ASPI | Afarand Scholarly Publishing Institute; Turkey
ISSN: 2538-4384; Geographical Researches. 2024;39(3):387-398 10.58209/geores.39.3.387

Vulnerability of the Southern Areas of Tehran City to Earthquake Using Layer Overlay System

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Rezaeeparto K.[1]* *PhD*

How to cite this article
Rezaeeparto K. Vulnerability of the Southern Areas of Tehran City to Earthquake Using Layer Overlay System. Geographical Researches. 2024;39(3):387-398.

[1]Earth Science Research Division, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran

Correspondence
Address: Chogan Boulevard, Lashkari bypass, Sadra town, West of Azadi Complex Boulevard, Tehran, Iran. Postal Code: -
Phone: +98 (21) 48255349
Fax: +98 (21) 48255352
rezaeepartok@ripi.ir

Article History
Received: August 22, 2024
Accepted: October 26, 2024
ePublished: November 26, 2024

ABSTRACT

Aims This study aims to assess and map the vulnerability of southern Tehran districts to earthquakes.
Methodology The research, applied in nature, was conducted across the southern districts of Tehran (Districts 9 to 20). It followed a developmental approach in three phases. First, confirmatory factor analysis was utilized to develop vulnerability indices. In the second phase, a fuzzy Delphi technique was employed to prioritize these indices. Finally, the most impactful factors influencing urban fabric vulnerability were weighted and visualized as geospatial layers using ArcGIS software (Version 9.2). The vulnerability of the study area was then assessed by overlaying these layers, leading to the development of a final vulnerability map based on seismic-related physical indicators.
Findings The research, applied in nature, was conducted in 2024 across the southern districts of Tehran (Districts 9 to 20). It followed a developmental approach in three phases. First, confirmatory factor analysis was utilized to develop vulnerability indices. In the second phase, a fuzzy Delphi technique was employed to prioritize these indices. Finally, the most impactful factors influencing urban fabric vulnerability were weighted and visualized as geospatial layers using ArcGIS software (Version 9.2). The vulnerability of the study area was then assessed by overlaying these layers, leading to the development of a final vulnerability map based on seismic-related physical indicators.
Conclusion The heightened vulnerability of southern Tehran districts is attributed to poor structural conditions, inappropriate land use, ineffective transportation networks, dense and deteriorated urban fabric, high population density, inadequate distribution of medical and emergency facilities, and insufficient access to well-distributed urban open spaces. Addressing these challenges is critical to mitigating potential earthquake damage in urban areas.

Keywords Vulnerability; Earthquake; Superposition of Layers; Tehran City

CITATION LINKS

[Ahadnejad *et al.*, 2021] An analysis of the metamorphosis spatial organization ...; [Akhani *et al.*, 2019] A hybrid computational intelligence approach ...; [Alinia & Khatib, 2021] Investigation of seismic parameters, calculation of ...; [Azim & Islam, 2016] Earthquake preparedness of households in Jeddah ...; [Behrouzi *et al.*, 2022] Modeling the resilience of the city against ...; [Borja, 2007] Counterpoint: Intelligent cities and ...; [Burton *et al.*, 2017] Estimating aftershock collapse vulnerability using ...; [Cao & Laflamme, 2017] Real-time variable multidelay controller for ...; [Chelidze *et al.*, 2018] Phase space portraits of earthquake time ...; [Deakin, 2013] From intelligent to smart ...; [Deakin & Allwinkle, 2007] Urban regeneration and sustainable communities ...; [Dutta, 2012] War on the dream-How land use dynamics ...; [Ehsani & Bahmanpour, 2018] Underground transportation system risk assessment ...; [Fahim Danesh *et al.*, 2017] Investigation of earthquake and earthquake hazard ...; [Folke *et al.*, 2002] Resilience and sustainable development: Building adaptive ...; [Gil-García & Pardo, 2005] E-government success factors: Mapping practical ...; [Goltz & Bourque, 2017] Earthquakes and human behavior: A sociological ...; [Habibi *et al.*, 2017] Investigating the urban vulnerability against ...; [Habibi & Rahimi, 2013] Asseeement of land use ecological footprint ...; [Habibi & Hosseinzadeh, 2021] Social and cultural challenges of managing ...; [Hollands, 2008] Will the real smart city please stand ...; [Houshyar *et al.*, 2022] The status QUO analysis of the buildings ...; [Jahankhah *et al.*, 2012] Tehran seismic vulnerability assessment due to ...; [Janssena *et al.*, 2006] Scholarly network on resilience vulnerability and adaption ...; [León & March, 2014] Urban morphology as a tool for supporting tsunami ...; [Liang *et al.*, 2019] Posttraumatic stress disorder following the 2008 ...; [Lotfi *et al.*, 2022] Spatial analysis of physical resilience components of Ilam ...; [Mirhosseini *et al.*, 2020] An assessment of the vulnerability of Tehran's Farahzad ...; [Moehle *et al.*, 2009] The resilient city-A way of thinking about preparedness ...; [Moradi Tayebi *et al.*, 2020] Nature evaluation and time series prediction of Tehran ...; [Shieh *et al.*, 2020] Risk assessment of Tehran subway stations during earthquakes ...; [UN HABITAT, 2003] The challenge of slums-global report on human ...; [UNDP-BCPR, 2015] Reducing disaster risk: A challenge for ...; [Zheng *et al.*, 2018] Building vibration control by active mass damper with delayed ...;

Copyright© 2024, the Authors | Publishing Rights, ASPI. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

آسیب‌پذیری مناطق جنوبی شهر تهران در برابر زمین‌لرزه با استفاده از سیستم روی‌هم‌گذاری لایه‌ها

کتایون رضایی پرتو* PhD
پژوهشکده علوم زمین، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

چکیده

اهداف: هدف از این پژوهش بررسی و پهنه‌بندی میزان آسیب‌پذیری مناطق جنوبی شهر تهران در برابر زمین‌لرزه است.

روش‌شناسی: پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و در مناطق جنوبی شهر تهران (مناطق ۹ تا ۲۰) انجام شد. این پژوهش با رویکرد توسعه‌ای و در سه مرحله انجام شد. در مرحله نخست، برای تدوین شاخص‌های آسیب‌پذیری، از روش تحلیل عاملی تاییدی استفاده شد. در مرحله دوم، به منظور اولویت‌بندی شاخص‌ها، از تکنیک فازی در قالب روش دلفی بهره گرفته شد و در مرحله سوم، شاخص‌های موثر بر آسیب‌پذیری بافت (بر مبنای حداکثر تاثیر) از طریق نرم‌افزار ArcGIS, Version 9.2 به شکل لایه‌های اطلاعاتی وزن‌دار ترسیم شدند. در نهایت، با استفاده از تکنیک روی‌هم‌گذاری لایه‌ها، میزان آسیب‌پذیری برای مناطق مطالعاتی ارزیابی شد و بر اساس شاخص‌های کالبدی موثر در زمین‌لرزه، نقشه آسیب‌پذیری نهایی در منطقه مورد مطالعه تهیه شد.

یافته‌ها: تعداد ۲۱ شاخص به عنوان عوامل اثرگذار بر آسیب‌پذیری تدوین شدند. از دیدگاه صاحب‌نظران، در میان عوامل موثر، به ترتیب اولویت، بیشینه شتاب زمین، کیفیت ابنیه و فاصله از گسل بیشترین نقش را داشته و شاخص‌های توپوگرافی، تعداد طبقات و فاصله از ایستگاه آتش‌نشانی کمترین امتیاز را به خود اختصاص دادند. نتایج بیانگر آن بود که مناطق ۱۵، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ در مجموع آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به سایر مناطق مورد بررسی نشان دادند. که این امر نشان از وجود شاخص‌های بحرانی بیشتر در این مناطق داشت.

نتیجه‌گیری: وضعیت بد اجزای کالبدی و کاربری‌های نامناسب شهری، شبکه ارتباطی ناکارآمد، بافت شهری فشرده و فرسوده، تراکم شهری بالا، وضعیت بد استقرار کاربری‌های درمان و امدادرسانی، کمبود و توزیع نامناسب فضاهای باز شهری و غیره نقش اساسی در افزایش میزان آسیب‌های وارده به شهر در هنگام وقوع زمین‌لرزه دارد.

کلیدواژگان: آسیب‌پذیری، زمین‌لرزه، روی‌هم‌گذاری لایه‌ها، شهر تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵

*نویسنده مسئول: rezaeepartok@ripi.ir

مقدمه

شهر به عنوان خاستگاه تمدن بشری، همواره مورد توجه نظریه‌پردازان علوم مختلف بوده است. فضای پیچیده شهر، انسان‌های اندیشمند را برای رهایی از مشکلات و نارسایی‌ها در رسیدن به حد متعالی زندگی به فکر اصلاح و ایجاد ساختارهای جدید شهری وادار نموده است [Burton *et al.*, 2017]. امروزه، فناوری اطلاعات به عنوان عمده‌ترین محور تحول و توسعه در جهان منظور شده و دستاوردهای ناشی از آن چنان با زندگی مردم عجین شده است که بی‌توجهی به آن، اختلالی عظیم در جامعه و رفاه و آسایش مردم به وجود می‌آورد و نقش کلیدی فناوری‌های نوین اطلاعات و ارتباطات را در عرصه‌های اقتصادی، اجتماعی و سیاسی نمی‌توان نادیده گرفت [Deakin & Allwinkle, 2007]. شهر با مراکز تجمع و تراکم انسان، فعالیت‌های انسانی و ساختمان‌ها تعریف می‌شود. فضای شهری در درون خود، تاسیسات و تجهیزات زیربنایی با انواع کاربری‌ها اعم از مسکونی، اداری خدماتی، بهداشتی و غیره را جای داده است. همه مقوله‌های فوق، جمعیت وابسته‌ای را به دنبال خواهد آورد که در صورت وقوع بحران‌های طبیعی، به‌شدت از آنها تاثیر پذیرفته و باعث لجام گسیختگی نظام زندگی و واردآمدن ضررهای جانی و مالی فراوان در شهرها می‌گردد [Folke *et al.*, 2002]. از جمله عوامل مهمی که باعث توجه فراوان به این موضوع در نقاط شهری می‌شود، سرمایه‌گذاری‌ها و بارگذاری‌های محیطی فراوان و تراکم زیاد جمعیت است که در صورت بروز این‌گونه بحران‌ها باید برنامه‌ریزی‌های لازم برای پیشگیری و یا کاهش ضررهای احتمالی آنها اندیشیده شود. امروزه نیازهای شهری و تقاضای مسکن و مهاجرت روستاییان به شهرها باعث گسترش بیش از حد شهرهای بزرگ شده است. عدم توجه به مکان‌یابی صحیح شهرها، رشد و توسعه شهرهای بنیان نهاده شده، همچنین عدم برنامه‌ریزی‌های لازم برای جلوگیری از گسترش شهرها، مسایل و مشکلات فراوانی از جهت مصونیت کالبدی به بار می‌آورد و این موضوع باعث شده است شهرها روی مسیرهای اصلی گسل و یا در حریم رودخانه‌ها و مسیل‌ها ساخته شوند [Alinia & Khatib, 2021].

زمین‌لرزه از جمله سوانح طبیعی است که بیشتر شهرهای جهان با آن مواجه هستند. زمین‌لرزه یک پدیده طبیعی است که به علت لرزش‌های شدید ناشی از حرکات صفحات زمین‌ساختی رخ داده و در بستر زمین ایجاد گسستگی و گسل می‌نماید [Ehsani & Bahmanpour, 2018]. به عبارت دیگر، "فشارهای درونی زمین گاه با ایجاد نیروهای داخلی، با آزادسازی انرژی ناشی از فشار دو صفحه از پوسته همراه است که سبب بروز زمین‌لرزه می‌شود" [Goltz & Bourque, 2017]. زمین‌لرزه‌ها را برحسب دو معیار بزرگی (M) و شدت (I) بیان می‌کنند. بزرگی زمین‌لرزه معیاری است که قدرت یک زمین‌لرزه یا انرژی آزادشده ناشی از آن را که توسط دستگاه‌های لرزه‌نگاری اندازه‌گیری می‌شود نشان می‌دهد. شدت زمین‌لرزه معیاری است برای تعیین میزان یک زمین‌لرزه در یک محل خاص که بر اساس تاثیرات مشهود زمین‌لرزه بر مردم، ساختمان‌ها و سطح زمین تعیین می‌گردد. معیار اخیر مبنای اصلی برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در امر مدیریت بحران به شمار می‌رود [Habibi *et al.*, 2017]. زمین‌لرزه به عنوان یک پدیده طبیعی به خودی خود نتایج نامطلوبی در پی ندارد؛ آنچه از این پدیده یک فاجعه می‌سازد، عدم پیشگیری از تاثیر آن و عدم آمادگی به منظور مقابله با عواقب آن و مشخصات کالبدی و عملکردی سکونتگاه است که باعث ایجاد آسیب‌پذیری و اثرات زیان‌بار شده و تاثیر سوانح و جامعه را تشدید می‌کند [Deakin, 2013]. این مساله عموماً با گسترده‌ترین دخالت‌های نسنجیده انسانی در محیط

طبیعی از جمله ساخت‌وسازهای بی‌رویه در حریم گسل، فقدان یا بی‌توجهی به ضوابط و استانداردهای ساخت‌وساز تشدید می‌شود. ضرورت کاهش آسیب‌پذیری شهرها در برابر زمین‌لرزه، به عنوان یکی از اهداف اصلی برنامه‌ریزی کالبدی، برنامه‌ریزی شهری و طراحی شهری محسوب می‌گردد. در این راستا، اولین گام، شناسایی میزان آسیب‌پذیری اجزای فضای شهری و ارزیابی آن بر اساس الگوهای موجود در جهت تشخیص مناطق و بافت‌های آسیب‌پذیر شهری برای کاهش اثرات زمین‌لرزه است [UNDP-BCPR, 2015].

زمین‌لرزه در سکونتگاه‌های انسانی باعث خسارات جانی و مالی شده، نتیجه سرمایه‌گذاری‌های بلندمدت را از بین برده و همچنین توسعه و پیشرفت را به خطر می‌اندازد. بررسی میزان آسیب‌ها و صدمات ناشی از زمین‌لرزه در شهرها در بسیاری از موارد نشان داده است که درصد بالایی از صدمات به طور مستقیم به وضعیت نامطلوب برنامه‌ریزی و شناسایی و کاهش خطرات شهری مربوط می‌شود [Alinia & Khatib, 2021]. عوامل متعددی همچون کاربری نامناسب زمین، طراحی و احداث نامناسب ساختمان‌ها و زیرساخت‌های ناکارآمد شهری موجب افزایش خطر سکونتگاه‌های انسانی شده است. چنین عواقبی بر اثر وجود آسیب‌پذیری در ابعاد مختلف زندگی بشر پدید می‌آیند که بررسی و شناسایی آنها مدیریت بحران را در کاهش خسارات ناشی از زمین‌لرزه یاری خواهد داد.

با توجه به تراکم جمعیت و فعالیت در شهرهای بزرگ، ضرورت تامین ایمنی در همه ابعاد مدیریت شهری به‌خصوص در زمینه برنامه‌ریزی کالبدی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همان‌طور که برنامه توسعه سازمان ملل متحد خاطر نشان ساخته است «گرایش مدیریت شهری به سمتی است که مخاطرات شهری کمتر می‌شوند» [UNDP-BCPR, 2015].

موضوع تامین ایمنی شهرها در برابر مخاطرات طبیعی یکی از اهداف اصلی شهرسازی و مدیریت شهری است که در این راستا اولین گام شناسایی عوامل خطرساز و تعیین میزان آسیب‌پذیری اجزا و بافت شهر با استفاده از الگوها و روش‌های موجود در این زمینه است. امروزه احساس نیاز به آگاهی از چگونگی کاهش شدت آسیب‌های ناشی از بحران زمین‌لرزه چه در سطح بین‌المللی، چه در حد برنامه‌ریزی خرد مانند شهرها، ضرورت تام و تمام پیدا کرده است [Cao & Laflamme, 2017]. معمولاً شهرها در برابر زمین‌لرزه رفتارهای مشترکی از خود نشان می‌دهند و لیکن آنچه حایز اهمیت است، میزان تاثیرپذیری کالبدی یک شهر در برابر تنش‌های وارده است. با روند رو به رشد شهرنشینی و مهاجرت‌های بی‌رویه به سوی شهرها که بنا به پیش‌بینی سازمان ملل متحد انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ میلادی حدود ۶۸٪ جمعیت جهان (معادل ۳۶ میلیارد نفر) در مناطق شهری زندگی کنند، میزان خطرپذیری کالبدی و به تبع آن شمار تلفات انسانی افزایش می‌یابد. در سرتاسر جهان، کشورها به طور فزاینده‌ای در حال شهری‌شدن هستند [Deakin, 2013]. در خلال قرن بیستم میلادی حدود ۱۱۰۰ زمین‌لرزه مرگبار در ۷۵ کشور جهان رخ داده و علاوه بر خسارت‌های مادی عظیم، جان حداقل ۱/۵ میلیون نفر را گرفته است [Cao & Laflamme, 2017]. پیش‌بینی می‌شود در قرن ۲۱ میلادی حداقل دو میلیون نفر دیگر از بین بروند، نتیجه این فاجعه ضرر ۵ تریلیون دلاری اقتصاد جهانی و در حد معادل این مبلغ، ویرانی ناشی از بناها و ساختمان‌ها خواهد بود [Dutta, 2012].

مفهوم آسیب‌پذیری از مطالعه بر روی بلایای طبیعی و فقر سرچشمه گرفته است [Janssena *et al.*, 2006] و ریشه در تعامل یک سامانه و محیط پیرامون آن دارد [Liang *et al.*, 2019]. بنا به تعریف سازمان ملل متحد، آسیب‌پذیری عبارت است از درجه زیان یک عامل یا دسته‌ای از عوامل در معرض خطر، در نتیجه وقوع یک پدیده طبیعی با بزرگای معین که بر روی مقیاسی از صفر (بدون آسیب‌پذیری) تا یک (آسیب‌پذیری کامل) بیان می‌گردد [UN HABITAT, 2003]. آسیب‌پذیری اصطلاحی است که برای نشان‌دادن وسعت و میزان خسارت‌های احتمالی بر اثر وقوع سوانح طبیعی به جوامع، ساختمان‌ها و مناطق جغرافیایی به کار می‌رود [Habibi & Hosseinzadeh, 2021]. آسیب‌پذیری یک حوزه جدید و ابزاری تحلیلی در مطالعات ایمنی شهری است. تحلیل و ارزیابی آسیب‌پذیری یک پایه و اساس جدید برای برنامه‌ریزی شهری فراهم می‌آورد [Moehle *et al.*, 2009]. آسیب‌پذیری شهری میزان خسارتی است که در صورت بروز سانحه به اجزای یک شهر برحسب چگونگی کیفیت آنها وارد می‌شود. آسیب‌پذیری شهر پدیده‌ای است گسترده که تمامی عوامل موجود در یک شهر را دربر می‌گیرد و به علت وابستگی عناصر به یکدیگر آسیب‌پذیری شهر نیز به‌سرعت گسترش می‌یابد [Cao & Laflamme, 2017]. آسیب‌پذیری شهری به میزانی از تفاوت‌های ظرفیتی جوامع شهری برای مقابله با اثرهای مخاطرات طبیعی بر اساس موقعیت آنها در جهان مادی (ساختار فضایی شهر) و ویژگی‌های اجتماعی آن جوامع (ساختار اجتماعی شهر) اطلاق می‌شود [Ahadnejad *et al.*, 2021]. به عبارت دیگر، آسیب‌پذیری یک تابع ریاضی است و به مقدار خسارت پیش‌بینی‌شده برای هر عامل در معرض خطرهای مصیبت‌بار، با شدت معین، گفته می‌شود. تحلیل آسیب‌پذیری فرآیند برآورد آسیب‌پذیری عوامل معینی است که در معرض خطر احتمالی ناشی از وقوع مصیبت‌بار هستند. تحلیل آسیب‌پذیری شهری، تحلیل، ارزیابی و پیش‌بینی احتمال خسارت‌های جانی، مادی و معنوی شهر و ساکنان شهر در برابر مخاطرات احتمالی است [Gil-García & Pardo, 2005].

در همین ارتباط و در راستای پیاده‌سازی شیوه مذکور باید گفت که شهر تهران، بر اساس نقشه پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای کشور در پهنه خطر بسیار زیاد زمین‌لرزه قرار گرفته است. این در حالی است که بر اساس مطالعات انجام‌شده توسط مشاوران ایرانی و نیز آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن (جایکا) و مرکز مطالعات زمین‌لرزه و زیست‌محیطی تهران، در صورت وقوع زمین‌لرزه در تهران حدود ۴۸۰/۰۰۰ ساختمان به‌شدت آسیب دیده و حدود ۲۲۰ میلیارد دلار خسارت مستقیم به شهر وارد خواهد شد [Ehsani & Bahmanpour, 2018]. با

توجه به مطالعات انجام‌شده درباره خطر زمین‌لرزه در تهران، انجام مطالعات و پژوهش‌هایی در زمینه مدیریت زمین‌لرزه و کاهش خسارت‌ها و عوارض ناشی از آن با توجه به امکانات و برنامه‌ریزی‌های کالبدی شهر، تبدیل به امری ضروری شده که انجام پژوهش‌های دانشگاهی در این زمینه را روزافزون کرده است.

به طور کلی با توجه به اینکه گسل شمال تهران از محله‌های شمالی تهران عبور می‌کند، می‌توان گفت از جمله خطرناک‌ترین گسل‌های تهران است. همچنین با توجه به اینکه گسل مشا گسل طویلی است، از توان لرزه‌خیزی بالایی برخوردار است. بر این اساس و اطلاعاتی که موجود است، چنانچه این گسل فعال شود قادر خواهد بود زمین‌لرزه‌ای به بزرگای ۷/۵ ایجاد کند که برای تهران به‌ویژه بخش‌های شمال و شمال شرق آن بسیار مخرب خواهد بود [Moradi Tayebi *et al.,* 2020]. تاریخچه رخداد زمین‌لرزه‌های تاریخی در پهنه تهران (ری)، شمیرانات و همچنین اهمیت زمین‌لرزه‌های اخیر رخ‌داده در پیرامون تهران همگی نمایانگر ویژگی این منطقه از نظر لرزه‌خیزی است. وجود گسل‌های بنیادی و قرارگیری روندهای پنهان لرزه‌زا در گستره تهران و کرج و احتمال رخداد زمین‌لرزه مخرب در هر یک از این روندهای گلسه نمایانگر اهمیت و توجه ویژه به پهنه تهران به عنوان پهنه‌ای با خطر بالای زمین‌لرزه است [Shieh *et al.,* 2020].

زمین‌لرزه‌های تاریخی در سال۳۳۰ پیش از میلاد، ۸۵۵ میلادی، ۱۳۸۴ میلادی و ۱۸۳۰ میلادی موجب تخریب شهر باستانی ری (و در مورد آخر تهران) شد و همچنین زمین‌لرزه باستانی ۳۰۰۰ سال قبل احتمالاً موجب ویرانی تمدن قیطریه در شمال تهران شده است. گسل شمال تهران از جمله خطرناک‌ترین گسل‌های پایتخت است که در صورت وقوع زمین‌لرزه شدید (با بزرگای ۶ یا بالاتر) با تخریب وسیع در پهنه گسله همراه خواهد بود. آخرین زمین‌لرزه مخرب در منطقه تهران در ۱۸۳۰ میلادی در منطقه دماوند-شمیرانات رخ داد. بر اساس برآورد احتمالی و با در نظرگرفتن تمام گسل‌های اطراف تهران، بازگشت زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۷ را حدود ۱۶۰ تا ۱۸۰ سال برآورد می‌کنند. ولیکن، اگر با در نظرگرفتن این دوره بازگشت، زمین‌لرزه ۱۸۳۰ دماوند-شمیرانات به عنوان آخرین رخداد در نظر گرفته شود، مقایسه اشتباهی صورت گرفته است. چرا که زمین‌لرزه سال ۱۸۳۰ میلادی دماوند شمیرانات در اثر فعال‌شدن گسل مشا رخ داده است، ولیکن بازگشت ۱۶۰ تا ۱۸۰ساله برای بزرگای ۷ با توجه به لرزه‌خیزی تمام گسل‌های منطقه تهران (مشا، شمال تهران، ایوانکی و غیره) به‌دست آمده است. بنابراین، این نوع استدلال مخدوش است [Shieh *et al.,* 2020; Ehsani & Bahmanpour, 2018; Fahim Danesh *et al.,* 2017]. ولی در اصل موضوع (لرزه‌خیزی بالا و خطر زمین‌لرزه بالا در منطقه تهران) تردیدی وجود ندارد. تهران در کنار استانبول، لس‌آنجلس، توکیو و جاکارتا یکی از پنج کلانشهری است که در محدوده آنها بیش ۱۰ میلیون جمعیت زندگی می‌کنند و در معرض خطر و ریسک بسیار بالای زمین‌لرزه قرار دارند و رویداد زمین‌لرزه مخرب در آنها به مساله مهم در سطح بین‌المللی تبدیل می‌شود [Fahim Danesh *et al.,* 2017].

شیعه و همکاران در پژوهشی به بررسی آسیب‌پذیری شبکه‌های ارتباطی شهرها در هنگام وقوع زمین‌لرزه با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی معکوس و سامانه اطلاعات جغرافیایی پرداخته‌اند. نتایج پژوهش آنان نشان می‌دهد که بدنه خیابان‌های شهر با تراکم ساختمانی و جمعیتی بالا، کیفیت ابنیه پایین، فاصله زیاد تا مراکز امدادی نسبت به سایر قطعه‌ها و درجه محصوریت بیشتر، از میزان آسیب‌پذیری بالایی برخوردار است [Shieh *et al.,* 2020]. *حبیبی* و *رحیمی* آسیب‌پذیری شهری و سامانه اطلاعات جغرافیایی به تفصیل از ارتباط الگوهای مختلف در پایش آسیب‌پذیری بافت شهری و تبیین مبانی آسیب‌پذیری و مدیریت بحران سخن گفته‌اند. آنها ضمن بررسی تاثیر کالبد بر ایمنی و امنیت، از ۳۸ شاخص مختلف کالبدی، اجتماعی، اقتصادی و امنیت عمومی برای تعیین آسیب‌پذیری بافت مورد مطالعه (منطقه شش شهرداری تهران) و با روش تحلیل سلسله مراتبی معکوس استفاده کردند. تحلیل شبکه در ارتباط با نقشه‌های آسیب‌پذیری و مکان‌یابی سایت‌های امداد و نجات منطقه از مباحث مطرح‌شده در این کتاب است [Habibi & Rahimi, 2013]. همچنین، *حبیبی* و *حسین‌زاده* با استفاده از شاخص‌هایی چون دسترسی به مراکز درمانی، نسبت عرض خیابان و ارتفاع ساختمان‌ها (درجه محصوریت)، تراکم ساختمانی، تراکم جمعیتی، کاربری زمین، بیشینه شتاب زمین منطقه و کیفیت ابنیه به بررسی آسیب‌پذیری شهر در برابر زمین‌لرزه با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسه مراتبی معکوس و سامانه اطلاعات جغرافیایی پرداخته‌اند که در نتایج آنها محدوده‌های با تراکم ساختمانی و جمعیتی بالا، کیفیت ساختمان پایین، درجه محصوریت بالا و فواصل زیاد تا مراکز امدادی امتیاز آسیب‌پذیری بالایی کسب نموده‌اند [Habibi & Hosseinzadeh, 2021]. *جهانخواه* و همکاران نشان داده‌اند که ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای، یک مساله تصمیم‌گیری چندمعیاره بر اساس اطلاعات مکانی است که وزن و اهمیت هر کدام از این معیارها توسط افراد خبره تعیین می‌شود [Jahankhah *et al.,* 2012]. *فهیم دانش* و همکاران خطر زمین‌لرزه را در ساختمان‌های شهر تهران به روش احتمالاتی بررسی کرده‌اند [Fahim Danesh *et al.,* 2017]. *مرادی طیبی* و همکاران اقدام به بررسی ماهیتی و پیش‌بینی سری‌های زمانی زمین‌لرزه‌های تهران نموده‌اند. نتایج نشان داده است که دینامیک حاکم بر زمین‌لرزه‌های این منطقه تصادفی نیست. این زلزله‌ها رفتار آشوبی با بُعد بالا از خود نشان می‌دهند [Moradi Tayebi *et al.,* 2020]. نتایج پژوهش *علی‌نیا* و *خطیب* بیانگر آن بوده است که بیشینه شتاب افقی بالاترین اهمیت را در بین سایر پارامترهای موثر داشته است [Alinia & Khatib, 2021]. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش *میرحسینی* و همکاران در پی لغزش گسل شمال تهران محله فرحزاد با تخریب ۶۵درصدی در اثر زمین‌لرزه روبه‌رو خواهد شد که در آن بین ۱۱۵۳ تا ۱۳۴۵ ساختمان آسیب جدی خواهند دید و تلفات انسانی در صورت وقوع زمین‌لرزه در

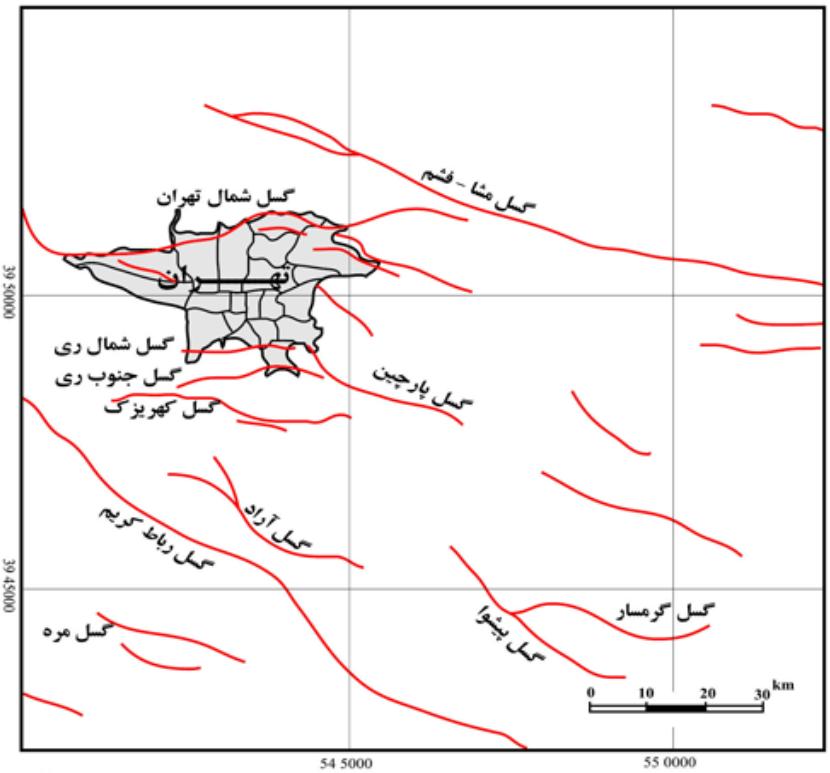
هنگام شب و نبود امدادرسانی به بیش از ۵۰۰ نفر خواهد رسید [Mirhosseini *et al.*, 2020].

نظر به آنکه مطالعات پیشین به‌ویژه مطالعات داخلی بیشتر بر مقوله گسل‌های شمال شهر تهران متمرکز بوده است و با توجه به محدودیت عوامل موثر بر زمین‌لرزه که در این قبیل مطالعات، در پژوهش حاضر هدف آن بود تا میزان آسیب‌پذیری مناطق جنوبی شهر تهران نسبت به وقوع زمین‌لرزه مورد ارزیابی قرار گیرد. در این میان محقق تلاش کرده است تا با گسترش پارامترهای مورد بررسی، بر جمعیت و دقت نتایج بیفزاید.

روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده که در شهر تهران با رویکرد توسعه‌ای انجام شد. محدوده مورد مطالعه در این مطالعه مناطق جنوبی شهر تهران (مناطق ۹ تا ۲۰) بود.

در مجموع ۴۱۰ کیلومتر گسل زمین‌لرزه در محدوده و خارج از محدوده شهر تهران شناسایی شده است که ۲۴۹ کیلومتر آن در داخل محدوده شهر تهران قرار دارد، در مجموع ۸۰ کیلومتر مربع وسعت گسل‌های تهران در داخل و خارج از محدوده است که ۴۷ کیلومتر گسل زمین‌لرزه در داخل محدوده تهران قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱) نقشه گسل‌های استان تهران و مناطق پیرامونی [Ehsani & Bahmanpour, 2018]

گسل‌های لرزه‌خیز تهران شامل گسل شمال تهران، ایوانک، ری و کهریزک، و گسل مشا است. از لحاظ جغرافیایی و زمین‌شناسی شهر تهران در یک گستره طبیعی واقع شده که چندین رشته گسل فعال و نقاط لرزه‌خیز پراکنده در آن وجود دارد. از میان بسیاری از گسل‌های فعال در منطقه، محتمل‌ترین گسل‌های خطرناک عبارتند از [Shieh *et al.*, 2020]:

- گسل مشا (طول: حدود ۲۰۰ کیلومتر)
- گسل شمال تهران (طول: حدود ۹۰ کیلومتر)
- گسل جنوب ری (طول: حدود ۲۰ کیلومتر)

به منظور تدوین معیارها و شاخص‌های آسیب‌پذیری، از روش تحلیل عاملی تاییدی استفاده شد. همچنین برای اولویت‌بندی شاخص‌های موثر بر آسیب‌پذیری، از تکنیک فازی در قالب روش دلفی بهره گرفته شد و در انتها، از تکنیک روی‌هم‌گذاری لایه‌ها در محیط Arc GIS 9.2 و برنامه‌نویسی در محیط MATLAB برای ارزیابی آسیب‌پذیری مناطق مورد بررسی استفاده شد. در ادامه مراحل پژوهش تشریح می‌شوند:

مرحله اول: تدوین معیارها و شاخص‌های آسیب‌پذیری

ابزار اصلی پژوهش در این مرحله عبارت بودند از منابع مکتوب، اسناد فرادستی، ضوابط و استانداردهای مرتبط که از طریق فیش‌برداری مورد واکاوی قرار گرفتند. در این بخش، با بررسی عمیق و نگرش نظام‌مند به سلسله عوامل موثر بر آسیب‌پذیری، امکان دستیابی به فهرست جامعی از معیارها و شاخص‌ها فراهم آمد [Fahim Danesh *et al.*, 2017; Ahadnejad *et al.*, 2021; Akhani *et al.*, 2019; Alinia & Khatib, 2021; Azim & Islam, 2016; Behrouzi *et al.*, 2022; Borja, 2007; Chelidze *et al.*, 2018; Habibi *et al.*, 2017; Hollands, 2008; León & March, 2014; Lotfi *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2018]. در گام نخست، بر اساس مطالعات گسترده بر روی منابع معتبر و بررسی سوابق پژوهش در داخل و خارج، فهرست اولیه تهیه و تدوین شد. در ادامه این فهرست در اختیار خبرگان قرار گرفت تا تعیین اعتبار گردد (جدول ۱).

جدول ۱) معیارها و شاخص‌های موثر در آسیب‌پذیری کالبدی شهرها در برابر زمین‌لرزه بر اساس بررسی‌های انجام‌شده در پژوهش

معیار	شاخص
تکتونیکی/زمین‌شناختی	دوری و نزدیکی به گسل جنس بستر (زمین)، نوع خاک روان‌گرایی خاک بیشینه شتاب زمین (PGA)/شتاب افقی زمین سرعت امواج برشی (عرضی)/بیشینه سرعت زمین (PGV) شدت و بزرگی زمین‌لرزه حداکثر مدت تداوم زمین‌لرزه
ژئومورفولوژی/زمین ریخت‌شناسی	وضع توپوگرافی (پستی و بلندی) و شیب زمین
مکان‌یابی و کاربری	هم‌جواری بین کاربری‌ها سازگاری و ناسازگاری/فاصله از کاربری‌های خطرزا
سازه	نوع سازه نوع مصالح کیفیت ابنیه (اجرا-ساخت) قدمت بنا تعداد طبقات/تراکم ارتفاعی
انتظام بافت	پیوسته و منظم
انواع بافت	ناپیوسته و منظم
الگوی قطعه‌بندی تفکیکی	منظم (قائم الزاویه) مربع یا مستطیل/منظم، چندضلعی (زوایای منفرجه و حاده)/نامنظم (اشکال ترکیبی)
دانه‌بندی قطعات	مساحت قطعات تفکیکی/اندازه و حدود قطعه‌ها
تراکم	ساختمانی جمعیتی
بافت فرسوده	ریزدانگی/نفوذناپذیری/ناپایداری
فضاهای باز عمومی	دوری و نزدیکی به فضاهای بی‌کالبد
درجه محصوریت	سطح ساخته‌شده به کل قطعه
انتظام شبکه راه	میزان محصوریت معابر
معابر	سلسله مراتب دسترسی عرض معابر
فاصله از مراکز خدمات اضطراری دسترسی به مراکز خدمات اضطراری	فاصله از مراکز امداد و نجات (اسکان موقت) فاصله از فضای سبز فاصله از مراکز درمانی، اورژانس، بیمارستان فاصله از ایستگاه آتش‌نشانی

مرحله دوم: تایید و وزن‌دهی شاخص‌های موثر بر آسیب‌پذیری

در این بخش نسبت به تایید و وزن‌دهی شاخص‌ها اقدام شد. بدین منظور با مراجعه به آرای کارشناسان و خبرگان داخلی و خارجی (تکنیک دلفی) اقدام به این کار گردید (جدول ۲). روش نمونه‌گیری در این پژوهش نمونه‌گیری هدفمند انتخابی بوده است. بدین معنی که متناسب با هدف، اقدام به انتخاب کارشناس خبره مرتبط با موضوع شد. افراد واجد شرایط در این پژوهش واجد چند ویژگی زیر بودند:

- عضو هیات علمی دانشگاه یا موسسه پژوهشی در زمینه شهرسازی، مدیریت شهری و یا مدیریت بحران و ایمنی؛
- دارای سابقه کار تخصصی (حداقل ۱۵ سال)؛
- دارای تالیفات مرتبط با موضوع باشند.

ابزار اصلی این بخش از پژوهش عبارت بود از پرسش‌نامه محقق‌ساخته‌ای که با هدف تایید فهرست عوامل موثر، و بر اساس مرور ادبیات پژوهش و در قالب طیف لیکرت پنج قسمتی (خیلی کم=۱، کم=۲، متوسط=۳، زیاد=۴ و خیلی زیاد=۵) تنظیم گردید. با طراحی سامانه وب‌میل هوشمند، فهرست اولیه معیارها برای صاحب‌نظران و خبرگان مرتبط با موضوع ارسال شد و از آنها خواسته شد تا نسبت به تایید یا رد هر یک از موارد، اظهار نظر کنند (n=۱۷). پایایی پرسش‌نامه با استفاده از آزمون آلفای کرونباخ، ۰/۸۳ به‌دست آمد. سپس، از خبرگان درخواست شد تا از طریق سامانه هوشمند و به شکل فازی نسبت به وزن‌دهی پارامترها اقدام کنند. این سامانه به نحوی طراحی شد که به طور خودکار معیارها و شاخص‌ها نسبت به هم مقایسه و به تبع آن انحرافات احتمالی را شناسایی می‌کرد. تابع فازی مورد استفاده در این مطالعه تابعی خطی بود که داده‌ها را به صورت خطی و با شیب یکسان از حالت کلاسیک به حالت فازی تبدیل می‌کند. در این مرحله لازم بود تا لایه‌های اطلاعاتی برای هر معیار و شاخص به تفکیک تهیه شوند. بدین منظور از رابطه ۱ برای محاسبه امتیاز لایه‌ها استفاده شد.

رابطه ۱)

$$J=D-(N-i)X$$

امتیاز اولیه هر شاخص=X (D/N)

امتیاز به‌دست‌آمده از مدل دلفی=D

تعداد کلاس‌های هر شاخص=N

رقم تخصیص‌یافته به طبقه‌بندی‌های مختلف هر شاخص=I

امتیاز به‌دست‌آمده برای طبقه‌بندی‌های مختلف هر شاخص=J

جدول ۲) جزییات تکنیک دلفی مورد استفاده

جزییات تکنیک دلفی	توضیحات	مطابقت با راهنمای تکنیک دلفی [Houshyar *et al.*, 2022]
تعداد خبرگان پرسش‌شونده	۱۷ نفر (۱۱ نفر کارشناس داخلی و ۶ نفر کارشناس خارجی)	حداقل نفرات برای تشکیل گروه، باید ۱۰ نفر باشد
مدت زمان انجام تکنیک دلفی (رفت و برگشت پاسخ‌ها)	۵۴ روز	حداقل زمان مورد قبول ۴۵ روز است
تعداد مراحل تکرار مصاحبه یا پرسش‌نامه	۳ مرحله (مصاحبه و پرسش‌نامه)	حداقل ۲ مرحله
میزان توافق مورد نظر برای حصول نتیجه	۸۳ درصد	حداقل توافق قابل قبول ۷۰ تا ۸۰٪ است

مرحله سوم: ارزیابی میزان آسیب‌پذیری

شاخص‌های موثر در آسیب‌پذیری بافت (بر مبنای حداکثر تاثیر) از طریق نرم‌افزار ArcGIS, Version 9.2 به شکل لایه‌های اطلاعاتی وزن‌دار ترسیم شدند. در نهایت، با تکنیک روی‌هم‌گذاری لایه‌ها، میزان آسیب‌پذیری برای مناطق مطالعاتی ارزیابی شد و بر اساس شاخص‌های کالبدی موثر در زمین‌لرزه، نقشه آسیب‌پذیری نهایی در منطقه مورد مطالعه تهیه شد. در این پژوهش ارزیابی آسیب‌پذیری به ۵ مرحله "خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، و خیلی زیاد" تقسیم شد. در این پژوهش، نقشه‌های آسیب‌پذیری و مداخله‌پذیری، طی ۳ مرحله تولید شد. در مرحله اول، نقشه‌های اصلی که در تخریب ناشی از زمین‌لرزه موثر هستند، از نظر اهمیت درجه‌بندی شدند. در مرحله دوم، نقشه‌ها با استفاده از توابع فازی به نقشه‌های فازی تبدیل شدند. در مرحله سوم، با توجه به امتیازهای کسب‌شده، نقشه‌ها بر اساس مدل IHWP با یکدیگر ادغام گشتند. بر این مبنا، ۲۱ شاخص شناسایی شدند که با استفاده از تکنیک دلفی، میزان اهمیت هر شاخص در آسیب‌پذیری یک مکان در برابر زمین‌لرزه رتبه‌بندی شد. سپس معکوس رتبه هر لایه به عنوان وزن آن لایه در مدل IHWP در نظر گرفته شد.

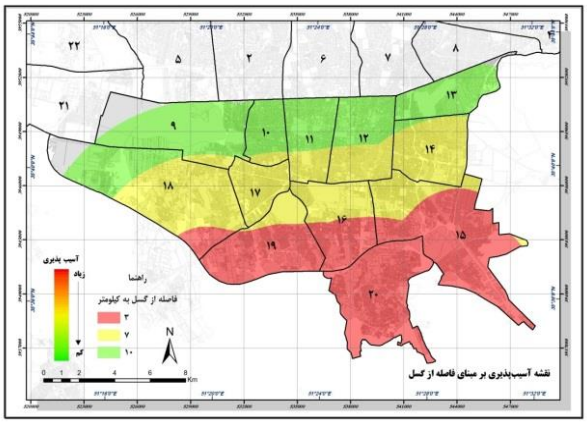
به منظور تعیین میزان آسیب‌پذیری و به دنبال آن تجزیه و تحلیل انواع مداخلات کالبدی در بافت شهری مورد نظر، از طریق نرم‌افزار Matlab، اقدام به برنامه‌نویسی شد. در این روش میزان آسیب‌پذیری هر سلول به ازای هر شاخص بررسی می‌شود. در صورتی که در شاخص مذکور میزان آسیب‌پذیری بیش از حد بهینه باشد، به حد بهینه (برحسب انتخاب حد بالای بهینه، حد وسط بهینه یا حد پایین بهینه همان شاخص) تبدیل می‌شود؛ در غیر این صورت سلول بعدی بررسی می‌شود. این عمل به ازای تمام شاخص‌ها و برای تمامی سلول‌ها انجام می‌پذیرد تا در نهایت میانگینی از آسیب‌پذیری کل منطقه محاسبه گردد.

یافته‌ها

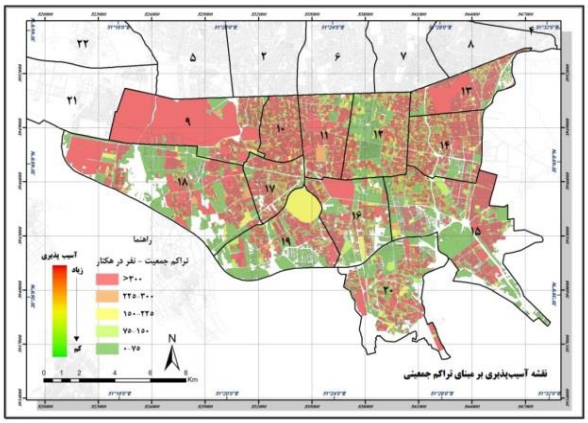
همان‌طور که در قسمت روش‌شناسی بیان شد، با بهره‌گیری از آرای کارشناسان (روش دلفی) اقدام به بازشناسایی و رتبه‌بندی معیارها و شاخص‌های موثر در آسیب‌پذیری محدوده مورد مطالعه شد. پس از اتمام دوره‌ای رفت و برگشت دلفی، تعداد ۲۱ شاخص نهایی شدند. در ادامه، از طریق روش فازی نسبت به تخصیص وزن برای هر یک از شاخص‌ها اقدام شد (جدول ۳).

جدول ۳) فازی‌سازی عوامل موثر در میزان آسیب‌پذیری ناشی از زمین‌لرزه و وزن آنها

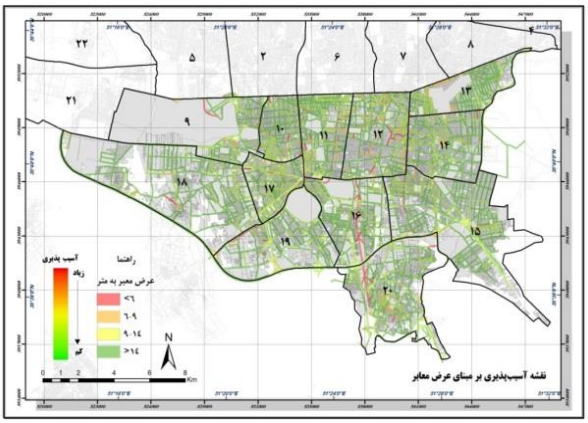
رتبه	عامل موثر در آسیب‌پذیری زمین‌لرزه	امتیاز لایه	فازی کامل	مقادیر فازی‌سازی شده	بدون فازی
۱	بیشینه شتاب زمین-PGA	۱۹	امتیاز ۳۰۸ به بالا (حداکثر شتاب)	امتیاز بین ۲۶۸ تا ۳۰۸ (شتاب متوسط)	امتیاز کمتر از ۲۶۸ (حداقل شتاب)
۲	کیفیت ابنیه	۱۸	تخریبی	مرمتی و قابل نگهداری	نوساز
۳	دوری و نزدیکی به گسل (فاصله از گسل)	۱۷	۰	مقادیر بین ۰ تا ۱۰۸۳۵ متر	بیش از ۱۰۸۳۵ متر
۴	نوع سازه (اسکلت) و قدمت بنا	۱۶	اسکلت فولادی یا بتن مسلح احداث قبل از ۱۳۵۳	کلیه سازه‌های موجود بین دو محدوده فازی کامل و بدون فازی	اسکلت فولادی، بتن مسلح؛ احداث بعد سال ۱۳۷۵
۵	دانه‌بندی قطعات (مساحت زمین)	۱۵	کمتر از ۱۰۰ متر مربع	بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر مربع	بالای ۳۰۰ متر مربع
۶	عرض معبر	۱۴	کمتر از ۶ متر	بین ۶ تا ۱۴ متر	بالای ۱۴ متر
۷	نوع کاربری	۱۳	مسکونی	مابقی کاربری‌ها	بایر
۷	تراکم جمعیتی	۱۳	بالای ۳۰۰ نفر در هکتار	بین ۰ تا ۳۰۰ نفر در هکتار	۰
۸	نسبت اعیان به عرصه	۱۲	۷۵٪ به بالا	بین ۰ تا ۷۵٪	۰
۹	هم‌جواری بین کاربری‌ها	۱۱	کمتر از ۱۷۱ متر	بین ۱۷۱ تا ۱۰۳۰ متر	بالای ۱۰۳۰ متر
۹	فاصله از مراکز درمانی	۱۱	بالای ۱۰۰۰ متر	۰ تا ۱۰۰۰ متر	۰
۱۰	فاضله از فضاهای باز عمومی	۱۰	بالای ۳۰۰ متر	بین ۰ تا ۳۰۰ متر	۰
۱۱	درجه محصوریت	۹	مقادیر ۱ به بالا	بین ۰ تا ۱	۰
۱۲	انتظام بافت	۸	بافت ارگانیک	بافت میانی	بافت منظم
۱۳	جنس زمین	۷	امتیاز ۵	امتیاز ۵	امتیاز ۵
۱۴	الگوی قطعه‌بندی تفکیکی	۶	درجه ۳ قطعات کامال بی‌نظم	درجه ۲ مقادیر میان قطعات کامال بی‌نظم و چندضلعی تا قطعات منظم و مستطیل	درجه ۱ قطعات منظم و مستطیل
۱۵	تراکم ساختمانی	۵	۴۰۰٪ به بالا	۰ تا ۴۰۰٪	۰
۱۶	زمان عملکرد کاربری	۴	اشتغال پیوسته	کاربری فعال در شب و روز	خالی در شب
۱۷	توپوگرافی	۳	بالای ۳/۴٪	بین ۰ تا ۳/۴٪	۰
۱۸	تعداد طبقات	۲	۵ طبقه	مقادیر بین ۵ طبقه تا بدون طبقه	بدون طبقه
۱۹	فاصله از ایستگاه آتش‌نشانی	۱	۲۰۰۰ متر به بالا	فاصله بین ۰ تا ۲۰۰۰ متر	۰



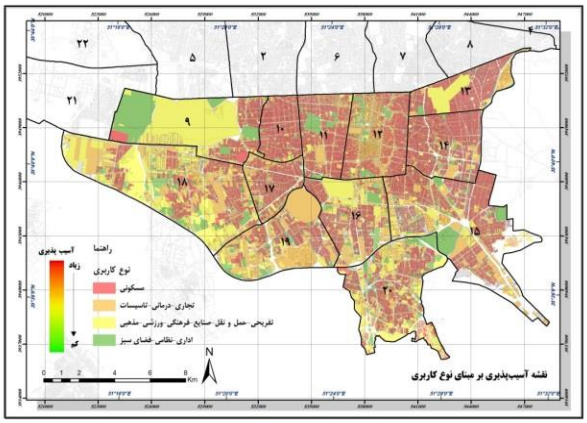
الف) نقشه میزان آسیب‌پذیری بر اساس فاصله از گسل



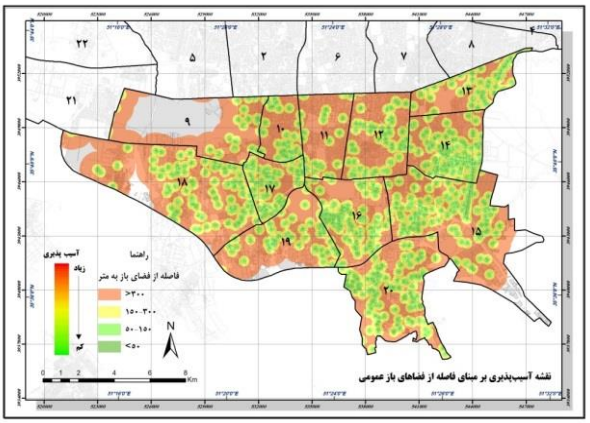
ب) نقشه میزان آسیب‌پذیری بر اساس تراکم جمعیتی



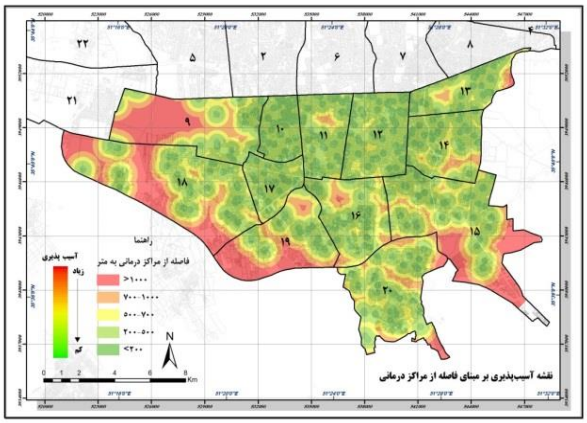
پ) نقشه میزان آسیب‌پذیری بر اساس عرض معبر



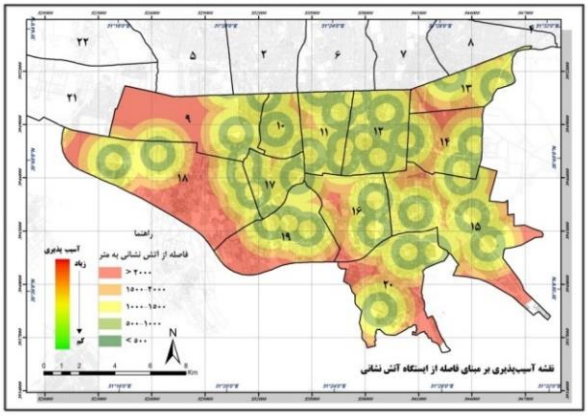
ت) نقشه میزان آسیب‌پذیری بر اساس کاربری



ث) نقشه میزان آسیب‌پذیری بر اساس فاصله از فضاهای باز عمومی



ج) نقشه میزان آسیب‌پذیری بر اساس فاصله از مراکز درمانی

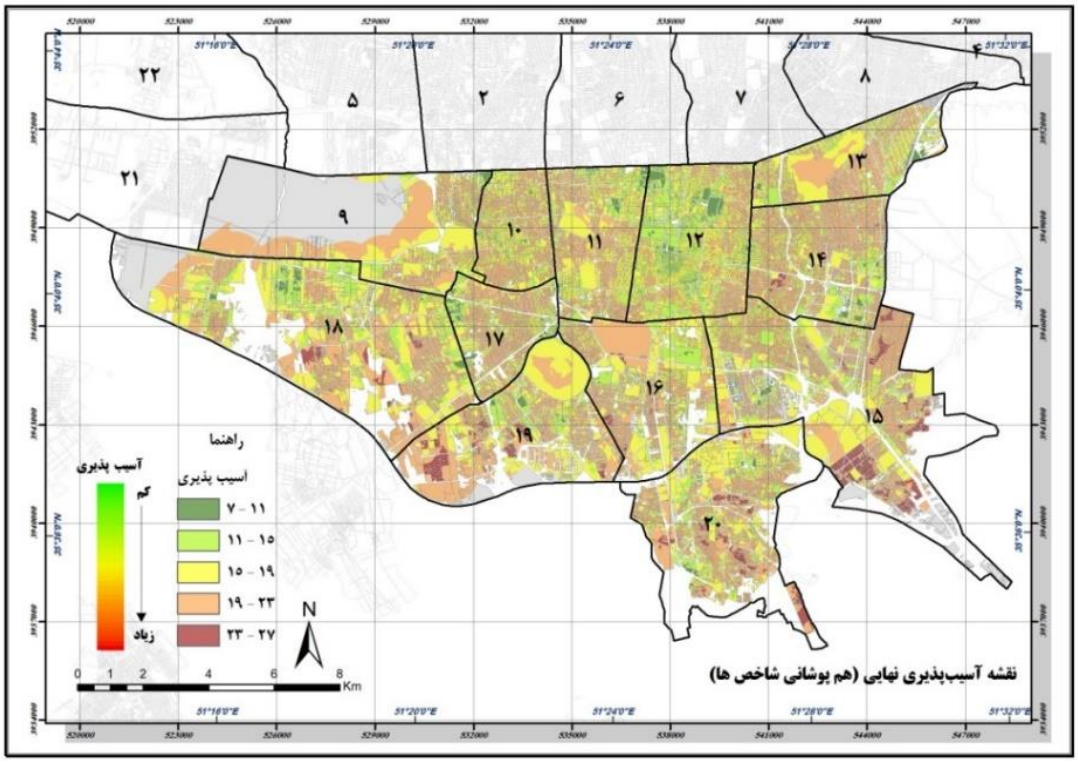


چ) نقشه میزان آسیب‌پذیری بر اساس فاصله از ایستگاه آتش‌نشانی

شکل ۲) نقشه آسیب‌پذیری منطقه مطالعاتی بر اساس شاخص‌های مورد بررسی

دلیل کاهش عدد رتبه‌بندی، شاخص‌های اختصاص امتیاز یکسان برای رتبه ۷ (عرض معبر و نوع کاربری) و رتبه ۹ (هم‌جواری بین کاربری‌ها و فاصله از مراکز درمانی) بود. همان‌طور که مشخص است، از دیدگاه صاحب‌نظران، در میان عوامل موثر در میزان آسیب‌پذیری ناشی از زمین‌لرزه، به ترتیب اولویت، بیشینه شتاب زمین، کیفیت ابنیه و فاصله از گسل بیشترین نقش را داشت و شاخص‌های توپوگرافی، تعداد طبقات و فاصله از ایستگاه آتش‌نشانی کمترین امتیاز را به خود اختصاص دادند (جدول ۲). خاطر نشان می‌سازد به دلیل تعداد زیاد نقشه‌ها امکان ارایه تمامی آنها در متن مقاله میسر نیست؛ بنابراین در ادامه، برخی از نقشه‌های تهیه‌شده به همراه توضیحات تکمیلی ارایه شده است. میزان آسیب‌پذیری ناشی از زلزله به مقاومت سازه‌ها و فاصله از گسل بستگی دارد. محدوده‌های مختلف بر اساس نزدیکی به گسل شامل گسستگی تا ۷۰۰ متر در قطعه فرا رو، ویرانی شدید تا ۳ کیلومتر و حرکات شدید تا ۱۰ کیلومتر است. تراکم جمعیتی نیز نقش مهمی در افزایش خسارات دارد، تراکم بالای جمعیت و ساختمان‌ها باعث کاهش فضاهای باز و افزایش خطرات می‌شود. آسیب‌پذیری بر اساس فاصله از فضاهای باز (۵۰-۳۰۰ متر)، مراکز درمانی (۲۰۰-۱۰۰۰ متر)، و ایستگاه‌های آتش‌نشانی (۵۰۰-۲۰۰۰ متر) ارزیابی شد. کاربری‌های شهری همچون مسکونی بیشترین و فضای سبز کمترین آسیب‌پذیری را داشتند. پارک‌ها و فضاهای باز شهری برای اسکان اضطراری و امداد مناسب هستند، و شبکه‌های ارتباطی کارآمد با عرض مناسب خسارات را کاهش می‌دهند (شکل ۲).

در نهایت و با روی‌هم‌گذاری لایه‌های اطلاعاتی می‌توان نقشه نهایی آسیب‌پذیری بر اساس شاخص‌های مستخرج را ترسیم نمود (شکل ۳).



شکل ۳) نقشه آسیب‌پذیری نهایی منطقه مطالعاتی در برابر زمین‌لرزه

بحث

این پژوهش با هدف ارزیابی و پهنه‌بندی میزان آسیب‌پذیری مناطق جنوبی شهر تهران نسبت به زمین‌لرزه انجام شد. مطالعات صورت‌گرفته نشان داد که وضعیت نامناسب اجزای کالبدی و کاربری‌های نادرست شهری، شبکه ارتباطی ناکارآمد، بافت شهری فشرده و فرسوده، تراکم شهری بالا، وضعیت نامطلوب استقرار کاربری‌های درمان و امدادرسانی، کمبود و توزیع نامناسب فضاهای باز شهری و غیره نقش اساسی در افزایش میزان آسیب‌های وارده به شهر در هنگام وقوع زمین‌لرزه دارد. برای ارزیابی آسیب‌پذیری کالبد شهر، عوامل به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- عوامل بیرونی ساختمان: عواملی که در آنها اثر زمین‌لرزه مستقیماً به خود ساختمان بر نمی‌گردد، بلکه عوامل دیگری در آسیب‌پذیری مساکن شهری در برابر زمین‌لرزه نقش دارند که شامل سازگاری و ناسازگاری کاربری‌های هم‌جوار، دسترسی به شبکه معابر، دسترسی به فضای باز، دسترسی به کاربری‌های لازم در هنگام وقوع زمین‌لرزه (بیمارستان) و تراکم جمعیت است.

- عوامل درونی ساختمان: عواملی هستند که اثر آسیب‌پذیری به خود ساختمان بر می‌گردد مانند قدمت، نوع مصالح، مساحت، طبقات و غیره.

نتایج بیانگر آن بود که مناطق ۱۵، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ در مجموع

آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به سایر مناطق مورد بررسی داشتند. این امر نشان از وجود شاخص‌های بحرانی بیشتر در این مناطق داشت. اجزای شبکه‌های ارتباطی و دسترسی شامل سلسله مراتب با تنوع و تعدد در دسترسی‌ها، نحوه دسترسی به واحدهای مسکونی در وضعیت بحرانی زمین‌لرزه، عرض، طول و شیب معابر، تناسب ارتفاع جداره‌ها، فاصله تقاطع‌ها، فضاهای باز فرود بالگرد، شبکه‌های حمل و نقل عمومی، تعداد پل‌های ارتباطی، سرانه و درصد شبکه ارتباطی نقش مهمی در فرار بازماندگان از موقعیت بحرانی ایفا می‌کنند. این مورد با مطالعات *علی‌نیا* و *خطیب* همخوانی دارد [Alinia & Khatib, 2021]. در صورت قطع دسترسی‌ها، زمان کمک‌رسانی به مصدومان با دشواری و وقفه زیاد صورت می‌پذیرد. طبیعی است که با از دست‌رفتن ساعات طلایی عملیات امداد و نجات، تعداد کشته‌شدگان نسبت به مجروحان اولیه افزایش می‌یابد. بنابراین شبکه‌های ارتباطی نقش بسیار مهمی در امداد و نجات حین و بعد از وقوع زمین‌لرزه و میزان تلفات انسانی به عهده دارند. نتایج این بخش، با مطالعات *چائو* و *لافلامه* منطبق است [Cao & Laflamme, 2017]. همچنین، با طراحی شبکه ارتباطی کارآمد می‌توان صدمات زمین‌لرزه را کاهش داد، در این راستا عرض خیابان‌ها، در کاهش زمان رسیدگی به مصدومان بسیار موثر است. همچنین بافت شهری درشت دانه موجب کاهش گره‌های ترافیکی شده و کارآمدی آن را افزایش داد. در قطعه‌بندی‌های کوچک‌تر، به علت خردشدگی فضای باز و کاسته‌شدن فضای مفید و امن برای گریز، پناه‌گیری و انجام عملیات امداد و نجات موقت، میزان آسیب‌پذیری افزایش یافته و با افزایش اندازه قطعات از میزان آسیب‌پذیری کاسته می‌شود. نتایج این بخش نیز با مطالعات *حبیبی* و همکاران و *میرحسینی* وهمکاران همخوانی دارد[Mirhosseini *et al.*, 2020; Habibi *et al.*, 2017].

نوع مصالح سازه‌ها یکی از معیارهای مهم و موثر در تعیین آسیب‌پذیری شهرها در برابر زمین‌لرزه محسوب می‌شود و بر میزان مقاومت و ابعاد استاتیکی بنا اشاره دارد. ایمنی، مرغوبیت و قابلیت مصالح ساختمانی مختلف بستگی به وضعیت اقلیمی و نوع آب و هوای هر منطقه دارد. نوع مصالح به کار رفته در ساخت واحد مسکونی یکی از شاخص‌های سنجش کیفیت مسکن محسوب می‌گردد [Gil-García & Pardo, 2005]. به طور کلی در اکثر کشورها، ساختمان‌های مسکونی ساخته‌شده از مصالح بی‌دوام، همانند "خشت و گل" و "خشت و چوب" در رده واحدهای غیرایمن قرار دارند، هرچند که در این مورد ضوابط دقیق و بین‌المللی وجود ندارد. هرچه قدمت بنا افزایش یابد، بر میزان آسیب‌پذیری آن در برابر زمین‌لرزه افزوده می‌شود. از این رو مسکن مناسب، با حداقل وضعیت سکونتی و به معنای سرپناه امن، آن چنان مسکنی است که عمر مفید فیزیکی آن به نسبت مصالح به کار رفته، به سر نیامده و با توجه به آب و هوا و اوضاع اقلیمی و ایمنی نسبی در برابر بلایای طبیعی، از مصالح بادوام ساخته شده باشد.

از نظر آسیب‌پذیری لرزه‌ای، ساختمان‌های بلند و تراکم ارتفاعی زیاد به اشکال زیر باعث افزایش آسیب‌پذیری شهر و شهروندان می‌شود:

- ساختمان‌های بلند در هنگام زمین‌لرزه به صورت یک بحران ثانویه، برای ساختمان‌های مجاور خود بوده و با فروریختن آنها، ساختمان‌های مجاور نیز آسیب می‌بینند.
- تراکم ارتفاعی زیاد در هنگام زمین‌لرزه، باعث مسدودشدن خیابان‌های هم‌جوار می‌شود.
- به علت حجم آواربرداری بسیار زیاد، عملاً نجات جان ساکنان ساختمان‌های بلند بسیار مشکل و بعضاً غیرممکن است [Lotfi *et al.*, 2022]. لذا عواملی نظیر ارتفاع و تعداد خانه‌ها نیز باید به کنترل در آیند.

در تعیین تعداد طبقات باید به نوع سازه بنا توجه شود، بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ زمین‌لرزه ایران، محدودیت ارتفاع ساختمان و تعداد طبقات آن تعیین شده است. به عنوان مثال در ساختمان‌های با مصالح بنایی حداکثر تعداد طبقات بدون احتساب زیرزمین برابر ۲ طبقه است [Ahadnejad *et al.*, 2021]. در قطعه‌بندی‌های کوچک‌تر، به علت خردشدگی فضای باز و کاسته‌شدن فضای مفید و امن برای گریز، پناه‌گیری و انجام عملیات امداد و نجات موقت میزان آسیب‌پذیری افزایش یافته و با افزایش اندازه قطعات از میزان آسیب‌پذیری کاسته می‌شود؛ به گونه‌ای که قطعات کمتر از ۲۰۰ متر مربع از بیشترین و قطعات بالای ۵۰۰ متر مربع از کمترین میزان آسیب‌پذیری برخوردارند [Azim & Islam, 2016]. بنابراین با افزایش نسبت سطح ساخته‌شده به کل سطح زمین یا به فضای باز، آسیب‌پذیری فضای باز ناشی از ریزش آوار ساختمان‌ها و غیرقابل استفاده‌شدن بافت، افزایش می‌یابد. شاخص مهمی است که با بیشترشدن آن احتمال تخریب و آسیب‌پذیری بیشتر می‌شود، از میان‌رفتن فضای سبز و باغ‌ها و تبدیل آنها به مجموعه‌های پرتراکم علاوه بر اینکه سبب اُفت کیفیت زیستی و نابودی منابع زیست‌محیطی می‌گردد، توزیع نامناسب فضاهای باز را نیز به دنبال دارد و استقرار آسیب‌دیدگان زمین‌لرزه (اسکان موقت) را با چالشی جدی مواجه می‌سازد.

بدیهی است که یکی از وظایف اصلی برنامه‌ریزان شهری تلاش برای تبدیل شهر به محیطی آرام، ایمن و مقاوم است که سلامت شهروندان ساکن در آن حفظ شود [Mirhosseini *et al.*, 2020]. در این میان برنامه‌ریزی کالبدی و در همان راستا برنامه‌ریزی کاربری اراضی به عنوان ابزاری قدرتمند در دست مدیران شهری نقشی مهم در افزایش تاب‌آوری جوامع شهری دارد. در حقیقت برنامه‌ریزی کاربری اراضی صحیح و عادلانه گرچه آسیب‌پذیری شهر در برابر بحران‌ها را به طور کامل برطرف نمی‌کند، ولی کاهش می‌دهد [León & March, 2014]. برخی کارشناسان معتقدند برنامه‌ریزی کاربری زمین با اثراتی مانند اجتناب از شکل‌گیری محلات بد از طریق جداسازی کاربری‌های معین از یکدیگر و هدایت گسترش به سمت نواحی دور از خطر، ابزاری کارآمد در دست برنامه‌ریزان شهری برای حداقل‌سازی احتمال خطر است، با این حال امکان کنترل و یا پیش‌بینی دقیق بحران‌های طبیعی وجود ندارد و آنچه امکان‌پذیر

است، گام‌برداشتن در مسیر ساخت شهرهای تاب‌آورتر در مواجهه با بحران زمین‌لرزه است [Moehle *et al.,* 2009].

از جمله محدودیت‌های پژوهش حاضر، می‌توان به فقدان داده‌های دقیق مربوط به دوره‌های زمانی گذشته اشاره داشت، که امکان مقایسه تطبیقی در یک بازه زمانی را به محقق نمی‌دهد.

در انتها، پیشنهاد می‌شود با توجه به نتایج مستخرج از این مطالعه، نسبت به حذف یا کاهش عوامل اثرگذار منفی اقدام صورت گیرد تا بتوان از میزان آسیب‌های ناشی از زمین‌لرزه احتمالی در این بخش از شهر کاست. به علاوه، از طریق طراحی سامانه هوشمند می‌توان نسبت به پایش مداوم منطقه مورد مطالعه اقدام کرد.

نتیجه‌گیری

مناطق مورد بررسی در این تحقیق، به دلیل کاربری‌های متنوع و متعدد، برخورداری از بافت فرسوده و فشرده و سایر پارامترهای اثرگذار، از پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی در برابر زمین‌لرزه برخوردار هستند.

تشکر و قدردانی: شایسته است از جناب آقای دکتر مهران احسانی به پاس همکاری و مشاوره تخصصی در این مقاله تشکر و قدردانی گردد. همچنین از مرکز مطالعات مدیریت شهری تهران بابت در اختیار قراردادن لایه‌های جغرافیایی شهر تهران کمال سپاسگزاری را دارم.

تاییدیه اخلاقی: نیازی برای کسب کد اخلاق نبوده است.

تعارض منافع: تعارض منافع ندارد.

سهم نویسندگان: کتایون رضایی پرتو تمامی امور مقاله را انجام داده است (۱۰۰٪)

منابع مالی: تمامی هزینه‌ها توسط نگارنده پرداخت شده است و فاقد حامی مالی بوده است.

منابع

- Ahadnejad M, Tahmasebi Moghaddam H, Heydari MT, Teymouri A (2021). An analysis of the metamorphosis spatial organization of the urban system of Zanjan province. Journal of Regional Planning. 11(42):63-80. [Persian]
- Akhani M, Kashani AR, Mousavi M, Gandomi AH (2019). A hybrid computational intelligence approach to predict spectral acceleration. Measurement. 138:578-589.
- Alinia H, Khatib MM (2021). Investigation of seismic parameters, calculation of seismic moment and geologic moment Kopeh-Dagh zone in Northeast of Iran. Journal of Natural Environment Hazards. 10(27):177-196. [Persian]
- Azim MT, Islam MM (2016). Earthquake preparedness of households in Jeddah, Saudi Arabia: AS perceptual study. Environmental Hazards. 15(3):189-208.
- Behrouzi H, Zand Moghadam MR, Kamyabi S (2022). Modeling the resilience of the city against natural hazards with emphasis on landslide (case study: Ghaemshahr city). Geographical Research. 37(3):339-349. [Persian]
- Borja J (2007). Counterpoint: Intelligent cities and innovative cities. Barcelona: UOC Open University of Catalonia; 5.
- Burton HV, Sreekumar S, Sharma M, Sun H (2017). Estimating aftershock collapse vulnerability using mainshock intensity, structural response and physical damage indicators. Structural Safety. 68:85-96.
- Cao L, Laflamme S (2017). Real-time variable multidelay controller for multihazard mitigation. Journal of Engineering Mechanic. 144(2).
- Chelidze T, Zhukova N, Matcharashvili T (2018). Phase space portraits of earthquake time series of caucasus: Signatures of strong earthquake preparation. In: Complexity of seismic time series: Measurement and application. Amsterdam: Elsevier. p. 419-436.
- Deakin M (2013). From intelligent to smart cities. In: Smart cities: Governing, modelling and analysing the transition. London: Routledge.
- Deakin M, Allwinkle S (2007). Urban regeneration and sustainable communities: The role of networks, innovation and creativity in building successful partnerships. Journal of Urban Technology. 14(1):77-91.
- Dutta V (2012). War on the dream-How land use dynamics and peri-urban growth characteristics of a sprawling city devour the master plan and urban suitability? A fuzzy multi-criteria decision making approach. Proceeded of the 13th Global Development Conference. Budapest: Global Development Network.
- Ehsani M, Bahmanpour H (2018). Underground transportation system risk assessment to mitigate vulnerability against natural disasters through intelligent urban management. International Journal of Human Capital in Urban Management. 3(3):179-192.
- Fahim Danesh S, Hafezi M, Sadeghi H, Ghafori M (2017). Investigation of earthquake and earthquake hazard in buildings of Tehran city in a probabilistic way. Urban Management. 16(3):99-106. [Persian]
- Folke C, Carpenter S, Elmqvist T, Gunderson L, Holling CS, Walker B (2002). Resilience and sustainable development: Building adaptive capacity in a world of transformations. Ambio. 31(5):437-440.
- Gil-García J, Pardo TA (2005). E-government success factors: Mapping practical tools to theoretical foundations. Government Information Quarterly. 22(2):187-216.
- Goltz JD, Bourque LB (2017). Earthquakes and human behavior: A sociological perspective. International Journal of Disaster Risk Reduction. 21:251-265.
- Habibi K, Ezzati M, Torabi K, Ezatpanah B (2017). Investigating the urban vulnerability against earthquake using MIHWP model-case study: 10th zone of Tabriz. Geography and Planning. 20(58):101-118. [Persian]
- Habibi K, Rahimi A (2013). Asseeement of land use ecological footprint in an Iranian small city. ARMANSHAHR. 5(10):191-200. [Persian]
- Habibi SM, Hosseinzadeh M (2021). Social and cultural challenges of managing vulnerable urban textures (case study: Hasir Foroushan neighborhood from the old texture of Babol). HOVIATESHAHR. 15(46):45-58. [Persian]
- Hollands RG (2008). Will the real smart city please stand up?. City. 12(3):303-320.
- Houshyar H, Ramazantash Dehgorje H (2022). The status QUO analysis of the buildings vulnerability in the city of Oshnavieh to earthquake. Geographical Research. 37(2):189-199. [Persian]
- Jahankhah M, Delavar MR, Moshiri B, Zare M (2012). Tehran seismic vulnerability assessment due to the north city fault by a multi attribute decision making approach based on evidential reasoning. Geosciences. 22(85):159-166. [Persian]
- Janssena MA, Schoon ML, Ke W, Börner K (2006).

Proceedings of the NZSEE Conference. Wellington: New Zealand Society for Earthquake Engineering.
- Moradi Tayebi F, Motaghed S, Dastanian R (2020). Nature evaluation and time series prediction of Tehran earthquakes. Quranic Knowledge Research. 20(3):147-160. [Persian]
- Shieh E, Habibi K, Ehsani M (2020). Risk assessment of Tehran subway stations during earthquakes with an approach to reduce physical vulnerability through intelligent urban management (case study: Tajrish, Darvazeh Shemiran, and Navab subway stations). Iranian Architechture and urbanism. 11(19):209-229. [Persian]
- UN HABITAT (2003). The challenge of slums-global report on human settlements. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme.
- UNDP-BCPR (2015). Reducing disaster risk: A challenge for development. New York: United Nations Development Programme Bureau for Crisis Prevention and Recovery.
- Zheng YG, Huang J, Sun YH, Sun JQ (2018). Building vibration control by active mass damper with delayed acceleration feedback: Multi-objective optimal design and experimental validation. Journal of Vibration and Acoustics. 140(4):041002.
Scholarly network on resilience vulnerability and adaption within the human dimensions of global environment change. Global Environmental Change. 16(3):240-252.
- León J, March A (2014). Urban morphology as a tool for supporting tsunami rapid resilience: A case study of Talcahuano, Chile. Habitat International. 43:250-262.
- Liang Y, Cheng J, Ruzek JI, Liu Z (2019). Posttraumatic stress disorder following the 2008 Wenchuan earthquake: A 10-year systematic review among highly exposed populations in China. Journal of Affective Disorders. 243:327-339.
- Lotfi H, Noori Kermani A, Ziari K (2022). Spatial analysis of physical resilience components of Ilam City against earthquake with a futuristic approach. Geographical Research. 37(1):141-153. [Persian]
- Mirhosseini SF, Hajebrahim Zargar A, Motavaf S (2020). An assessment of the vulnerability of Tehran's Farahzad district in a possible earthquake. SOFFEH. 30(90):95-112. [Persian]
- Moehle J, Barkley C, Boniwitz D, Karlinsky S, Maffei J, Polland C (2009). The resilient city-A way of thinking about preparedness, mitigation, and rebuilding.