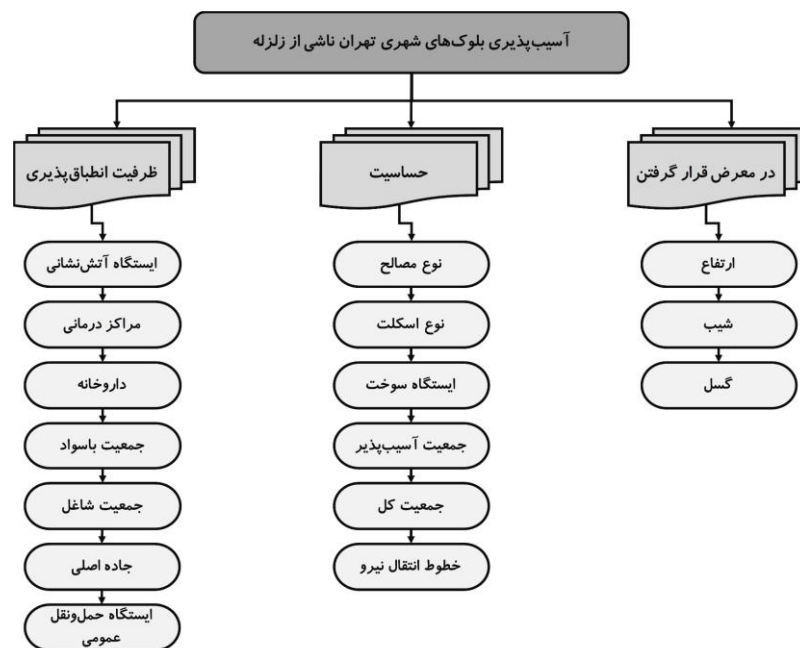
کلان‌شهر تهران، پایتخت ایران، با ۸,۶۹۳,۷۰۶ نفر جمعیت، سی و هفتمین شهر پرجمعیت جهان است (مرکز آمار ایران ۱۳۹۵). شهر تهران از نظر جغرافیایی در ۵۱ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۲). شهر تهران، در دامنه جنوبی رشته کوه البرز، روی تعدادی گسل- از جمله گسل شمال تهران، گسل شمال ری، گسل مشا- قرار دارد. البرز، که در اثر برخورد گندوانا- اوراسیا در تریاس پسین شکل گرفته، رشته کوهی با روند شرق به غرب با طول ۶۰۰ کیلومتر و عرض ۱۰۰ کیلومتر در امتداد کمربند لرزه‌خیز آلپ- هیمالیاست (Ashtari et al. 2005: 195). از نظر تکتونیکی، البرز یک منطقه فعال است که به دلیل همگرایی شمال ایران مرکزی به اوراسیا تحت تنش‌های زمین‌ساختی عظیمی قرار دارد. رشد سریع شهری، ساخت‌وسازهای غیراستاندارد، و تراکم بالای جمعیت شهر تهران را به شدت در برابر زلزله آسیب‌پذیر کرده است (Moradi et al. 2017: 1380). تکرار زمین‌لرزه‌ها در تهران ۱۵۰ سال است که ادامه دارد و آخرین زلزله بزرگ در سال ۱۸۳۹ میلادی این شهر را لرزاند (Ashtari et al. 2005: 196). به این ترتیب زلزله بزرگی در تهران قریب‌الوقوع است.



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی و گسل‌های منطقه مورد مطالعه

معیارهای مورد استفاده

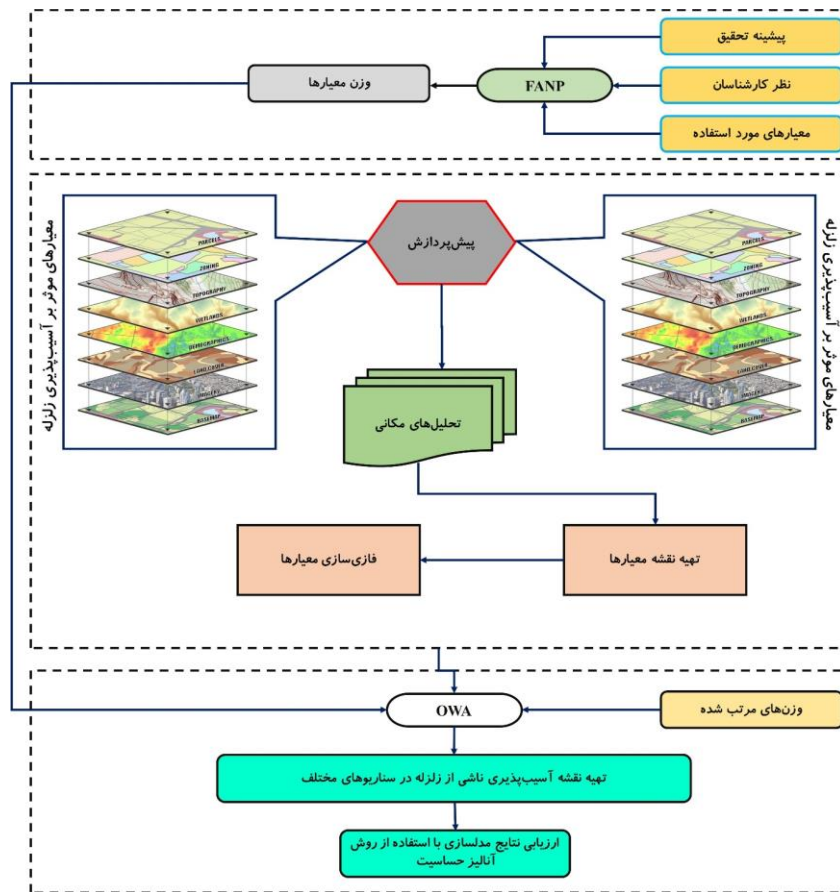
در مطالعات گذشته معیارهای متفاوت و زیادی استفاده شده است. بین معیارهای استفاده شده، برخی—مانند تراکم جمعیت، فاصله از گسل، نوع مصالح، نوع اسکلت—در همه مطالعات به کار گرفته شده‌اند. در تحقیق حاضر، از بین معیارهای مورد استفاده در مطالعات پیشین، شانزده معیار بر اساس نظر کارشناسان و استفاده بیشتر در تحقیقات و در دسترس بودن لایه‌های مکانی آن‌ها در نظر گرفته شدند. این معیارها در سه دسته شامل ظرفیت انطباق‌پذیری، حساسیت، و در معرض قرار گرفتن طبقه‌بندی شدند. معیارهای مرتبط با دسترسی—مانند فاصله از مراکز درمانی—از شهرداری تهران، معیارهای مرتبط با جمعیت و خصوصیات بلوک‌ها از مرکز آمار ایران، معیارهای ارتفاع و شیب با استفاده از تصویر ماهواره‌ای ASTER (استخراج شده از مدل ارتفاعی رقومی)^۱، و معیار گسل از سازمان نقشه‌برداری کل کشور تهیه شدند. در ادامه، با استفاده از ابزارهای مکانی متناسب با هر معیار، نقشه آن در محیط ArcGIS تهیه شد. در شکل ۳ معیارهای مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.



شکل ۳. معیارهای مورد استفاده در این تحقیق

روش تحقیق

در این مطالعه جهت تهیه نقشه آسیب پذیری مناطق شهری در برابر زلزله شش مرحله اصلی به ترتیب طی شد (شکل ۴):



شکل ۴. فرایند روش تحقیق در این مطالعه

مرحله اول. با استفاده از نظر کارشناسان و پیشینه تحقیق معیارهای مهم و مؤثر جهت تعیین آسیب پذیری مناطق شهری در برابر زلزله شناسایی شدند. بعد از جمع‌آوری معیارها بر اساس مدل مقایسات زوجی پرسشنامه‌ای جهت وزندهی معیارها در اختیار کارشناسان و متخصصان مربوطه قرار گرفت.

مرحله دوم. با به کارگیری مجموعه ابزارهای آنالیز مکانی GIS برای معیارهای مورد استفاده لایه‌های اطلاعاتی به صورت نقشه‌های GIS تهیه شد. سپس لایه‌های GIS به این معیارها اختصاص داده شدند.

مرحله سوم. با استفاده از نظرات کارشناسان و با به کارگیری روش وزن‌دهی ANP وزن هر یک از لایه‌ها و معیارها محاسبه شد.

مرحله چهارم. جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت در وزن معیارها از توابع Fuzzy استفاده شد. مرحله پنجم. با تلفیق نقشه‌های معیار با استفاده از مدل OWA نقشه آسیب‌پذیری مناطق شهری در برابر زلزله در درجات خطر مختلف تهیه شد.

مرحله ششم. با استفاده از روش تحلیل حساسیت OAT تأثیرگذاری هر یک از معیارها بر نتایج نقشه آسیب‌پذیری مناطق شهری در برابر زلزله بر مبنای تغییر وزن هر معیار و تحلیل تغییر آسیب‌پذیری ناشی از آن بررسی شد.

روش فرایند تحلیل شبکه‌ای

وزن هر معیار نشان‌دهنده درجه اهمیت آن معیار در تصمیم‌گیری نهایی است. با تغییر وزن معیار درجه اهمیت آن معیار در تصمیم‌گیری تغییر می‌کند. به دلیل عدم توانایی AHP در لحاظ کردن وابستگی‌های بین شاخص‌ها و گزینه‌ها، ساعتی در سال ۱۹۹۶ رویکرد ANP را معرفی کرد. مزیت این رویکرد در مقایسه با AHP این است که عناصر مؤثر در تصمیم‌گیری را در نظر می‌گیرد. مراحل مدل ANP بدین شرح است (Saaty 1996):

۱. ساختن نمودار شبکه‌ای پژوهش: در این گام باید مسئله را به سطوح معیار و در صورت وجود زیرمعیار و گزینه تقسیم و روابط بین آن‌ها را تعیین کرد.

۲. تشکیل ماتریس مقایسات زوجی: در این مرحله عناصر هر سطح نسبت به سایر عناصر مربوط خود در سطح بالاتر به صورت زوجی مقایسه و ماتریس‌های مقایسات زوجی تشکیل می‌شوند. همچنین، در انتها باید مقایسه زوجی روابط درونی نیز تشکیل شود. این مقایسات زوجی باید با طیف نُه‌تایی ساعتی پاسخ داده شود.

۳. محاسبه میزان ناسازگاری: در این گام میزان ناسازگاری ANP محاسبه می‌شود. چنانچه این میزان از ۰٫۱ کمتر باشد نشان‌دهنده سازگاری ماتریس است.
۴. تشکیل سوپرماتریس اولیه: با استفاده از وزن مقیاسات زوجی به‌دست‌آمده سوپرماتریس اولیه تشکیل می‌شود. سوپرماتریس اولیه همان وزن‌هایی است که در مرحله دوم مقیاسات زوجی حاصل شد.
۵. ایجاد سوپرماتریس موزون: بعد از ایجاد سوپرماتریس اولیه، باید سوپرماتریس موزون ایجاد شود.
۶. ایجاد سوپرماتریس حدی: سوپرماتریس موزون را باید به توان بی‌نهایت رساند تا هر سطر آن به عددی همگرا شود و آن عدد وزن آن معیار یا زیرمعیار یا گزینه است.

فازی‌سازی

تصمیم‌گیری جزء جدایی‌ناپذیر عملکرد مدیریت است که بر داده‌ها و روابط منطقی حاکم بر محیط تصمیم‌گیری مبتنی است. حال آنکه در غالب شرایط عدم قطعیت در این مبناها اجتناب‌ناپذیر است (Castillo et al. 2016: 262). عدم دسترسی به منابع دقیق داده‌ها، عدم امکان اندازه‌گیری داده‌ها، و هزینه غالباً توجه‌ناپذیر در کسب دقیق داده‌ها را می‌توان از دلایل مهم لزوم به‌کارگیری داده‌های غیردقیق در بسیاری از شرایط برشمرد. به شکل مشابه، کشف روابط منطقی حاکم بر محیط تصمیم‌گیری نیز همواره امکان‌پذیر نیست (Bělohávek et al. 2010: 548). تخمین داده‌ها و روابط منطقی مورد نیاز ابتدایی‌ترین و رایج‌ترین راه‌حل در مواجهه با این شرایط عدم قطعیت و پیش‌برد فرایند تصمیم‌گیری است. هرچند این روش می‌تواند با خطای فراوان همراه باشد و به تصمیم‌گیری نامطلوب منجر شود، به دلیل سهولت، بیشترین استفاده را دارد (Nayak & Devulapalli 2015: 141). راه‌حل علمی‌تر در مواجهه با این مسئله، استفاده از تئوری احتمالات است که به‌خصوص از طریق روش‌های شبیه‌سازی در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی به کار گرفته می‌شود. لیکن دشواری این راهکار در لزوم کشف یا تخمین احتمالات مربوط به وقوع پیشامدهای امکان‌پذیر است. تشخیص دقیق این احتمالات در قریب به اتفاق شرایط عملی امکان‌پذیر نیست. از این رو، باید به آمار وقوع پیشامدهای مورد نظر مراجعه کرد که این آمار نیز همواره در اختیار نیست (Barros et al. 2016).

با هدف حل این مشکل در برخورد با شرایط عدم قطعیت، تئوری فازی شکل داده شده است. این تئوری را در سال ۱۹۶۵ پروفیسور لطفی‌زاده ابداع کرد. پایه این تئوری فرض مجموعه‌هایی است که

تعلق اجزا به آن‌ها نه به طور دقیق، بلکه به شکل مدرج قابل تعریف است. بر اساس این مجموعه‌ها، اعداد فازی را می‌توان تعریف و از آن‌ها برای اندازه‌گیری کمیت‌های غیردقیق استفاده کرد. این اعداد مبنای به‌کارگیری نوعی منطق تحت عنوان منطق فازی هستند که استدلال و نتیجه‌گیری در شرایط غیردقیق را امکان‌پذیر می‌سازند (Zadeh 2015: 9). در این مطالعه برای نرمال‌سازی ورودی‌های مدل از توابع فازی‌سازی استفاده شد. توابع فازی به بهبود مقیاس و توزیع داده‌ها کمک می‌کند.

روش OWA

در بسیاری از موارد به دلیل عدم پیش‌بینی دقیق اتفاقات آینده، عدم دسترسی به اطلاعات دقیق و قطعی، و عدم ارزیابی دقیق برخی از معیارها به‌ویژه معیارهای کیفی تصمیم‌گیری در فضای ریسک صورت می‌گیرد (Malczewski 2006: 715). در این محیط جواب نهایی متأثر از میزان ریسک‌پذیری و ریسک‌گریزی تصمیم‌گیرنده است. روش OWA به عنوان یکی از روش‌های تصمیم‌گیری، که قابلیت در نظر گرفتن اولویت‌ها و ارزیابی ذهنی تصمیم‌گیرنده را دارد، معرفی می‌شود. فرایند اتخاذ تصمیم نهایی در این روش بر اساس ریسک‌گریزی و ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرنده است (Afsari et al. 2022).

در این روش از دو نوع وزن استفاده می‌شود: وزن معیار و وزن مرتب‌شده. وزن‌های معیار نشان‌دهنده اهمیت نسبی هر یک از معیارهای ارزیابی‌اند (لایه‌ها و نقشه‌ها). اما وزن‌های ترتیبی بر اساس موقعیت مکانی سلول‌های لایه‌ها و نقشه‌ها اختصاص‌دهی می‌شوند. بدین معنا که همه سلول‌هایی که در یک موقعیت در چند معیار قرار گرفته‌اند دارای وزن‌های ترتیبی یکسان خواهند بود (Shorabeh et al. 2022). بنابراین، در یک نقشه همه سلول‌ها دارای یک وزن معیار مشترک‌اند، اما وزن ترتیبی آن‌ها متفاوت خواهد بود (Boloorani et al. 2021). مدل OWA به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$OWA_i = \sum_{j=1}^n \left(\frac{u_j v_j}{\sum_{j=1}^n u_j v_j} \right) z_{ij} \quad (1)$$

که در آن z_{ij} ارزش سلول i th مطابق با معیار j th، u_j وزن معیار j th مطابق با رابطه بین معیار j th و اولویت‌های تصمیم‌گیران، و v_j وزن ترتیبی است.

روش OWA شامل دو مشخصه درجه ORness یا ریسک‌پذیری و میزان مصالحه بین شاخص‌ها یا شاخص Trade off است که بیانگر رفتار عملگر OWA است (Malczewski & Rinner 2015). ریسک‌پذیری موقعیت OWA را بین روابط AND و OR نشان می‌دهد. این درجه بیانگر میزان تأکید تصمیم‌گیرنده بر مقادیر بهتر یا بدتر یک مجموعه از شاخص‌ها یا همان ریسک‌پذیری یا ریسک‌گریزی تصمیم‌گیرنده است (Ghajari et al. 2018) و میزان مصالحه میزان تبادل یا تأثیرپذیری یک شاخص از دیگر شاخص‌ها را نشان می‌دهد (Malczewski 2006: 716). مقدار ORness با رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$ORness = \sum_{j=1}^n \left(\frac{n-j}{n-1} \right) \lambda_j, \quad 1 \leq ORness \leq 0 \quad (2)$$

مقادیر پایین (۰) و بالای (۱) ORness به ترتیب نشان‌دهنده ریسک‌گریزی و ریسک‌پذیری سرمایه‌گذاران است؛ به عبارتی سناریوهای زیادی از نقشه‌های ریسک خیلی پایین تا خیلی بالا در اختیار مدیران برای شناسایی مناطق آسیب‌پذیر قرار می‌دهد (Shorabeh et al. 2019).

یافته‌های پژوهش

با توجه به نظرات کارشناسان خبره (شامل متخصصان مدیریت شهری، سیستم اطلاعات جغرافیایی، و مهندسی زلزله) و روش فرایند تحلیل شبکه‌ای وزن هر یک از معیارهای مورد استفاده مشخص شد (جدول ۱). مقادیر وزن معیارها بین ۰ تا ۱ است. مقدار ۰ نشان‌دهنده کمترین اهمیت و مقدار ۱ نشان‌دهنده اهمیت زیاد است. جمع مقادیر همه معیارها برابر ۱ است. در بین معیارهای انتخاب‌شده جهت تهیه نقشه آسیب‌پذیری زلزله، معیارهای تراکم جمعیت آسیب‌پذیر، تراکم جمعیت کل، و فاصله از گسل به ترتیب دارای بیشترین وزن و اهمیت و معیارهای شیب، ارتفاع، و فاصله از ایستگاه حمل‌ونقل عمومی به ترتیب دارای کمترین وزن و اهمیت بودند. معیارهای مؤثر در این مطالعه با نتایج مطالعات علی‌زاده و همکارانش (۲۰۱۸)، ابراهیمیان قاجاری و همکارانش (۲۰۱۷)، و نظام‌فر و همکارانش (۲۰۱۹) مطابقت دارد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده میزان سازگاری برای محاسبه وزن معیارها بر اساس نظرات کارشناسان کمتر از ۰/۱ است؛ که قابل قبول بودن و سازگاری نظرات کارشناسان را نشان می‌دهد.

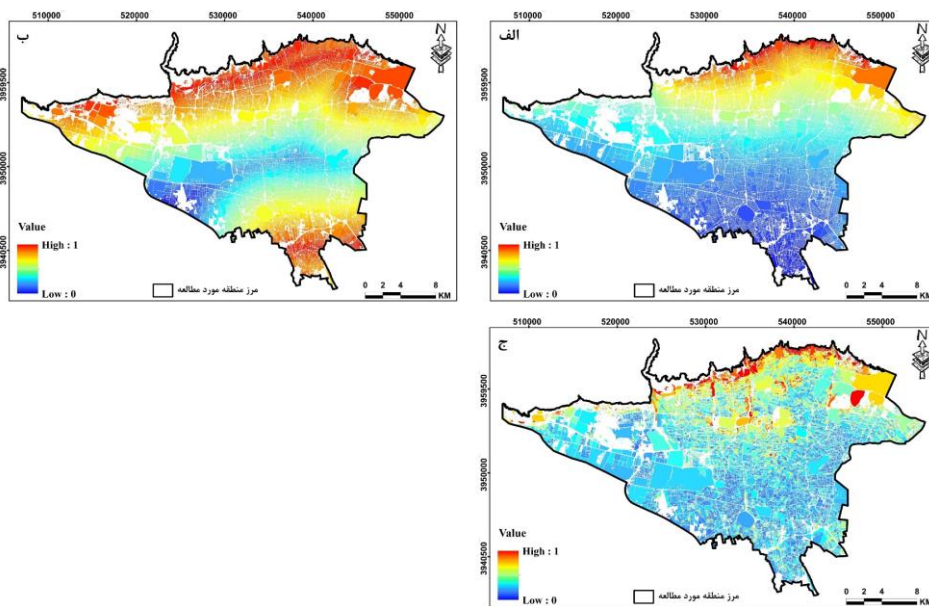
جدول ۱. وزن و توابع فازی برای معیارهای مورد استفاده در تحقیق

معیار	زیرمعیار	وزن	تابع فازی	نوع تأثیر
ظرفیت انطباق‌پذیری	فاصله از ایستگاه آتش‌نشانی	۰/۰۳۸۵۶	MSLarge	افزایشی
	فاصله از مراکز درمانی	۰/۰۷۳۳۸	MSLarge	افزایشی
	فاصله از داروخانه	۰/۰۵۹۲۳	MSLarge	افزایشی
	تراکم جمعیت باسواد	۰/۰۳۶۸۵	MSSmall	کاهشی
	تراکم جمعیت شاغل	۰/۰۳۲۵۵	MSSmall	کاهشی
	فاصله از جاده اصلی	۰/۰۴۳۶۹	MSLarge	افزایشی
	فاصله از ایستگاه حمل‌ونقل عمومی	۰/۰۲۹۹۲	MSLarge	افزایشی
در معرض قرار گرفتن	ارتفاع	۰/۰۲۵۵۵	MSLarge	افزایشی
	فاصله از گسل	۰/۱۰۳۵۶	MSSmall	کاهشی
	شیب	۰/۰۲۱۳۶	MSLarge	افزایشی
حساسیت	نوع اسکلت	۰/۰۹۸۵۲	MSLarge	افزایشی
	نوع مصالح	۰/۰۹۲۳۴	MSLarge	افزایشی
	فاصله از ایستگاه سوخت	۰/۰۴۷۳۶	MSSmall	کاهشی
	تراکم جمعیت آسیب‌پذیر	۰/۱۲۹۳۲	MSLarge	افزایشی
	تراکم جمعیت کل	۰/۱۱۶۵۳	MSLarge	افزایشی
	فاصله از خطوط انتقال نیرو	۰/۰۵۱۲۸	MSSmall	کاهشی

متناسب با هر معیار با استفاده از تحلیل‌های مکانی نقشه معیارهای مختلف تهیه شد. معیارها در سه گروه در معرض قرار گرفتن، حساسیت، و ظرفیت انطباق‌پذیری قرار گرفتند. با توجه به اینکه مطالعه در سطح بلوک‌های شهری است، در معیارهای از نوع فاصله، مانند فاصله از مراکز درمانی، و معیارهای ارتفاع و شیب جهت یکسان‌سازی سطح مطالعه برای هر بلوک شهری از مقدار میانگین هر بلوک استفاده شد.

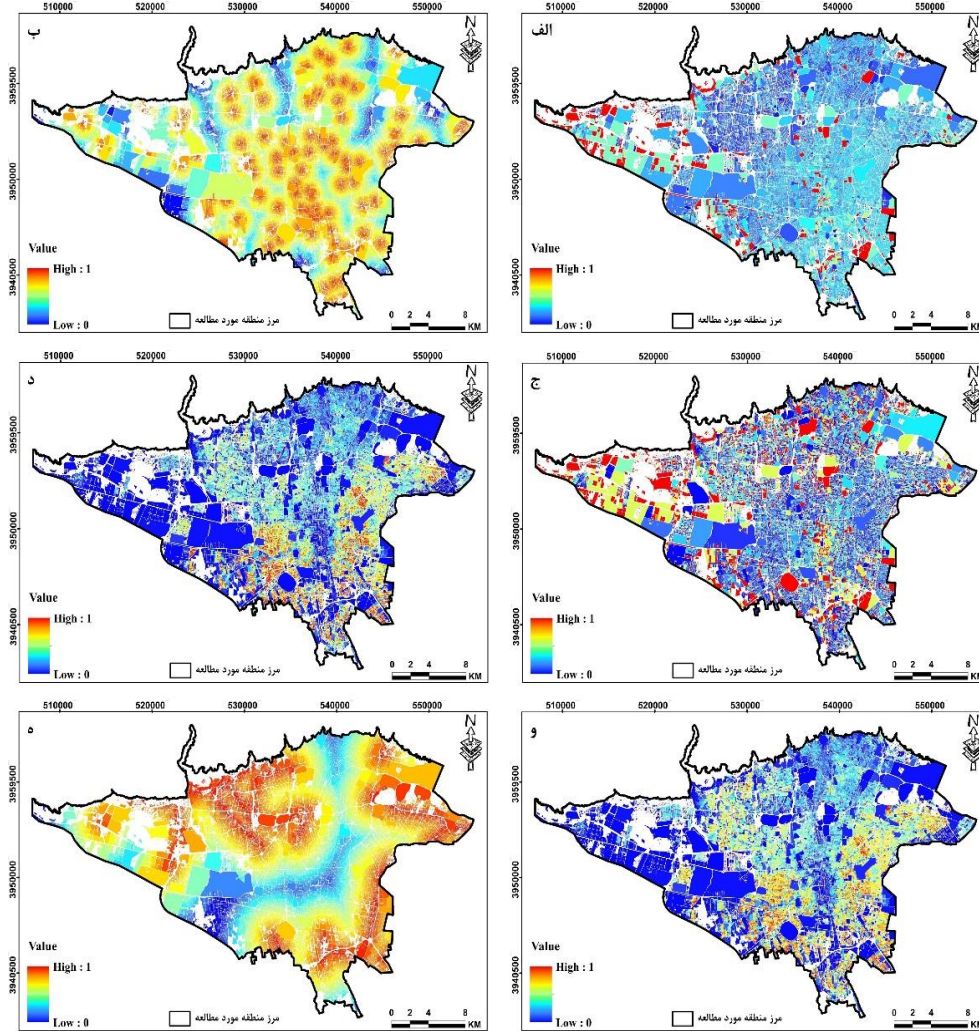
بعد از اینکه مجموعه معیارهای مؤثر جهت تهیه نقشه آسیب‌پذیری زلزله انتخاب شدند، هر معیار به منزله یک نقشه GIS در پایگاه داده مکانی ذخیره شد (شکل ۵، ۶، ۷). برای ارزیابی همه معیارها با هم نیاز به تبدیل لایه‌ها به واحدهای قابل مقایسه است (Shorabeh et al. 2019). از آنجا که در برخی معیارها مقادیر «ماکزیمم» و در برخی مقادیر «مینیمم» جهت تهیه نقشه آسیب‌پذیری زلزله دارای اهمیت بیشتر است، در این مطالعه از توابع فازی استفاده شد. معیارها به دو دسته

معیارهای سود (معیارهایی که مقدار ماکزیمم آن‌ها نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالاست) و معیارهای هزینه (معیارهایی که مقدار مینیمم آن‌ها نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالاست) تقسیم شدند. مقدار ۰ نشان‌دهنده آسیب‌پذیری خیلی پایین و مقدار ۱ نشان‌دهنده آسیب‌پذیری خیلی بالاست. مناطق دارای آسیب‌پذیری بالا در هر معیار متفاوت است. این ویژگی معیارها نشان می‌دهد که هر منطقه از لحاظ ویژگی خاصی آسیب‌پذیر است. در نهایت مناطقی به عنوان مناطق با آسیب‌پذیری خیلی بالا انتخاب می‌شوند که در همه معیارها دارای بیشترین مقادیر باشند. مثلاً، در نقشه معیار میانگین ارتفاع و شیب مناطق شمال و شمال شرقی به دلیل اینکه نزدیک به رشته کوه البرز هستند ارتفاع و شیب بالا دارند که نشان‌دهنده آسیب‌پذیر بودن این مناطق نسبت به سایر مناطق است. همچنین، نقشه معیار میانگین تراکم جمعیت نشان می‌دهد که مناطق مرکزی به دلیل تراکم فعالیت‌های خدماتی و تجاری دارای تراکم بالایی هستند که نشان‌دهنده آسیب‌پذیر بودن این منطقه نسبت به سایر مناطق است.

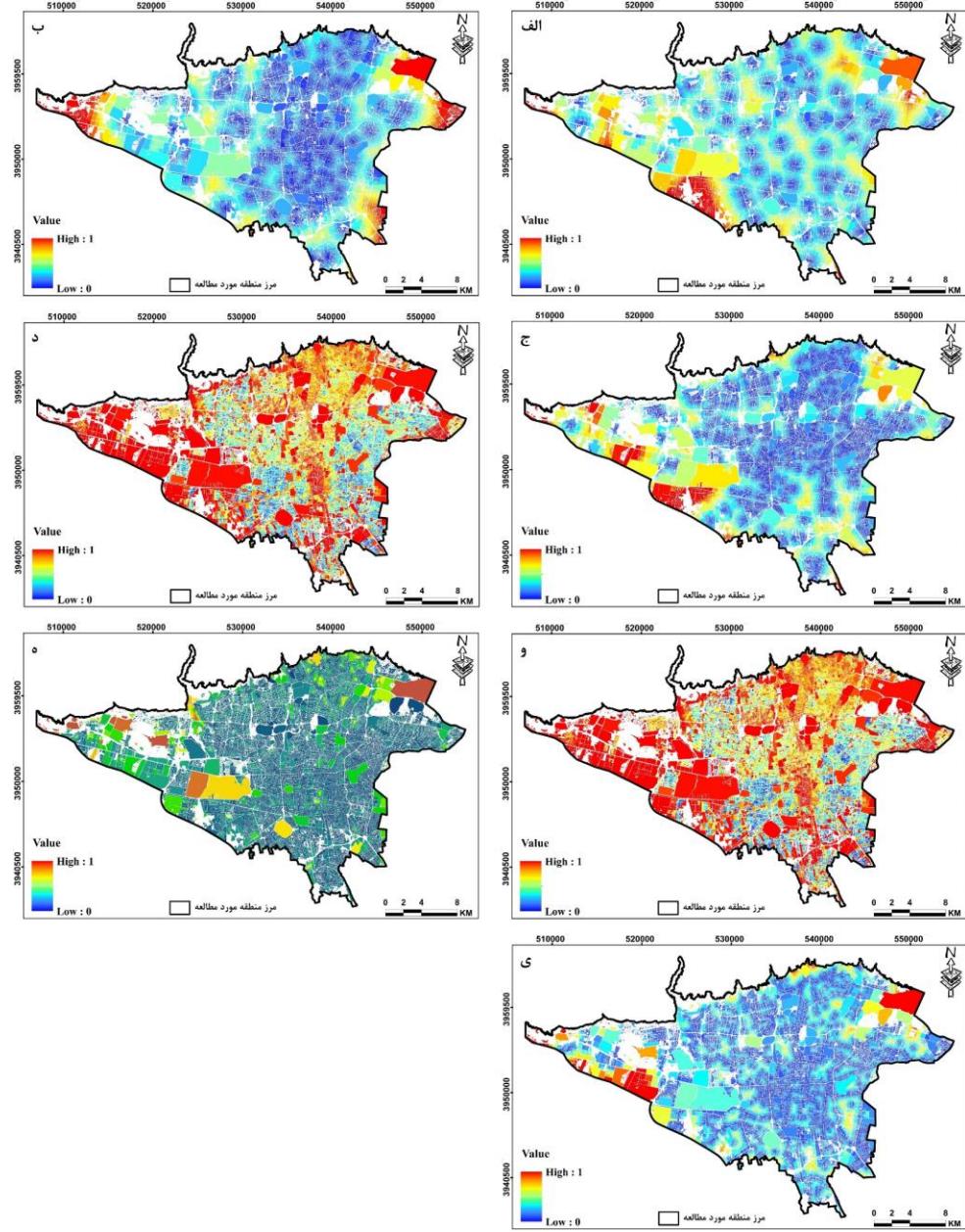


شکل ۵. نقشه معیارهای فازی‌سازی‌شده در معرض قرار گرفتن: الف) میانگین ارتفاع؛ ب) میانگین فاصله از گسل؛ ج)

میانگین شیب

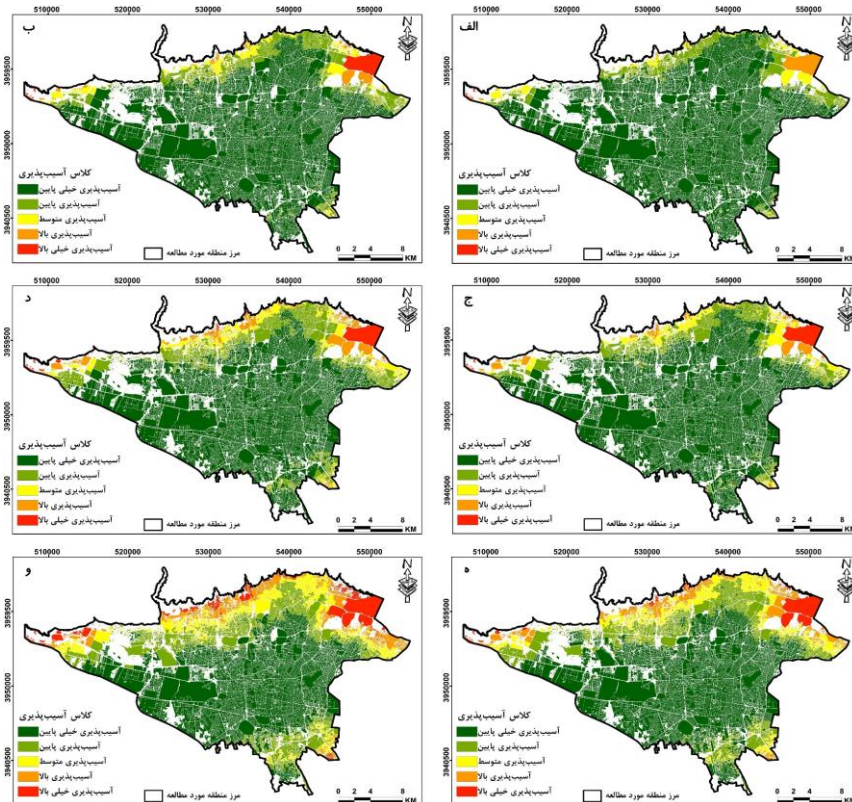


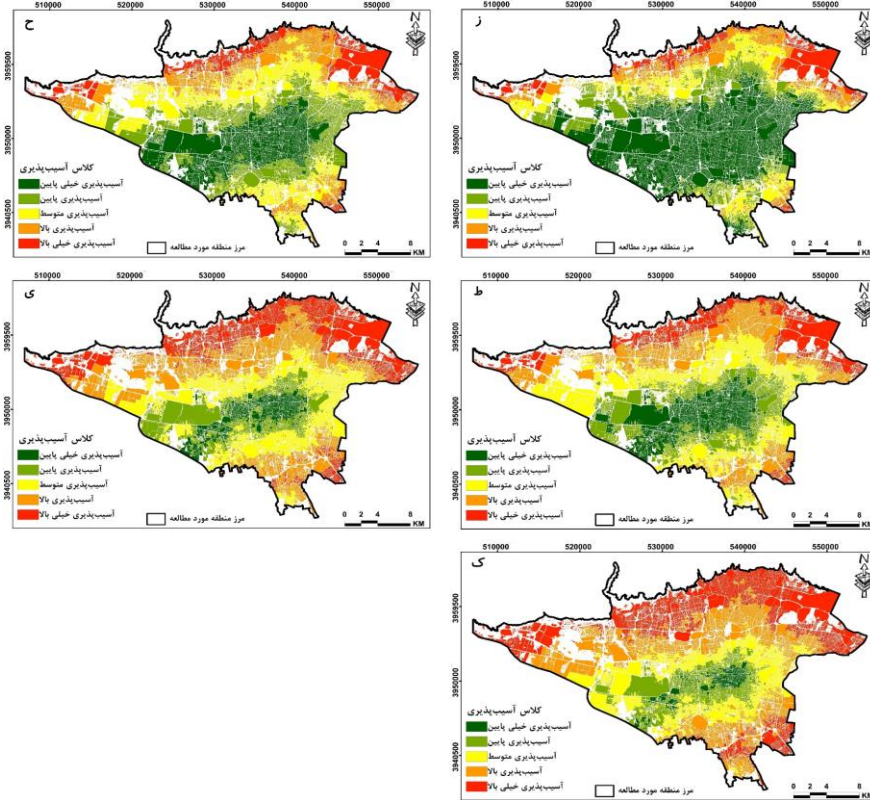
شکل ۶. نقشه معیارهای فازی سازی شده حساسیت: الف) نوع اسکلت؛ ب) میانگین فاصله از جایگاه سوخت؛ ج) نوع مصالح؛ د) میانگین تراکم جمعیت آسیب پذیر؛ و) میانگین تراکم کل جمعیت؛ ه) میانگین فاصله از خطوط انتقال نیرو



شکل ۷. نقشه معیارهای فازی سازی شده ظرفیت انطباق پذیری: الف) میانگین فاصله از ایستگاه آتش نشانی؛ ب) میانگین فاصله از مراکز درمانی؛ ج) میانگین فاصله از رودخانه؛ د) میانگین تراکم جمعیت باسواد؛ و) میانگین تراکم جمعیت شاغل؛ ه) میانگین فاصله از جاده اصلی؛ ی) میانگین فاصله از ایستگاه حمل و نقل عمومی

بعد از اینکه نقشه معیارها با استفاده از توابع فازی نرمال‌سازی شدند، نقشه معیارهای نرمال‌شده همراه وزن معیارها به عنوان ورودی مدل OWA معرفی شدند (شکل ۸). نقشه‌های آسیب‌پذیری در درجات ریسک مختلف (۱۱ سناریو) تهیه شدند. نتایج نشان داد هر چه مقدار ORness بیشتر می‌شود مقدار ریسک‌پذیری در تصمیم‌گیری افزایش می‌یابد. قابلیت OWA در این است که در سناریوهای مختلف امکان تصمیم‌گیری وجود دارد. به عبارتی در $OR_{ness}=0$ شرایط بسیار بدبینانه‌ای در منطقه مورد مطالعه وجود دارد؛ بدین معنی که مناطقی در کلاس آسیب‌پذیری بالا قرار می‌گیرند که در همه معیارها دارای شرایط نامساعدی باشند. اما در $OR_{ness}=1$ شرایط بسیار خوش‌بینانه در نظر گرفته می‌شود؛ به صورتی که مساحت قابل توجهی از منطقه مورد مطالعه در کلاس با آسیب‌پذیری بالا قرار می‌گیرد.





شکل ۸. نقشه‌های آسیب‌پذیری ناشی از زلزله در بلوک‌های شهری: الف) $OR_{ness}=0$ ؛ ب) $OR_{ness}=0.1$ ؛ ج) $OR_{ness}=0.2$ ؛ د) $OR_{ness}=0.3$ ؛ ه) $OR_{ness}=0.4$ ؛ و) $OR_{ness}=0.5$ ؛ ز) $OR_{ness}=0.6$ ؛ ح) $OR_{ness}=0.7$ ؛ ط) $OR_{ness}=0.8$ ؛ ی) $OR_{ness}=0.9$ ؛ ک) $OR_{ness}=1$

نقشه‌های آسیب‌پذیری در ۱۱ سناریو نشان می‌دهد عمده مناطق آسیب‌پذیر در قسمت‌های شمالی محدوده مورد مطالعه قرار دارند؛ به صورتی که این مناطق از $OR_{ness}=0$ به $OR_{ness}=1$ از سمت شرق به غرب افزایش می‌یابد. همچنین، از $OR_{ness}=0.7$ به بالا قسمت‌هایی از جنوب محدوده مورد مطالعه در کلاس با آسیب‌پذیری بالا قرار می‌گیرد. نزدیکی این مناطق به خطوط گسل از دلایل مهم آسیب‌پذیری آنهاست. نقشه آسیب‌پذیری تهیه شده در این مطالعه با نتایج کار مرادی و همکارانش (۲۰۱۵) مقایسه شد. نقشه آسیب‌پذیری که مرادی و همکارانش (۲۰۱۵) تهیه کردند مناطق آسیب‌پذیر در مطالعه حاضر را پوشش می‌دهد که این مناطق آسیب‌پذیر (شکل ۸) غالباً در کلاس‌های با آسیب‌پذیری خیلی بالا و بالا قرار گرفته‌اند.

با تحلیل نتایج (جدول ۲) می‌توان به این نتیجه رسید که درجه آسیب‌پذیری ناشی از زلزله با افزایش درجه ریسک‌پذیری افزایش می‌یابد. درجه ریسک‌پذیری همان میزان نزدیکی عملگر OWA به عملگر OR است. با افزایش تدریجی درجه ریسک‌پذیری تعداد پیکسل‌هایی که در طبقه آسیب‌پذیری «خیلی کم» هستند کمتر و تعداد پیکسل‌هایی که در طبقه آسیب‌پذیری «خیلی زیاد» هستند بیشتر می‌شود. به عبارتی، در سناریوی بسیار ریسک‌گریز ($ORness=0$) مساحت طبقه با آسیب‌پذیری خیلی بالا ۰/۱۶ درصد از کل منطقه مورد مطالعه و در سناریوی بسیار ریسک‌پذیر ($ORness=1$) مساحت طبقه با آسیب‌پذیری خیلی بالا ۳۴/۰۷ درصد از کل منطقه مورد مطالعه است. روش OWA در مطالعات متعدد (شورابه و همکاران ۲۰۲۲؛ رضوانی و همکاران ۲۰۲۲) مورد استفاده قرار گرفته است که با نتایج این مطالعه مطابقت کامل دارند. زیرا در حالت اول (ریسک‌گریز) مناطقی به عنوان آسیب‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند که همه پیکسل‌های آن در همه معیارها دارای ارزش و جامعیت بالایی هستند. مدیران و برنامه‌ریزان ریسک‌گریز در زمینه برنامه‌ریزی در طرح‌های مربوط به کاهش آسیب‌پذیری ناشی از زلزله بیشتر به دنبال مناطقی برای تخصیص اعتبار هستند که در این مناطق همه معیارهای مؤثر در بهترین حالت ممکن باشند. اما در حالت دوم (ریسک‌پذیری) پیکسل‌هایی که با احتمال خیلی پایین آسیب‌پذیر خواهند بود به عنوان مناطق آسیب‌پذیر انتخاب می‌شوند. این حالت را زمانی که مدیران و برنامه‌ریزان از لحاظ اقتصادی و زمانی محدودیتی نداشته باشند می‌توان استفاده کرد.

جدول ۲. درصد مساحت طبقات مختلف در هر سناریو

آسیب‌پذیری خیلی پایین	آسیب‌پذیری پایین	آسیب‌پذیری متوسط	آسیب‌پذیری بالا	آسیب‌پذیری خیلی بالا	
۸۵/۶۶	۹/۰۷	۲/۷۸	۲/۳۳	۰/۱۶	$ORness=0$
۸۰/۵۹	۱۱/۵۳	۳/۸۶	۱/۶۹	۲/۳۲	$ORness=0.1$
۷۷/۶۷	۱۲/۳۴	۴/۹۷	۲/۶۶	۲/۳۶	$ORness=0.2$
۷۱/۷۰	۱۵/۵۷	۵/۶۴	۴/۵۰	۲/۵۸	$ORness=0.3$
۶۱/۳۶	۱۹/۲۳	۹/۱۲	۶/۴۶	۳/۸۳	$ORness=0.4$
۵۵/۳۵	۱۹/۷۸	۱۱/۰۱	۷/۳۲	۶/۵۳	$ORness=0.5$
۴۶/۴۹	۱۷/۵۰	۱۳/۶۸	۱۱/۸۱	۱۰/۵۲	$ORness=0.6$
۲۳/۵۵	۲۲/۹۴	۲۲/۴۹	۱۷/۴۴	۱۳/۵۷	$ORness=0.7$
۱۶/۰۵	۱۸/۳۱	۲۵/۳۷	۲۳/۵۴	۱۶/۷۴	$ORness=0.8$
۷/۱۶	۱۵/۱۵	۲۳/۶۹	۲۷/۸۳	۲۶/۱۷	$ORness=0.9$
۳/۱۹	۱۲/۸۶	۲۰/۵۱	۲۹/۳۸	۳۴/۰۷	$ORness=1$

یکی از فاکتورهای مهم در اکثر روش‌های آنالیز حساسیت مربوط به مدل‌سازی چندمعیاره مبتنی بر GIS بررسی تأثیر تغییر وزن معیارها بر خروجی مدل تصمیم‌گیری است (Delgado & Sendra 2004). آنالیز حساسیت وزن معیارها به صورت عمومی با استفاده از روش یک بار در یک زمان (OAT) بررسی می‌شود (Chen et al. 2011). بر اساس تجزیه و آنالیز حساسیت، اگر تغییر وزن منجر به تغییر عمده در نتایج خروجی نشود، نتایج مدل پایدارتر است و خطاها در برآورد وزن‌های متغیر قابل چشم‌پوشی هستند (Hamby 1993). علاوه بر این، اگر تحلیل به یک یا چند وزن متغیر حساس باشد، خروجی‌های مدل تا حد زیادی به قضاوت ذهنی وزن‌ها وابسته خواهد بود و باید به طور دقیق تخمین زده شود (Sadeghi-Niaraki et al. 2011).

نتایج آنالیز حساسیت در جدول ۳ نشان داد مساحت طبقه با آسیب‌پذیری خیلی بالا در ۱۱ سناریو ANP-OWA به‌رغم درصد تغییر ± 20 درصد در همه پارامترهای ورودی یکسان‌اند یا اندکی تغییر کرده‌اند. بین سناریوهای مختلف بیشترین تغییرات در $OR_{ness} = 0.5$ اتفاق افتاده است.

جدول ۳. درصد مساحت بلوک‌های شهری با آسیب‌پذیری خیلی بالا

+۲۰	مساحت مبنا	-۲۰	
۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	$OR_{ness} = 0$
۳/۲۹	۲/۳۲	۲/۳۵	$OR_{ness} = 0.1$
۲/۳۷	۲/۳۶	۲/۳۷	$OR_{ness} = 0.2$
۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۶۰	$OR_{ness} = 0.3$
۳/۸۰	۳/۸۳	۳/۸۱	$OR_{ness} = 0.4$
۶/۴۳	۶/۵۳	۶/۵۹	$OR_{ness} = 0.5$
۱۰/۵۴	۱۰/۵۲	۱۰/۵۱	$OR_{ness} = 0.6$
۱۳/۵۷	۱۳/۵۷	۱۳/۵۷	$OR_{ness} = 0.7$
۱۶/۷۷	۱۶/۷۴	۱۶/۷۷	$OR_{ness} = 0.8$
۲۶/۲۰	۲۶/۱۷	۲۶/۱۸	$OR_{ness} = 0.9$
۳۴/۰۶	۳۴/۰۷	۳۴/۰۳	$OR_{ness} = 1$

نتیجه

به‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر در مقاوم‌سازی ساختمان‌های شهری و افزایش دانش و توانایی متخصصان در کنترل بلایای طبیعی، زلزله پدیده‌ای طبیعی است که باعث ایجاد مخاطرات طبیعی می‌شود که به‌طور جدی مناطق شهری را تهدید می‌کند. ایران یکی از کشورهای زلزله‌خیز جهان است. بنابراین هدف از این مطالعه بررسی آسیب‌پذیری بلوک‌های شهری ناشی از زلزله در شهر تهران بود. نتایج نشان داد بین معیارهای مورد استفاده معیارهای تراکم جمعیت آسیب‌پذیر و شیب به ترتیب دارای بالاترین و کمترین اهمیت در تهیه نقشه آسیب‌پذیری ناشی از زلزله هستند. نقشه‌های آسیب‌پذیری در محدوده مورد مطالعه نشان داد در خوش‌بینانه‌ترین سناریو (حداقل ریسک) حدود ۳۴ درصد از مساحت کلان‌شهر تهران در برابر خطر بالقوه بسیار آسیب‌پذیر است. بدیهی است اگر قرار باشد آمادگی بهینه برای کاهش خطرات بلایا فراهم شود، بدبینانه‌ترین سناریو (بالاترین خطر) باید در نظر گرفته شود. همچنین، نتایج تحلیل حساسیت نشان داد با تغییر وزن معیارها تغییرات اندکی در مساحت کلاس با آسیب‌پذیری خیلی بالا ایجاد می‌شود.

مدل OWA با انعطاف‌پذیری بسیار بالا در ترکیب ورودی‌های مختلف امکان دستیابی به نتایج یک تصمیم‌گیری مکانی در درجات ریسک مختلف را فراهم می‌کند. درجات ریسک مختلف در تصمیم‌گیری شامل یک زنجیره پیوسته از تصمیم‌گیری خیلی بدبینانه تا خیلی خوش‌بینانه است. در این زنجیره پیوسته، با افزایش درجه خوش‌بینی در تصمیم‌گیری، درصد ریسک در تصمیم‌گیری افزایش می‌یابد. یک تصمیم‌گیرنده ریسک‌گریز شرایط بسیار سخت را در تصمیم‌گیری لحاظ می‌کند. بنابراین بین گزینه‌های مختلف گزینه‌ای را انتخاب می‌کند که از نظر معیارهای مختلف شرایط ایده‌آلی داشته باشد. به همین دلیل تعداد گزینه‌های مناسب در این حالت محدودند؛ برای تصمیم‌گیر ریسک‌پذیر برعکس.

نقشه‌های آسیب‌پذیری (نتایج این تحقیق) یکی از ابزارهای ضروری در ارائه راهکارهای کاهش آسیب‌پذیری هستند. از جمله کاربردهای دیگر نقشه‌های آسیب‌پذیری می‌توان به استفاده از آن در طرح‌های آمایش سرزمین، مکان‌یابی کاربری‌ها، تغییر کاربری‌ها، و تعیین سرانه کاربری‌ها اشاره کرد. همچنین، بدون استفاده از نقشه‌های آسیب‌پذیری در طراحی و برنامه‌ریزی‌های شهری

تسهیل مدیریت بحران شهری، تأمین امنیت و سلامت جامعه، و در نتیجه کاهش هزینه‌های کشور امکان‌پذیر نیست. هم‌سو با یافته‌های پژوهش، اجرای پیشنهادهای زیر می‌تواند در ارتقای ایمنی و کاهش خسارات ناشی از زلزله در شهرداری تهران مؤثر واقع شود:

- پیشگیری و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله در جامعه و افزایش ضریب ایمنی در ساخت‌وسازهای جدید؛
- ایجاد مدیریت و سازماندهی لازم برای آمادگی و مقابله و اقدام مؤثر جهت کاهش خطر ناشی از سوانح طبیعی و ایجاد فرماندهی واحد بحران تا پایان دوره بحران؛
- مشارکت مردم در اقدامات و آمادگی و ایمن‌سازی در مقابله با سوانح طبیعی؛
- نقشه‌ها و طرح‌های تخلیه محلات و مناطق شهری و محل اسکان موقت شهروندان هنگام بروز سانحه باید از پیش مشخص و امکانات لازم به آن‌ها اختصاص داده شود.

منابع

- حیدری فر، محمدرئوف؛ عبدالله محمودی (۱۴۰۰). «تحلیل آسیب‌پذیری کاربری اراضی شهری جوان‌رود در برابر زلزله با استفاده از تحلیل شبکه‌ای و سیستم اطلاعات جغرافیایی»، پژوهش‌های جغرافیایی انسانی، د ۵۳، ش ۱، ص ۱۱۹ - ۱۳۷.
- خدمت‌زاده، علی؛ میرنجف موسوی؛ اردشیر یوسف‌زاده (۱۴۰۰). «تحلیل شاخص‌های آسیب‌پذیری شهری با رویکرد مدیریت بحران زلزله (مطالعه موردی: شهر ارومیه)»، مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی، د ۱۶، ش ۱، ص ۴۳ - ۶۲.

References

- Adger, W. N. (1999). "Social vulnerability to climate change and extremes in coastal Vietnam", *World development*, 27(2), pp. 249-269.
- Adger, W. N. & Kelly, P. M. (1999). "Social vulnerability to climate change and the architecture of entitlements", *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 4(3), pp. 253-266.
- Afsari, R., Nadizadeh Shorabeh, S., Kouhnavard, M., Homae, M., & Arsanjani, J. J. (2022). "A Spatial Decision Support Approach for Flood Vulnerability Analysis in Urban Areas: A Case Study of Tehran", *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(7), 380.
- Alam, M. S. & Haque, S. M. (2022). "Multi-dimensional earthquake vulnerability assessment of residential neighborhoods of Mymensingh City, Bangladesh: A spatial multi-criteria analysis based approach", *Journal of Urban Management*, 11(1), pp. 37-58.
- Alizadeh, M., Hashim, M., Alizadeh, E., Shahabi, H., Karami, M. R., Beiranvand Pour, A., ... & Zabihi, H. (2018). "Multi-criteria decision making (MCDM) model for seismic vulnerability assessment (SVA) of urban residential buildings", *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(11), 444.
- Alwang, J., Siegel, P. B., & Jorgensen, S. L. (2001). *Vulnerability: a view from different disciplines* (Vol. 115, p. 60). Social protection discussion paper series.
- Antypa, N., Verkuil, B., Molendijk, M., Schoevers, R., Penninx, B. W., & Van Der Does, W. (2017). "Associations between chronotypes and psychological vulnerability factors of depression", *Chronobiology international*, 34(8), pp. 1125-1135.
- Ashtari, M., Hatzfeld, D., & Kamalian, N. (2005). "Microseismicity in the region of Tehran", *Tectonophysics*, 395(3-4), pp. 193-208.
- Barbat, A. H., Carreño, M. L., Pujades, L. G., Lantada, N., Cardona, O. D., & Marulanda, M. C. (2010). "Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to a pilot area", *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1-2), pp. 17-38.
- Belohlavek, R., De Baets, B., Outrata, J., & Vychodil, V. (2010). "Computing the lattice of all fixpoints of a fuzzy closure operator", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 18(3),

- pp. 546-557.
- Bolorani, A. D., Shorabeh, S. N., Samany, N. N., Mousivand, A., Kazemi, Y., Jaafarzadeh, N., ... & Rabiei, J. (2021). "Vulnerability mapping and risk analysis of sand and dust storms in Ahvaz, IRAN", *Environmental Pollution*, 279, 116859.
- Brooks, N. (2003). "Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework", *Tyndall Centre for climate change research working paper*, 38(38), pp. 1-16.
- Castillo, O., Amador-Angulo, L., Castro, J. R., & Garcia-Valdez, M. (2016). "A comparative study of type-1 fuzzy logic systems, interval type-2 fuzzy logic systems and generalized type-2 fuzzy logic systems in control problems", *Information Sciences*, 354, pp. 257-274.
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). EM-DAT. The International Disaster Database, Available online: <https://www.emdat.be/> (accessed on 1 April 2020).
- Chen, H., Wood, M. D., Linstead, C., & Maltby, E. (2011). "Uncertainty analysis in a GIS-based multi-criteria analysis tool for river catchment management", *Environmental modelling & software*, 26(4), pp. 395-405.
- Cinner, J. E., McClanahan, T. R., Graham, N. A., Daw, T. M., Maina, J., Stead, S. M., ... & Bodin, Ö. (2012). "Vulnerability of coastal communities to key impacts of climate change on coral reef fisheries", *Global Environmental Change*, 22(1), pp. 12-20.
- Cruz-Milán, O., Simpson, J. J., Simpson, P. M., & Choi, W. (2016). "Reassurance or reason for concern: Security forces as a crisis management strategy", *Tourism Management*, 56, pp. 114-125.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2012). "Social vulnerability to environmental hazards", In *Hazards vulnerability and environmental justice* (pp. 143-160). Routledge.
- Cutter, S. L., Emrich, C. T., Webb, J. J., & Morath, D. (2009). "Social vulnerability to climate variability hazards: A review of the literature", *Final Report to Oxfam America*, 5, pp. 1-44.
- De Barros, L. C., Bassanezi, R. C., & Lodwick, W. A. (2016). *First Course in Fuzzy Logic, Fuzzy Dynamical Systems, and Biomathematics*, Springer-Verlag Berlin An.
- 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.
- Delgado, M. G. & Sendra, J. B. (2004). "Sensitivity analysis in multicriteria spatial decision-making: a review", *Human and ecological risk assessment*, 10(6), pp. 1173-1187.
- Dow, K. (1992). "Exploring differences in our common future (s): the meaning of vulnerability to global environmental change", *Geoforum*, 23(3), pp. 417-436.
- Downing, T. E., Patwardhan, A., Klien, R., Mukhala, E., Stephen, L., Winograd, M., & Ziervogel, G. (2003). "Vulnerability assessment for climate adaptation", *APF technical paper*, 3.
- Ebrahimian Ghajari, Y., Alesheikh, A. A., Modiri, M., Hosnavi, R., & Abbasi, M. (2017). "Spatial modelling of urban physical vulnerability to explosion hazards using GIS and fuzzy MCDA", *Sustainability*, 9(7), 1274.
- Fellmann, T. (2012). "The assessment of climate change-related vulnerability in the

- agricultural sector: reviewing conceptual frameworks”, *Building resilience for adaptation to climate change in the agriculture sector*, 23, 37.
- Firozjaei, M. K., Nematollahi, O., Mijani, N., Shorabeh, S. N., Firozjaei, H. K., & Toomanian, A. (2019). “An integrated GIS-based Ordered Weighted Averaging analysis for solar energy evaluation in Iran: Current conditions and future planning”, *Renewable Energy*, 136, pp. 1130-1146.
- Fuessel, H. M. (2005). Vulnerability in climate change research: A comprehensive conceptual framework.
- Füssel, H. M. (2007). “Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research”, *Global environmental change*, 17(2), pp. 155-167.
- Füssel, H. M. & Klein, R. J. (2006). “Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking”, *Climatic change*, 75(3), pp. 301-329.
- 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, pp. 102-114.
- Ghaychi Afrouz, S., Farzampour, A., Hejazi, Z., & Mojarab, M. (2021). “Evaluation of Seismic Vulnerability of Hospitals in the Tehran Metropolitan Area”, *Buildings*, 11(2), 54.
- Hamby, D. M. (1993). *A numerical comparison of sensitivity analysis techniques* (No. WSRC-MS-93-586), Westinghouse Savannah River Co., Aiken, SC (United States).
- Heydarifar, M.R. & Mahmoudi, A. (1400). “Vulnerability analysis of Javanroud urban land use against earthquakes using network analysis and geographic information system”, *Human Geography Research*, 53, Vol. 1, pp. 119-137. (in Persian)
- ISDR, U. (2004). “Living with risk”, *United Nation International Strategy for Disaster Reduction, United Nation-International Strategy for Disaster Risk Reduction*.
- Kamranzad, F., Memarian, H., & Zare, M. (2020). “Earthquake risk assessment for Tehran, Iran”, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), 430.
- Karimzadeh, S., Feizizadeh, B., & Matsuoka, M. (2017). “From a GIS-based hybrid site condition map to an earthquake damage assessment in Iran: Methods and trends”, *International journal of disaster risk reduction*, 22, pp. 23-36.
- Kelly, P. M. & Adger, W. N. (2000). “Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and Facilitating adaptation”, *Climatic change*, 47(4), pp. 325-352.
- Khedmt-zadeh, A., Mousavi, M.N., & Yusufzadeh, A. (1400). “Analysis of urban vulnerability indicators with the approach of earthquake crisis management (case study: Urmia city)”, *Human Settlements Planning Studies*, 16, Vol. 1, pp. 43-62. (in Persian)
- Kohn, N. A. (2014). “Vulnerability theory and the role of government”, *Yale JL & Feminism*, 26, 1.
- Leggieri, V., Mastrodonato, G., & Uva, G. (2022). “GIS Multisource Data for the Seismic Vulnerability Assessment of Buildings at the Urban Scale”, *Buildings*, 12(5), 523.
- Malczewski, J. (2006). “GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature”, *International journal of geographical information science*, 20(7), pp. 703-726.
- Malczewski, J. & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science* (Vol. 1, pp. 55-77). New York: Springer.

- Moradi, M., Delavar, M. R., & Moshiri, B. (2017). "A GIS-based multi-criteria analysis model for earthquake vulnerability assessment using Choquet integral and game theory", *Natural hazards*, 87(3), pp. 1377-1398.
- Moreno, A. & Becken, S. (2009). "A climate change vulnerability assessment methodology for coastal tourism", *Journal of Sustainable Tourism*, 17(4), pp. 473-488.
- Muris, P., Schmidt, H., Lambrichs, R., & Meesters, C. (2001). "Protective and vulnerability factors of depression in normal adolescents", *Behaviour research and therapy*, 39(5), pp. 555-565.
- Nayak, P. & Devulapalli, A. (2015). "A fuzzy logic-based clustering algorithm for WSN to extend the network lifetime", *IEEE sensors journal*, 16(1), pp. 137-144.
- Nazmfar, H., Saredeh, A., Eshgi, A., & Feizizadeh, B. (2019). "Vulnerability evaluation of urban buildings to various earthquake intensities: A case study of the municipal zone 9 of Tehran", *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25(1-2), pp. 455-474.
- OECD. Financial Management of Earthquake Risk; Organisation for Economic Co-operation and Development: Paris, France, 2018; Available online: <https://www.oecd.org/finance/insurance/Financial-management-of-earthquake-risk.pdf> (accessed on 24 July 2020).
- Omidvar, B., Gatmiri, B., & Derakhshan, S. (2012). "Experimental vulnerability curves for the residential buildings of Iran", *Natural Hazards*, 60(2), pp. 345-365.
- Pearce, T., Smit, B., Duerden, F., Ford, J. D., Goose, A., & Kataoyak, F. (2010). "Inuit vulnerability and adaptive capacity to climate change in Ulukhaktok, Northwest Territories, Canada", *Polar Record*, 46(2), pp. 157-177.
- Pearson, L. J., Nelson, R., Crimp, S., & Langridge, J. (2011). "Interpretive review of conceptual frameworks and research models that inform Australia's agricultural vulnerability to climate change", *Environmental Modelling & Software*, 26(2), pp. 113-123.
- Polsky, C., Neff, R., & Yarnal, B. (2007). "Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram", *Global environmental change*, 17(3-4), pp. 472-485.
- Pritchett, L., Suryahadi, A., & Sumarto, S. (2000). *Quantifying vulnerability to poverty: A proposed measure, applied to Indonesia* (No. 2437). World Bank Publications.
- Rezvani, M., Nickraves, F., Astaneh, A. D., & Kazemi, N. (2022). "A risk-based decision-making approach for identifying natural-based tourism potential areas", *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 37, 100485.
- Saaty, T. L. (1996). *Decision making with dependence and feedback: The analytic network process* (Vol. 4922, No. 2). Pittsburgh: RWS publications.
- Sadeghi-Niaraki, A., Varshosaz, M., Kim, K., & Jung, J. J. (2011). "Real world representation of a road network for route planning in GIS", *Expert systems with applications*, 38(10), pp. 11999-12008.
- Schröter, D., Polsky, C., & Patt, A. G. (2005). "Assessing vulnerabilities to the effects of global change: an eight step approach", *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 10(4), pp. 573-595.
- Shorabeh, S. N., Firozjaei, H. K., Firozjaei, M. K., Jelokhani-Niaraki, M., Homae, M., &

- Nematollahi, O. (2022). "The site selection of wind energy power plant using GIS-multi-criteria evaluation from economic perspectives", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112778.
- Shorabeh, S. N., Firozjaei, M. K., Nematollahi, O., Firozjaei, H. K., & Jelokhani-Niaraki, M. (2019). "A risk-based multi-criteria spatial decision analysis for solar power plant site selection in different climates: A case study in Iran", *Renewable Energy*, 143, pp. 958-973.
- Silva, V., Amo-Oduro, D., Calderon, A., Costa, C., Dabbeek, J., Despotaki, V., ... & Pittore, M. (2020). "Development of a global seismic risk model", *Earthquake Spectra*, 36(1_suppl), pp. 372-394.
- Singh, A. (2003). *Assessing Human Vulnerability to Environmental Change: Concepts, Issues, Methods, and Case Studies*. UNEP/Earthprint.
- Smit, B. & Wandel, J. (2006). "Adaptation, adaptive capacity and vulnerability", *Global environmental change*, 16(3), pp. 282-292.
- Swiss Reinsurance Company. SwissRe, Sigma Research. Natural Catastrophes 1990–2018. Available online: <https://sigma-explorer.com/> (accessed on 1 April 2020).
- Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., ... & Schiller, A. (2003). "A framework for vulnerability analysis in sustainability science", *Proceedings of the national academy of sciences*, 100(14), pp. 8074-8079.
- UNDP. (2004). *Reducing disaster risk: a challenge for development-a global report*, United Nations.
- Yariyan, P., Zabihi, H., Wolf, I. D., Karami, M., & Amiriyan, 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*, 50, 101705.
- Yavuz Kumlu, K. B. & Tüdeş, Ş. (2019). "Determination of earthquake-risky areas in Yalova City Center (Marmara region, Turkey) using GIS-based multicriteria decision-making techniques (analytical hierarchy process and technique for order preference by similarity to ideal solution)", *Natural Hazards*, 96(3), pp. 999-1018.
- Zadeh, L. A. (2015). "Fuzzy logic—a personal perspective", *Fuzzy sets and systems*, 281, pp. 4-20.
- Zakour, M. J. & Gillespie, D. F. (2013). "Vulnerability theory", In *Community disaster vulnerability* (pp. 17-35). Springer, New York, NY.
- Zhang, J. S. & Jia, Z. K. (2010). "The study on assessment index of urban social vulnerability to earthquake disaster", *Technol. Guide*, 36, pp. 12-14.