

Original Article

Iranian Remote Sensing and GIS
Journal of Sensing

Investigating Urban Vulnerability against Earthquakes Using GIS and BWM Model (Case Study: A Part of the Tabriz Metropolis)

Sara Beheshtifar* and Siamak Bakhshalipour Gavgani

Affiliation

Surveying and Geomatics
Engineering Department,
Faculty of Civil Engineering,
Tabriz University, Tabriz,
Iran

ABSTRACT

Introduction: Earthquakes are natural hazards that often cause significant loss of life and property due to their unexpected nature. Urbanization has led to increased population density in cities, along with greater building density and more facilities, which has heightened vulnerability to earthquakes and put more lives and property at risk. While earthquakes cannot be prevented, identifying vulnerable areas can help mitigate their impact. This study assesses the earthquake vulnerability in Tabriz.

Material and Methods: The study is located in district 2 of Tabriz Metropolitan Municipality. District 2 is notable in Tabriz for its social, economic, and physical characteristics. The criteria affecting the vulnerability of the urban fabric to earthquakes were identified, and relevant information was collected to determine the level of vulnerability. These criteria include the age of the buildings, type of materials, quality of the buildings, number of floors, population density, distance from faults, roads, open spaces, and building area. The most and least important criteria were identified, and their weights were assigned using the best-worst model, a modern method for multi-criteria decision-making. This method requires fewer comparisons and yields more stable results than analytic hierarchy process (AHP), and was addressed in this study using the Simplex linear programming method. A map for each criterion was prepared in a GIS environment. The value of each parcel was calculated using the best-worst method, considering the research objective.

Discussion: The criteria weights were carefully determined by the process of prioritizing building quality as the most important factor and building area as the least important factor, thereby yielding weights with an inconsistency ratio of 0.06, which is considered acceptable and reflects a reasonable level of consistency in the decision-making process. By calculating the weight of each parcel and computing their average in each area, the safest and most vulnerable areas were determined for each criterion. Other areas were compared against these two areas across each criterion. Final values and rankings were determined by accounting for the weight of each criterion and the weight of each area within it. This study identified the best and worst areas for each criterion using spatial analysis and calculation results, unlike the conventional Best-Worst Model, which typically relies on expert opinions to define them. This method was chosen because it best suited the specific requirements of the problem. Areas 6 and 2 show the lowest and highest vulnerability to earthquakes, respectively. The high sensitivity is related to the weights assigned to the distance from open spaces and roads. Increasing these weights by 2.5×10^{-5} and 3.5×10^{-5} , respectively, would result in a change in the current solution.

Conclusion: Earthquakes represent a natural hazard that constantly threatens our country. Assessing urban seismic vulnerability and planning can significantly reduce earthquake losses in lives and property. This study assessed the earthquake vulnerability of a section in the municipal district 2 of Tabriz. The results indicate that Area 2 is the most earthquake-vulnerable region, centrally located within the studied area. This area was the most vulnerable of the nine areas regarding build quality, age of buildings, materials used, and access to open spaces. Area 2 covers approximately 16% of the total area and comprises 1,815 parcels, most classified as high or very high-vulnerable. This study determined not only the weights of the criteria but also their allowable change. Within sensitivity analysis, determining the allowable change of these weights informs decision-makers about the flexibility of variable values.

Keywords: vulnerability map, earthquake, geographic information system (GIS), multi-criteria decision making, best-worst method (BWM).

Citation:

Beheshtifar, S., Bakhshalipour Gavgani, S., Investigating Urban Vulnerability against Earthquakes Using GIS and BWM Model (Case Study: A Part of the Tabriz Metropolis), *Iran J Remote Sens GIS*. 17(2):37-54.





بررسی آسیب‌پذیری شهری در برابر زلزله با استفاده از GIS و مدل BWM (مطالعه موردی: بخشی از منطقه ۲ کلان‌شهر تبریز) سارا بهشتی‌فر^۱ و سیامک بخشعلی‌پور گاوگانی

سمت

گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

سابقه و هدف: زلزله یکی از مخاطرات طبیعی است که به دلیل ماهیت نامنظرداش، اغلب خسارات جانی و مالی فراوانی بر جای می‌گذارد. با رشد سریع شهرنشینی و به تبع آن، تمرکز جمعیت بیشتر در شهرها و همچنین افزایش تراکم ساختمان‌ها و تعداد تأسیسات، آسیب‌پذیری آنها نیز در برابر زلزله افزایش یافته و جان و مال افراد بیشتری در معرض خطر قرار گرفته است. در حال حاضر راهی برای پیشگیری از وقوع زلزله وجود ندارد اما، با راهکارهایی همچون شناسایی مناطق آسیب‌پذیر، می‌توان خسارات ناشی از آن را تا حدی کاهش داد. در این تحقیق، میزان آسیب‌پذیری بخشی از شهر تبریز در برابر این رخداد بررسی شده است.

مواد و روش‌ها: منطقه مورد مطالعه، در این تحقیق، بخشی از محدوده مربوط به شهرداری منطقه ۲ کلان‌شهر تبریز است. منطقه ۲ شهرداری در جنوب و جنوب‌شرق شهر تبریز واقع شده و با توجه به ویژگی‌های اجتماعی، اقتصادی و کالبدی آن، یکی از مناطق مهم شهر تبریز به شمار می‌رود. برای تعیین میزان آسیب‌پذیری، ابتدا معیارهای مؤثر در آسیب‌پذیری بافت شهری در برابر زلزله شناسایی و اطلاعات مورد نظر جمع‌آوری شد. این معیارها شامل قدمت ابنیه، نوع مصالح، کیفیت ابنیه، تعداد طبقات، تراکم جمعیت، فاصله از گسل، فاصله از معابر، فاصله از فضاهای باز و مساحت بناست. سپس مهم‌ترین و کم‌اهمیت‌ترین معیار مشخص و پس از مقایسه‌های مرجع، وزن هر معیار براساس مدل بهترین-بدترین که از روش‌های نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره است، محاسبه شد. روش یادشده، در مقایسه با فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، به مقایسه‌های کمتری نیاز دارد و با استفاده از آن، نتایج پایدارتری حاصل می‌شود؛ در این پژوهش، برای حل مدل مذکور، از روش برنامه‌ریزی خطی سیمپلکس استفاده شد. با توجه به ماهیت مکانی معیارها، نقشه‌های هر معیار (شاخص) در محیط GIS آماده‌سازی شدند. سپس ارزش هر قطعه ملکی (پارسل)، با توجه به هدف تحقیق و وضعیت آن قطعه در شاخص مورد نظر، با روش بهترین-بدترین به دست آمد.

نتایج و بحث: برای تعیین وزن معیارها، کیفیت ابنیه به‌منزله مهم‌ترین معیار و مساحت قطعات به‌منزله کم‌اهمیت‌ترین معیار در نظر گرفته شد و وزن‌ها با نرخ ناسازگاری ۰/۰۶ به دست آمد. پس از محاسبه وزن هر قطعه ملکی و محاسبه میانگین آنها در هر ناحیه، امن‌ترین و آسیب‌پذیرترین ناحیه به‌ازای هر شاخص مشخص شد. سپس سایر ناحیه‌ها با این دو ناحیه، در هر شاخص، مقایسه شدند. با در نظر گرفتن وزن هر معیار و ناحیه به‌ازای هر معیار، مقدار و رتبه نهایی هر ناحیه به دست آمد. برخلاف نسخه اصلی مدل که بهترین و بدترین معیار براساس نظر کارشناسی در آن تعیین می‌شود، در پژوهش حاضر با توجه به ماهیت مسئله، بهترین و بدترین ناحیه به‌ازای هر معیار، به‌جای نظر کارشناسی، با توجه به تحلیل‌های مکانی و نتایج محاسبات مشخص شد. ناحیه‌های شماره ۶ و ۲، به ترتیب، کمترین و بیشترین احتمال آسیب‌پذیری در برابر زلزله را دارند. بیشترین حساسیت، به ترتیب، به وزن معیارهای فاصله از فضاهای باز و فاصله از معابر بازمی‌گردد که اگر مقدار آنها به‌میزان $10^{-5} \times 2/5$ و $10^{-5} \times 3/5$ افزایش یابد، به تغییر پاسخ فعلی منجر می‌شود.

نتیجه‌گیری: زلزله یکی از مخاطرات طبیعی است که کشور ما را دائماً تهدید می‌کند. تعیین میزان آسیب‌پذیری بافت‌های شهری در برابر زلزله و برنامه‌ریزی براساس آن می‌تواند نقش مهمی در کاهش تلفات جانی و مالی ناشی از وقوع این پدیده داشته باشد. در این پژوهش، میزان آسیب‌پذیری احتمالی برآثر زمین‌لرزه، در بخشی از منطقه ۲ شهر تبریز، بررسی شد. براساس نتایج حاصل، ناحیه شماره ۲ بیشترین میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله را دارد که تقریباً در بخش میانی منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است. این ناحیه، به‌لحاظ معیارهای کیفیت ابنیه، قدمت ابنیه، مصالح مورد استفاده و دسترسی به فضاهای باز، آسیب‌پذیرترین بخش در بین نه ناحیه بوده است. ناحیه ۲ حدود ۱۶٪ از کل منطقه را به خود اختصاص داده و شامل ۱۸۱۵ قطعه ملکی است. براساس قطعات ملکی نیز، بیشتر قطعات واقع در این ناحیه آسیب‌پذیری بسیار بالا یا بالا دارند. در پژوهش حاضر، علاوه بر خود وزن، مقدار تغییر مجاز آن نیز به دست آمد. در زمینه تحلیل حساسیت، مقدار تغییر مجاز یک متغیر (در این پژوهش، وزن معیار) به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند از میزان انعطاف‌پذیری مقادیر متغیرها آگاهی یابند.

واژه‌های کلیدی: نقشه آسیب‌پذیری، زلزله، سیستم اطلاعات مکانی (GIS)، تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش بهترین-بدترین (BMW).

استناد:

بهشتی‌فر، س.، بخشعلی‌پور گاوگانی، س.، بررسی آسیب‌پذیری شهری در برابر زلزله با استفاده از GIS و مدل BWM (مطالعه موردی: بخشی از منطقه ۲ کلان‌شهر تبریز)، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۷، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴: ۳۷-۵۴.

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: s.Beheshtifar@tabrizu.ac.ir

شناسه دیجیتال مقالات: https://doi.org/10.48308/gisj.2025.230044.1138



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.

۱- مقدمه

زلزله از پرمخاطره‌ترین بلایای طبیعی در عصر حاضر شناخته شده است که در مدت زمان کوتاهی، به لحاظ روانی، جانی و مالی، خسارات جبران‌ناپذیری بر جوامع انسانی تحمیل می‌کند (Isalou et al., 2017). در این بین، به دلیل رشد سریع شهرنشینی و به تبع آن، تمرکز جمعیت بیشتر و همچنین ساختمان‌ها و تأسیسات پرشمار در شهرها، آسیب‌پذیری این مکان‌ها در برابر زلزله افزایش یافته و جان و مال افراد بیشتری در معرض خطر قرار گرفته است (Arvin et al., 2018). در قرن بیستم، بیش از ۱۱۰۰ زلزله مخرب در نقاط گوناگون کره زمین روی داده است که حدود ۶/۱۷٪ این وقایع به کشور ما اختصاص دارد (Fazel et al., 2017). ۹۰٪ شهرهای کشور در برابر زلزله‌های پنج‌ریشتری آسیب‌پذیرند (Mousavi et al., 2015).

اگرچه در شرایط کنونی پیشگویی زمان و مکان دقیق زمین‌لرزه‌ها و یا پیشگیری از وقوع آنها امکان‌پذیر نیست، با مطالعات دقیق و شناسایی میزان آسیب‌پذیری مناطق گوناگون می‌توان خسارات ناشی از چنین حوادثی را تا حدی کاهش داد. شناخت فضاهای شهری و تعیین میزان آسیب‌پذیری آنها در برابر زلزله می‌تواند راهی کارآمد، به‌منظور کاهش خسارات و همچنین انجام دادن اقدامات مناسب پس از بحران باشد (Hernantes et al., 2019). بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای مستلزم بررسی معیارهای متعددی است که اغلب آنها ماهیت مکانی دارند. از این‌رو استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط سیستم اطلاعات مکانی (GIS)^۱ می‌تواند راهکار مناسبی برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری و شناسایی مناطق با آسیب‌پذیری بالا در برابر زلزله باشد (Jena et al., 2022).

تا کنون طی مطالعات متفاوتی، با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط GIS، میزان آسیب‌پذیری شهری در برابر زمین‌لرزه بررسی شده که در ادامه، به برخی از آنها اشاره شده است. لاله‌پور^۲ و همکاران (۲۰۲۲) آسیب‌پذیری کالبدی

محللات شهر ورزقان در مقابل زلزله را بررسی و برای وزن‌دهی شاخص‌ها، از روش ANP استفاده کردند. نتایج تحلیل و هم‌پوشانی لایه‌ها در محیط GIS نشان داد بخش‌های شایان توجهی از شهر ورزقان در کلاس‌های آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد واقع شده است. کامل^۳ (۲۰۱۱)، با تلفیق GIS و MCDM، وضعیت منطقه ۱ شهرداری تبریز را از نظر میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله، بررسی و نواحی آسیب‌پذیر را مشخص کرد. در این تحقیق، از داده‌هایی همانند زمین‌شناسی، شیب، شبکه معابر شهری، کاربری‌ها، تأسیسات و تجهیزات شهری، جمعیت و مشخصات سازه‌ای استفاده شد. براساس نتایج، بخش‌های شمالی و شرقی منطقه ۱ محدوده‌های بحرانی‌اند که حدود ۵۰٪ جمعیت و ساختمان‌های منطقه در این بخش واقع‌اند.

از میان روش‌های گوناگون تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)^۴ بیشتر از دیگر روش‌ها برای بررسی آسیب‌پذیری شهری در برابر بحران زلزله مورد توجه قرار گرفته است. برای نمونه، اوطاری و اربابی سبزواری^۵ (۲۰۱۷) در منطقه ۱۳ شهر تهران، مقدمی و علیزاده^۶ (۲۰۱۷) در شهر جاجرم، حقوقی‌فرد^۷ و همکاران (۲۰۱۷) در منطقه ۳ شهرداری شیراز، احدنژاد رشتی و حیدری^۸ (۲۰۰۹) در شهر زنجان، نیرآبادی و کهنانی^۹ (۲۰۱۰) در شهر نیشابور، عیدی‌وندی و خسروی^{۱۰} (۲۰۱۹) در زرین‌شهر، سرور^{۱۱} (۲۰۱۹) در منطقه ۱ شهر تبریز، تودس و ایگیتیر^{۱۲} (۲۰۰۹)

1. Geo-Spatial Information System
2. Lalehpour
3. Kamel
4. Analytical Hierarchy Process (AHP)
5. Otari & Arbab Sabzevari
6. Moghaddami & Alizadeh
7. Hoghoghifard
8. Ahadnejad Roshti & Heidari
9. Nirabadi & Kohbanani
10. Eidivandi & Khosravi
11. Sarvar
12. Tudes & Yigiter

با ادغام GIS و S-BWM^{۱۲}، مدلی جدید را برای ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش پیشنهاد کردند و قابلیت مدل خود را در مطالعه‌ای موردی، برای منطقه‌ی ارزروم، بررسی کردند.

در این پژوهش، با روش بهترین و بدترین (BWM) در محیط GIS، میزان آسیب‌پذیری بخشی از شهر تبریز در برابر زلزله پهنه‌بندی شده است. در مطالعات پیشین، روش BWM صرفاً برای تعیین وزن معیارها به کار رفته اما در پژوهش حاضر علاوه‌بر آن برای طبقه‌بندی نقشه‌های معیارها (زیرمعیارها) و مقایسه‌ی بخش‌های گوناگون منطقه‌ی مورد مطالعه، از نظر آسیب‌پذیری نیز، مدل یادشده استفاده شد. به عبارتی، تمامی مراحل تعیین میزان آسیب‌پذیری براساس همین مدل انجام شد. همچنین میزان مورد قبول برای تغییر وزن هر معیار مشخص شد.

۲- مواد و روش‌ها

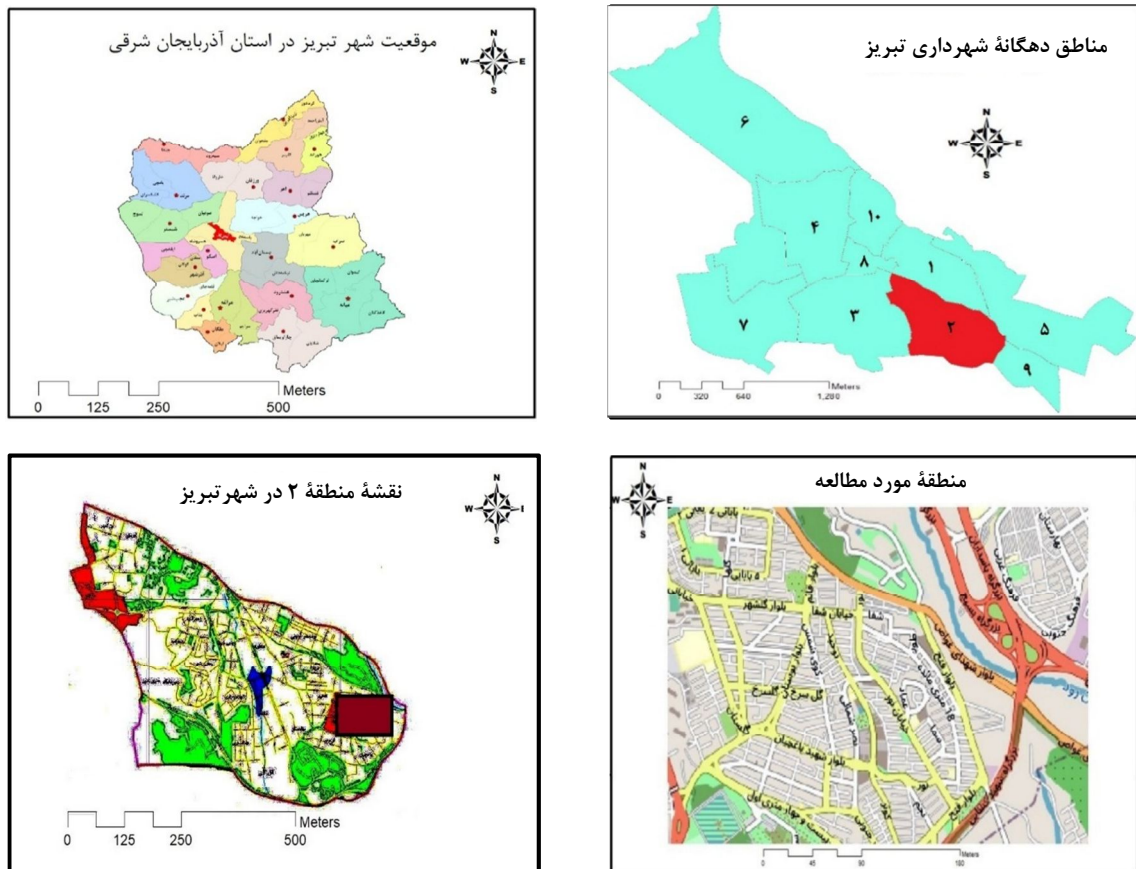
۲-۱- منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه، در این تحقیق، بخشی از محدوده‌ی شهرداری منطقه‌ی ۲ کلان‌شهر تبریز است. منطقه‌ی ۲ شهرداری در جنوب و جنوب‌شرق شهر تبریز قرار دارد. این منطقه، با توجه به ویژگی‌های اجتماعی، اقتصادی و کالبدی، از مناطق مهم شهر تبریز به شمار می‌رود. شکل ۱ محدوده‌ی مورد مطالعه و موقعیت آن در استان آذربایجان شرقی و شهر تبریز را نشان می‌دهد.

در شهر آدنا‌ی ترکیه، البولسکو^۱ و همکاران (۲۰۱۹) در شهر گالاتوی رومانی، و علم و حقی^۲ (۲۰۱۸) در شهر میمنسینگ کشور بنگلادش نقشه‌ی آسیب‌پذیری در برابر زلزله را با استفاده از روش مورد اشاره تهیه کرده‌اند.

AHP یکی از محبوب‌ترین روش‌های MCDM است اما لزوم مقایسه‌ی هر زوج از شاخص‌ها با یکدیگر در این روش، به‌ویژه زمانی که تعداد شاخص‌ها (معیارها) زیاد باشد، علاوه‌بر نیاز به صرف زمان و محاسبه‌ی بسیار، باعث سردرگمی کارشناس و در نتیجه، افزایش نرخ ناسازگاری می‌شود. در مقابل، در روش تقریباً جدید BWM^۳ که رضایی^۴ (۲۰۱۵) پیشنهاد داده است، به مقایسه‌های کمتری نیاز است و با استفاده از آن، نتایج پایدارتری حاصل می‌شود. در سال‌های اخیر، این روش در زمینه‌های متفاوتی به کار رفته است. برای نمونه، ارکانی و حاتمی‌نژاد^۵ (۲۰۲۰) با تلفیق روش BWM و دلفی فازی، وزن عوامل مؤثر در افزایش ریسک زلزله در بافت‌های فرسوده‌ی شهری را تعیین کردند. اما در تحقیق مذکور، منطقه‌ی مطالعاتی خاصی مدنظر قرار نگرفته و میزان آسیب‌پذیری به‌صورت مکانی بررسی نشده است. اُزمن^۶ (۲۰۲۳)، در راستای ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در شهر کایسری کشور ترکیه، از روش BWM خطی برای تعیین وزن معیارهای منتخب و از روش ABAC^۷ برای ارزیابی مناطق بهره‌برد و اظهار کرد روش ترکیبی BWM-ABAC نتایج ارزشمندی دربردارد. مهرنور^۸ و همکاران (۲۰۲۳)، برای پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست زمین در دشت هشتگرد، از تلفیق مدل BWM با روش هم‌پوشانی شاخص وزن‌دار استفاده کردند. نیمبیل و اردن^۹ (۲۰۲۱) با روش یادشده و بهره‌گیری از دیدگاه‌های دو گروه از کارشناسان، معیارهای انتخاب محل مناسب برای استقرار تسهیلات اضطراری را وزن‌دهی کردند. آق‌طاهر^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۲)، با روش BWM فازی، سطح تناسب مکان‌ها در مرحله‌ی پاسخگویی به زلزله را در مناطق ۳، ۶ و ۷ تهران مشخص کردند. کنورهان^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۳)،

1. Albulescu
2. Alam & Haque
3. Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method (BWM)
4. Rezaei
5. Arkani & Hatami Nejad
6. Özmen
7. Alternative by Alternative Comparison (ABAC)
8. Mehrnoor
9. Nyimbil & Erden
10. Aghataher
11. Konurhan
12. Stratified Best-Worst Method (S-BWM)



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

۲-۲- مدل بهترین-بدترین

در پژوهش حاضر، از روش بهترین-بدترین استفاده شد که رضایی آن را در سال ۲۰۱۵ معرفی کرده است. این شیوه از تکنیک‌های نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره محسوب می‌شود که در زمره مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه قرار می‌گیرد و به دلیل کارایی بالای آن، در سال‌های اخیر، مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است (Mi et al., 2019). در متداول‌ترین شیوه تصمیم‌گیری چندمعیاره، یعنی روش تحلیل سلسله‌مراتبی، بین تمامی شاخص‌ها مقایسه‌های زوجی انجام می‌شود اما، در روش بهترین-بدترین، ابتدا تصمیم‌گیرنده بهترین و بدترین شاخص را تعیین

می‌کند و بین هر یک از این دو شاخص (بهترین و بدترین) و دیگر شاخص‌ها، مقایسه‌های مرجع انجام می‌شود و عددی بین ۱ تا ۹ به آنها اختصاص می‌یابد (جدول ۱)؛ به این ترتیب، تعداد مقایسه‌های زوجی مورد نیاز از $m(m-1)/2$ به $(2m-3)$ کاهش می‌یابد و m تعداد شاخص‌هاست. آنگاه مسئله تبدیل به مسئله‌ای در زمینه برنامه‌ریزی خطی می‌شود و با حل مسئله‌ای حداقل-حداکثر، وزن شاخص‌های گوناگون مشخص می‌شود (Rezaei, 2015). به این ترتیب، مزایای این روش بر روش‌هایی مانند AHP نیاز به تعداد مقایسه‌های کمتر و در نتیجه، دستیابی به مقایسه‌های سازگارتر است.

جدول ۱. اعداد متناظر با انواع ترجیحات در مقایسه‌های زوجی

ترجیحات	ترجیح یکسان	کمی مرجح	ترجیح قوی	ترجیح خیلی قوی	کاملاً مرجح	ترجیحات بینابین
میزان اهمیت	۱	۳	۵	۷	۹	۲، ۴، ۶، ۸

مراحل روش بهترین-بدترین:

- تعیین معیارهای مؤثر در تصمیم‌گیری؛
- انتخاب بهترین و بدترین معیار (در پژوهش حاضر، این معیارها به ترتیب مهم‌ترین و کم‌اهمیت‌ترین معیار در بررسی میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله در نظر گرفته شده‌اند)؛
- تعیین میزان برتری بهترین معیار بر سایر معیارها (بردار BO) با اعداد صحیح ۱ تا ۹ (a_{Bj} : میزان برتری بهترین معیار بر معیار j) $BO = (a_{B1}; a_{B2}; \dots a_{Bn})$
- تعیین میزان برتری هر معیار بر بدترین معیار (بردار OW) با اعداد صحیح ۱ تا ۹ (a_{jW} : برتری معیار j بر بدترین معیار) $OW = (a_{1W}; a_{2W}; \dots a_{nW})^T$
- محاسبه وزن‌های بهینه؛ وزن بهینه برای معیارها با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود. به‌جای این معادله غیرخطی، می‌توان کمینه‌سازی را مطابق رابطه (۲) انجام داد که در آن ξ نشان‌دهنده بیشترین انحراف است (در حالت سازگار، $\frac{w_B}{w_j}$ برابر a_{Bj} و $\frac{w_j}{w_W}$ برابر a_{jW} است که این اختلاف‌ها، طی روند بهینه‌سازی، کمینه می‌شوند.

$$\min \max \left\{ \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \right\}$$

$$\sum_j w_j = 1, \quad w_j \geq 0, \quad \forall j \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\min \xi;$$

$$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi;$$

$$\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \xi;$$

$$\sum_j w_j = 1, \quad w_j \geq 0, \quad \forall j \quad \text{رابطه (۲)}$$

ξ متغیری است که در محاسبه نرخ سازگاری در مرحله بعد به کار می‌رود و مقدار بهینه آن، یعنی ξ^* طی تکرارهای متوالی به‌همراه وزن معیارها محاسبه می‌شود.

- محاسبه نرخ ناسازگاری با رابطه (۳)

رابطه (۳) شاخص سازگاری $\xi^*/1 =$ نرخ ناسازگاری در واقع، مقایسه زمانی کاملاً سازگار است که رابطه ذیل در مورد تمامی j ها برقرار باشد.

$$a_{BW} = a_{Bj} \times a_{jW} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه (۴)، a_{Bj} ، a_{jW} و a_{BW} به ترتیب اولویت‌های بهترین معیار بر معیار j ، اولویت معیار j بر بدترین معیار و اولویت بهترین معیار بر بدترین معیارند. با در نظر گرفتن این رابطه، می‌توان حداکثر مقدار ξ را به دست آورد. نرخ سازگاری عددی بین صفر و یک است که هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، به این معنی است که مقایسه‌ها سازگاری و ثبات بیشتری داشته‌اند. در جدول ۲، شاخص سازگاری برای حالت‌های متفاوت نشان داده شده است.

۳-۲- معیار (شاخص)های تعیین میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله

در آسیب‌پذیری بافت‌های شهری، عوامل و عناصر گوناگونی مؤثر است که نادیده گرفتن آنها هم به ایجاد خسارت‌های فراوان مالی به افراد و سازمان‌ها منجر می‌شود و هم جان ساکنان شهر را در معرض خطر قرار می‌دهد. در پژوهش حاضر، پس از بررسی مطالعات پیشین درباره تعیین آسیب‌پذیری مناطق شهری در برابر زلزله و با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه و اطلاعات در دسترس، نه شاخص ذیل برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری به کار رفت.

(۱) قدمت ابنیه: خسارات وارد بر ساختمان‌ها از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده آسیب‌پذیری در منطقه مورد مطالعه به شمار می‌آیند. یکی از شاخص‌های مرتبط با ساختمان‌ها عمر آنهاست؛ به‌گونه‌ای که هرچه عمر ساختمان‌ها بیشتر باشد، میزان آسیب‌پذیری نیز افزایش خواهد یافت (Hataminejad et al., 2015)

(۲) نوع مصالح به کاررفته: یکی دیگر از عوامل مرتبط با ساختمان نوع مصالح مورد استفاده در ساخت آن است و مثلاً ساختمان‌های دارای اسکلت بتنی، درمقایسه با ساختمان‌هایی که در آنها از مصالح ترکیبی و سنگ استفاده شده است، آسیب‌پذیری کمتری دارند؛

جدول ۲. شاخص سازگاری

۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	a bw
۵/۲۳	۴/۴۷	۳/۷۳	۳/۰۰	۲/۳۰	۱/۶۳	۱/۰۰	۰/۴۴	۰/۰۰	شاخص سازگاری (ξ max)

زمین‌های ورزشی، باغات و زمین‌های زراعی محدوده شهر و اراضی بایر است که پتانسیل پناه‌گیری، تخلیه و اسکان آسیب دیدگان را داشته باشند. با افزایش فاصله قطعات ملکی از فضاهای باز شهری، میزان دسترسی به آنها کاهش و مقدار آسیب پذیری افزایش می‌یابد؛

۹) مساحت بنا: احتمال آسیب پذیری قطعات دارای مساحت کوچک تر بیشتر از قطعات با مساحت بزرگ است.

۳- روش تحقیق

در این پژوهش، ابتدا شاخص‌های مؤثر در آسیب‌پذیری بافت شهری در برابر زلزله، در منطقه مورد مطالعه، شناسایی شدند که شامل نه معیار می‌شوند. سپس مهم‌ترین و کم‌اهمیت‌ترین معیار مشخص شد و پس از انجام شدن مقایسه‌های مرجع، وزن هر معیار براساس مدل BWM تعیین شد. برای این کار، روش برنامه‌ریزی خطی سیمپلکس به کار رفت و میزان مورد قبول، برای تغییر وزن هر معیار، نیز مشخص شد.

با توجه به ماهیت مکانی معیارها، نقشه‌های هر معیار (شاخص) در محیط GIS آماده‌سازی شد. سپس ارزش هر قطعه ملکی (پارسل)، با توجه به هدف تحقیق و وضعیت آن قطعه در شاخص مورد نظر، با روش BWM محاسبه شد. برای نمونه، فاصله هر قطعه از معبر اصلی تعیین شد و براساس مقدار فاصله و هدف مسئله، ارزشی برای آن قطعه، در معیار فاصله از معبر تعیین شد. در این پژوهش، فرض بر آن است که هرچه قطعه به معبر اصلی نزدیک‌تر باشد، میزان آسیب‌پذیری نیز کمتر می‌شود؛ به این ترتیب، عدد کمتری به آن اختصاص می‌یابد. با طبقه‌بندی قطعات براساس فاصله از معبر اصلی، مهم‌ترین و کم‌اهمیت‌ترین طبقه مشخص و پس از

۳) کیفیت ابنیه: این شاخص نیز در میزان آسیب به وجود آمده در بافت شهری بسیار مؤثر است (Hosseinzadeh, 2004; Pourahmad et al., 2009).

هرچه تعداد ساختمان‌های مرمتی یا تخریبی در منطقه بیشتر باشد، احتمال خسارت‌های جانی و مادی نیز بیشتر خواهد بود؛

۴) تعداد طبقات: در صورت وقوع زلزله‌ای که موجب تخریب ساختمان‌ها گردد، با افزایش تعداد طبقات ساختمان‌ها اغلب آسیب‌پذیری نیز بیشتر می‌شود. حتی اگر افزایش ارتفاع با رعایت ضوابط و محاسبات انجام شود، تخلیه، جست‌وجو و نجات با سختی همراه خواهد بود (Habibi et al., 2008)؛

۵) تراکم جمعیت: بالا بودن تعداد افراد در واحدهای مسکونی نیز در افزایش احتمال خسارت‌های جانی ناشی از زلزله تأثیرگذار است (Pourahmad et al., 2009)؛

۶) فاصله از گسل: میزان آسیب‌پذیری می‌تواند رابطه مستقیمی با فاصله از گسل‌های اصلی داشته باشد. به همین دلیل، در ساخت و سازهای شهری و صنعتی سعی می‌شود به حریم خطوط گسل توجه شود تا پایداری لازم وجود داشته باشد و خطرهای ناشی از زمین‌لرزه احتمالی تا حد ممکن کاهش یابد؛

۷) فاصله از معابر: شبکه معابر یکی از عوامل بسیار مهم در کاهش آسیب‌پذیری در برابر زلزله به حساب می‌آید. از طریق شبکه‌های ارتباطی، امکان گریز از موقعیت‌های خطرناک و دسترسی به مناطق امن فراهم می‌شود و عبور و مرور وسایل نقلیه امدادی انجام می‌شود. با توجه به سلسله‌مراتب معابر شهری، هرچه کاربری‌ها از معابر اصلی و عریض‌تر فاصله بیشتری داشته باشند، دچار آسیب بیشتری خواهند شد؛

۸) فاصله از فضاهای باز: منظور از فضاهای باز عمومی فضاهایی همچون پارک‌ها و فضاهای سبز عمومی،

در ادامه به‌طور مشابه، به‌ازای هر معیار، ارزش نسبی هر ناحیه در قیاس با بدترین ناحیه (W) با استفاده از رابطه (۶) تعیین شد؛ W_j عبارت است از مقدار ناحیه‌ای که در معیار j ، بدترین (آسیب‌پذیرترین) وضعیت را بر مبنای محاسبات داشته است.

$$WO_i = \left[\frac{A_{ij}}{W_j} \right] \quad \text{رابطه (۶)}$$

اگر تقسیم‌بندی به نُه ناحیه انجام نمی‌شد، پس از مشخص شدن بهترین (امن‌ترین) و بدترین (آسیب‌پذیرترین) قطعه ملکی به‌ازای هر معیار، سایر قطعات ملکی باید با هریک از آنها مقایسه می‌شد. با توجه به تعداد زیاد قطعات ملکی در منطقه (بیش از ۶۰۰۰ قطعه)، مقایسه تک‌تک آنها با بهترین و بدترین قطعه به صرف زمان و محاسبات زیاد نیاز داشت و باعث سردرگمی نیز می‌شد. به همین دلیل، این تقسیم‌بندی انجام شد تا گزینه‌های کمتر (همان نُه ناحیه که معادل گزینه‌ها در مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره‌اند) با هم مقایسه شوند و به‌عبارتی، هر ناحیه با امن‌ترین و آسیب‌پذیرترین ناحیه مقایسه شود.

۴- نتایج و بحث

در شکل ۲، وضعیت قطعات ملکی در نقشه‌های معیارها نشان داده شده است. برای تهیه نقشه‌های شاخص‌های کیفیت ابنیه، قدمت ابنیه، مصالح به‌کاررفته، تعداد طبقات و تراکم جمعیت، از اطلاعات توصیفی درباره لایه قطعات ملکی استفاده شد. مساحت هر قطعه نیز با استفاده از همین لایه اطلاعاتی محاسبه و نقشه پس‌از طبقه‌بندی قطعات تهیه شد. مناطق گویای فضاهای باز، شامل پارک‌ها و فضاهای سبز عمومی، زمین‌های ورزشی، باغات و زمین‌های زراعی در محدوده مورد نظر و اراضی بایر، از نقشه کاربری استخراج شدند. در ادامه، فاصله هر قطعه از فضاهای باز و همچنین معابر و گسل‌ها مشخص و نقشه‌های آنها، پس از طبقه‌بندی، ارائه شد. برای تعیین وزن معیارها، کیفیت ابنیه به‌منزله مهم‌ترین معیار و

مقایسه‌های مرجع، وزن هر طبقه و در نتیجه، وزن تمامی قطعات ملکی که در طبقه مورد نظر قرار می‌گیرند، محاسبه شد. در مورد معیارهای کیفی مانند کیفیت ابنیه نیز، وزن هر طبقه با روش BWM به دست آمد. برای نمونه، با توجه به اطلاعات توصیفی گردآمده از منطقه مورد مطالعه، کیفیت ابنیه در پنج گروه عمده فاقد بنا، در حال ساخت و نوساز، قابل نگهداری، مرمتی و تخریبی قرار گرفت (شکل ۲- کیفیت ابنیه). با توجه به هدف پژوهش، امن‌ترین و آسیب‌پذیرترین نوع ابنیه از لحاظ کیفیت تعیین شدند که در این مورد، امن‌ترین «فاقد بنا» و آسیب‌پذیرترین «تخریبی» است. پس از مقایسه سایر گروه‌ها با این دو نوع، وزن هر گروه با روش BWM محاسبه شد. در ادامه، برای تطبیق مسئله با ویژگی‌های مدل BWM و صحت و سهولت اجرای آن، کل منطقه مورد مطالعه بر اساس موقعیت معابر و نوع آنها به نُه ناحیه تقسیم شد و مقدار هر ناحیه برای هر معیار، بر اساس میانگین مقادیر (وزن‌های) قطعات ملکی داخل آن ناحیه در معیار مورد نظر، محاسبه شد. به‌عبارتی، برخلاف نسخه اصلی مدل BWM که بهترین و بدترین معیار بر اساس نظر کارشناسی تعیین می‌شود، در پژوهش حاضر بهترین و بدترین ناحیه به‌ازای هر معیار، با توجه به ماهیت مسئله و به‌جای نظر کارشناسی، با توجه به تحلیل‌های مکانی و نتایج محاسبات، مشخص شد. سپس در هر معیار، برای تعیین ارزش نسبی هر ناحیه در قیاس با بهترین ناحیه (B)، از رابطه (۵) استفاده شد.

$$BO_i = \left[\frac{A_{ij}}{B_j} \right] \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این معادله،

A_{ij} : مقدار ناحیه i م به‌ازای معیار j (حاصل از محاسبه میانگین قطعات)؛

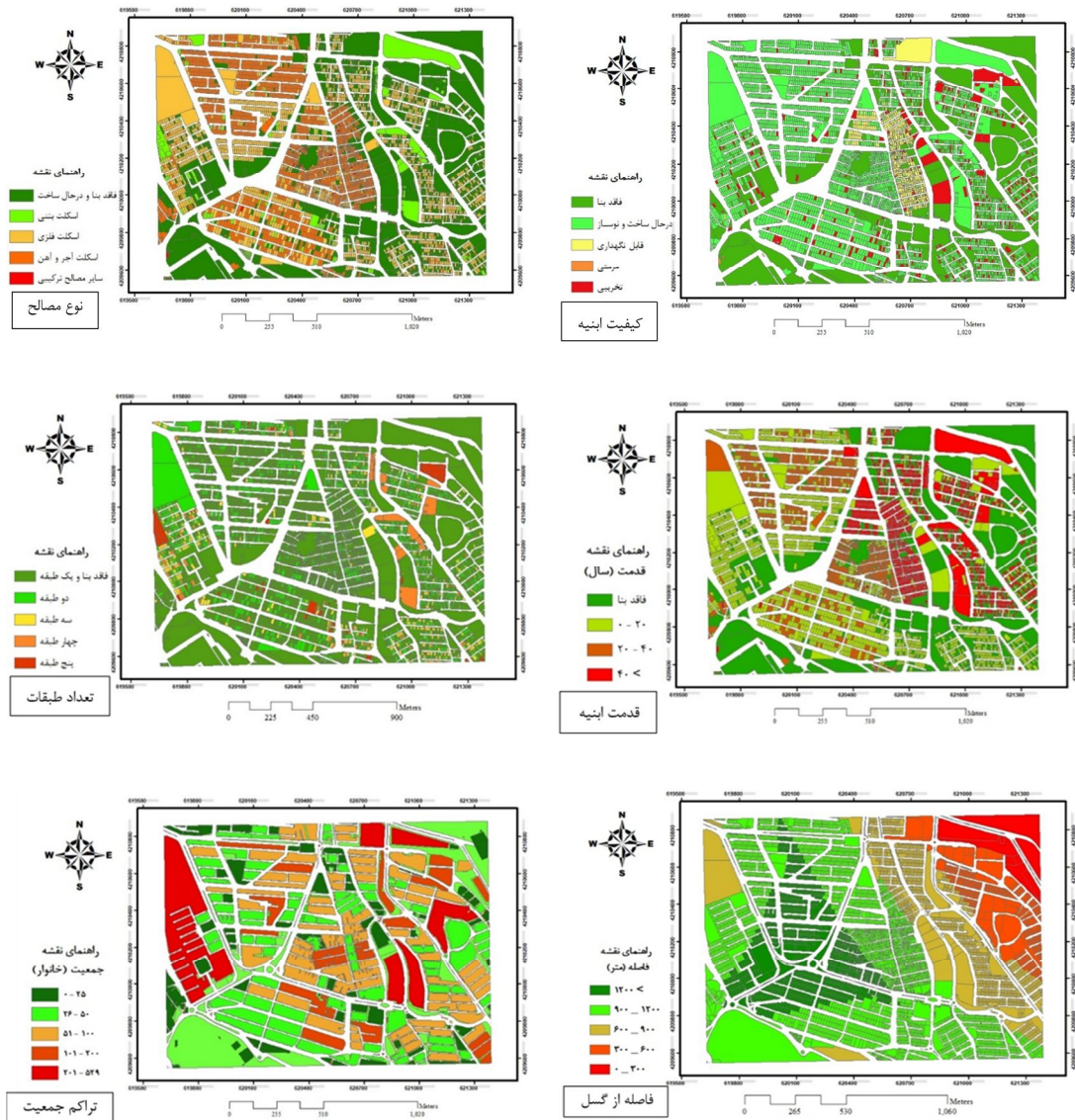
B_j : مقدار ناحیه‌ای که در معیار j بهترین وضعیت (امن‌ترین) را داشته است؛

BO_i : ارزش نسبی ناحیه i م به‌ازای معیار j در قیاس

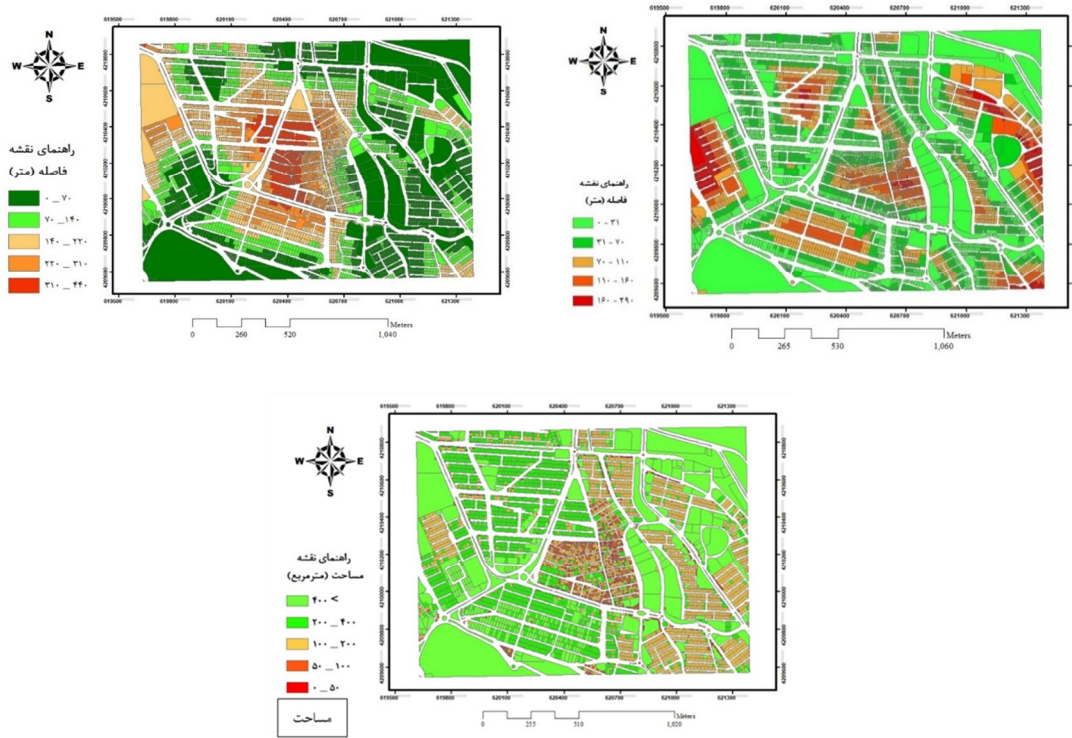
با B_j .

چنان‌که پیش‌تر گفته شد، برای تطبیق مسئله با مدل BWM و سهولت اجرا، کل منطقه مورد مطالعه به سه ناحیه تقسیم شد؛ نحوه تقسیم‌بندی در شکل ۳ نشان داده شده است.

مساحت قطعات به‌منزله کم‌اهمیت‌ترین معیار در نظر گرفته شدند و پس از اجرای مدل BWM وزن‌ها به دست آمدند (جدول ۳). نرخ ناسازگاری در حدود ۰/۰۶ به دست آمد که مورد قبول است.



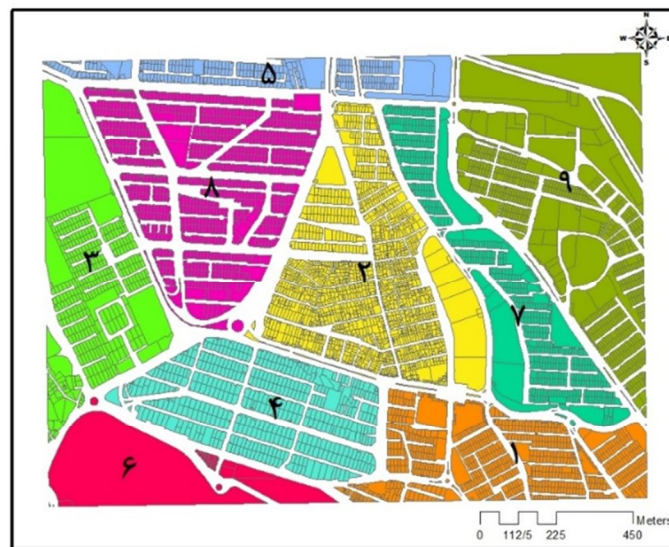
شکل ۲. وضعیت قطعات ملکی در نقشه‌های معیارها



ادامه شکل ۲

جدول ۳. وزن محاسبه‌شده برای معیارها براساس مدل BWM

کیفیت اپنیه	مصالح	قدمت اپنیه	تعداد طبقات	تراکم جمعیت	فاصله از گسل	دسترسی به معايير اصلی	دسترسی به فضای باز	مساحت
۰/۲۷۲۱	۰/۱۶۵۶	۰/۱۶۵۶	۰/۱۱۰۴	۰/۰۸۲۸	۰/۰۸۲۸	۰/۰۵۵۲	۰/۰۴۱۴	۰/۰۲۳۶



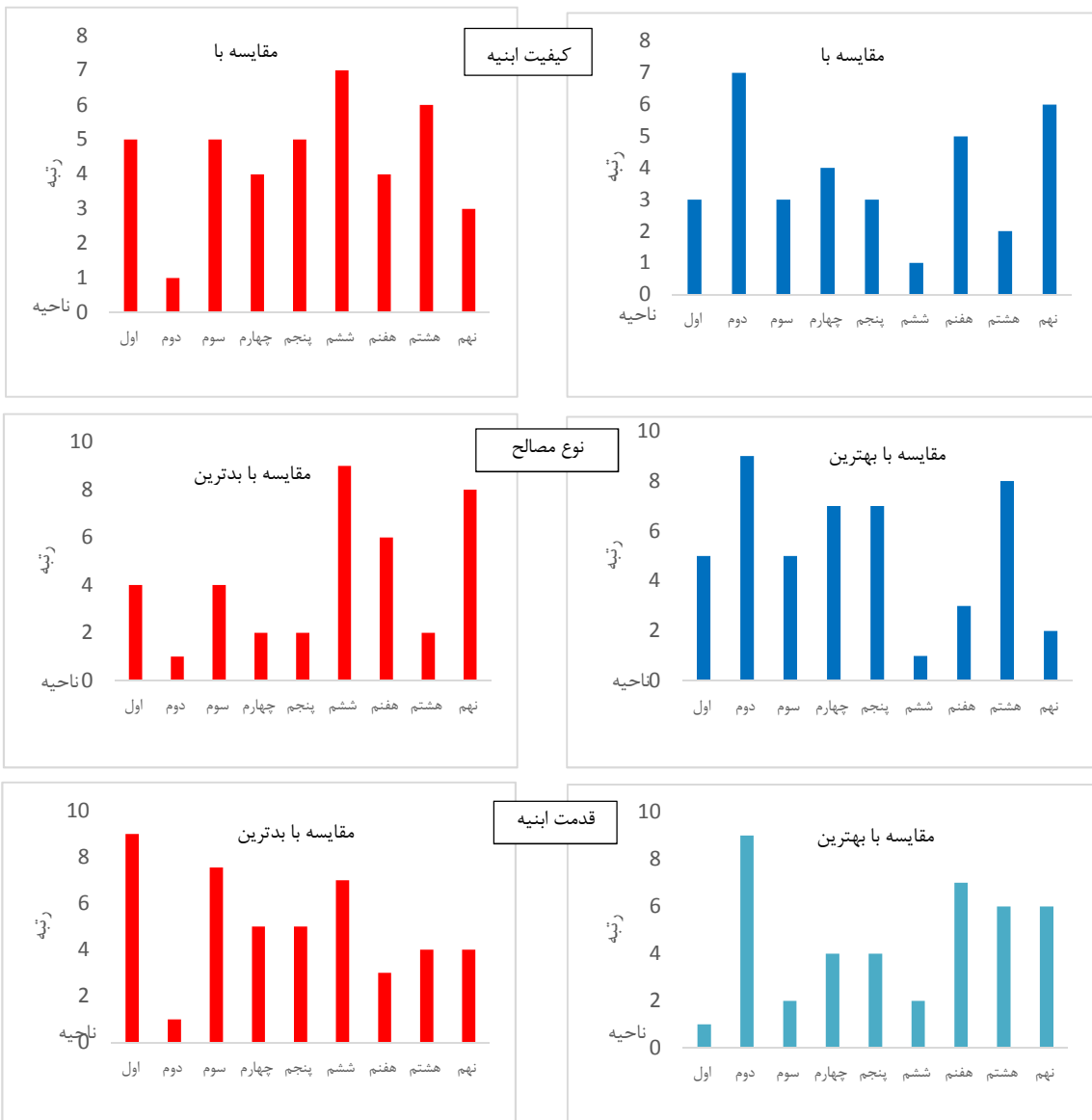
شکل ۳. تقسیم‌بندی منطقه به نه ناحیه برای اجرای مدل BWM

(جدول ۴). سپس سایر ناحیه‌ها با این دو ناحیه در هر شاخص مقایسه شدند (شکل ۴).

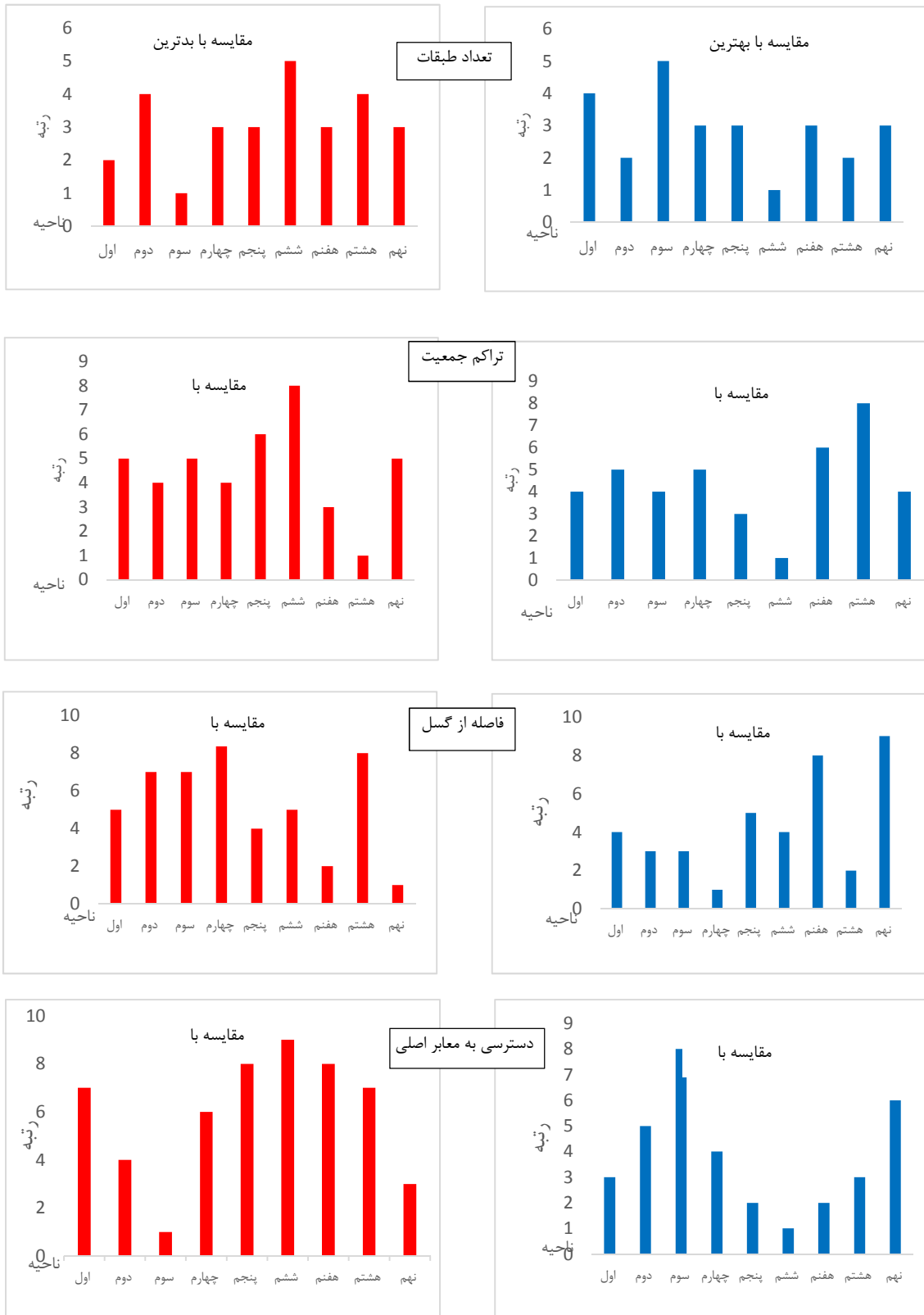
پس از محاسبه وزن هر قطعه ملکی با مدل BWM و محاسبه میانگین آنها در هر ناحیه، امن‌ترین و آسیب‌پذیرترین ناحیه به‌ازای هر شاخص معین شد.

جدول ۴. بهترین و بدترین ناحیه در هر معیار، براساس مدل BWM

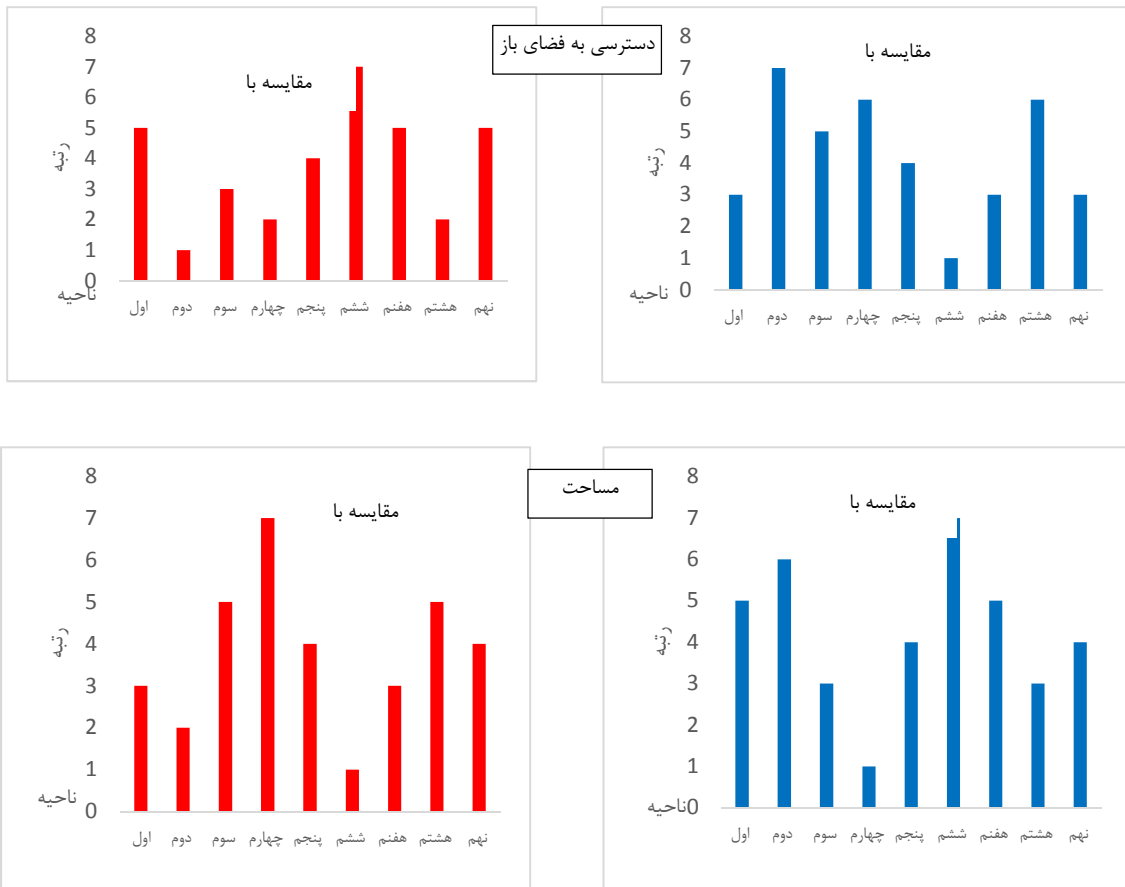
ناحیه / معیار	کیفیت ابنیه	نوع مصالح	قدمت ابنیه	تعداد طبقات	تراکم جمعیت	فاصله از گسل	دسترسی به معابر اصلی	دسترسی به فضای باز	مساحت
بهترین	۶	۶	۱	۶	۶	۴	۶	۶	۴
بدترین	۲	۲	۲	۳	۸	۹	۳	۲	۶



شکل ۴. نمودار مقایسه تمامی نواحی با بهترین و بدترین ناحیه در هر معیار (سمت راست: بهترین، سمت چپ: بدترین)



ادامه شکل ۴



ادامه شکل ۴

با در نظر گرفتن وزن هر معیار و وزن هر ناحیه به‌ازای هر معیار، مقدار و رتبه نهایی هر ناحیه محاسبه شد (جدول ۶).

به این ترتیب، امکان محاسبه مقدار هر ناحیه در هر شاخص، با مدل BWM فراهم شد که در نهایت، پس از اجرای مدل، نتایج مطابق جدول ۵ به دست آمد.

جدول ۵. وزن محاسبه‌شده برای نواحی براساس مدل BWM

معیار/ناحیه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
کیفیت ابنیه	۰/۱۰۹۷	۰/۰۳۰۷	۰/۱۰۹۷	۰/۰۸۲۳	۰/۱۰۹۷	۰/۲۷۲۲	۰/۰۶۵۸	۰/۱۶۴۶	۰/۰۵۴۸
مصالح به‌کاررفته	۰/۰۷۷۵	۰/۰۳۰۷	۰/۰۷۷۵	۰/۰۵۵۳	۰/۰۵۵۳	۰/۳۳۲۱	۰/۱۲۹۱	۰/۰۴۸۴	۰/۱۹۳۷
قدمت ابنیه	۰/۲۹۳۳	۰/۰۲۶۹	۰/۱۷۱۹	۰/۰۸۵۹	۰/۰۸۵۹	۰/۱۷۱۹	۰/۰۴۹۱	۰/۰۵۷۳	۰/۰۵۷۳
تعداد طبقات	۰/۰۶۹۱	۰/۱۳۸۳	۰/۰۴۱۹	۰/۰۹۲۲	۰/۰۹۲۲	۰/۲۴۳۱	۰/۰۹۲۲	۰/۱۳۸۳	۰/۰۹۲۲
تراکم جمعیت	۰/۰۹۷۴	۰/۰۷۷۹	۰/۰۹۷۴	۰/۰۷۷۹	۰/۱۲۹۸	۰/۳۲۴۶	۰/۰۶۴۹	۰/۰۳۲۴	۰/۰۹۷۴
فاصله از گسل	۰/۰۸۶۴	۰/۱۱۵۳	۰/۱۱۵۳	۰/۱۸۵۸	۰/۰۶۹۱	۰/۰۸۶۴	۰/۰۴۳۲	۰/۱۷۲۹	۰/۰۲۵۰
دسترسی به معابر اصلی	۰/۱۰۵۵	۰/۰۶۳۳	۰/۰۲۳۷	۰/۰۷۹۱	۰/۱۵۸۳	۰/۲۵۳۲	۰/۱۵۸۳	۰/۱۰۵۵	۰/۰۵۲۷
دسترسی به فضای باز	۰/۱۲۲۳	۰/۰۳۵۹	۰/۰۷۳۴	۰/۰۶۱۱	۰/۰۹۱۷	۰/۳۰۹۴	۰/۱۲۲۳	۰/۰۶۱۱	۰/۱۲۲۳
مساحت	۰/۰۷۴۷	۰/۰۶۲۳	۰/۱۲۴۶	۰/۳۱۵۲	۰/۰۹۳۴	۰/۰۳۶۶	۰/۰۷۴۷	۰/۱۲۴۶	۰/۰۹۳۴

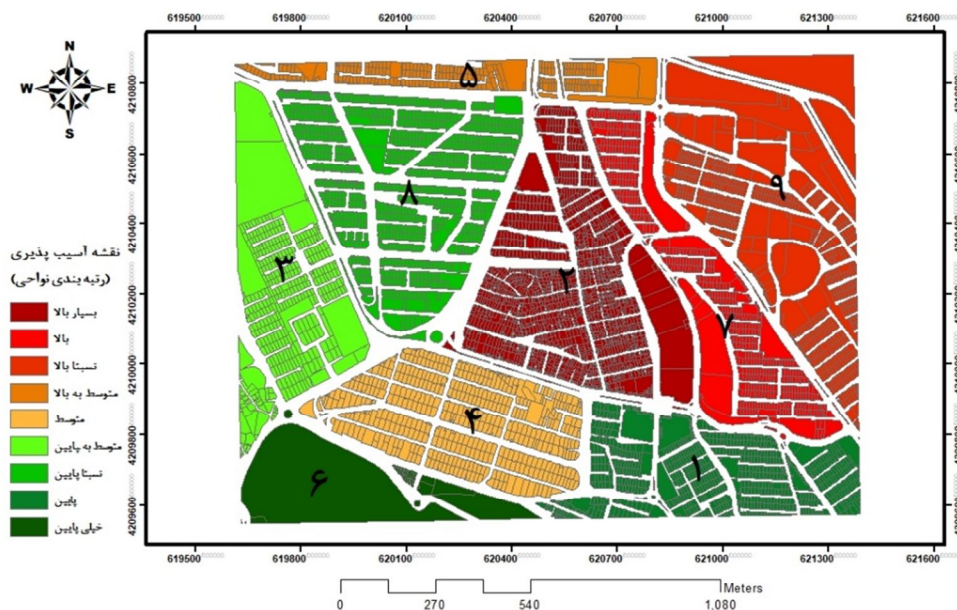
جدول ۶. مقدار و رتبه نهایی نواحی، از لحاظ آسیب‌پذیری در برابر زلزله، براساس مدل BWM

ناحیه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
ارزش نهایی	۰/۱۲۸۲	۰/۰۵۴۴	۰/۱۰۰۴	۰/۰۹۷۴	۰/۰۹۴۴	۰/۲۴۷۷	۰/۰۸۳۳	۰/۱۰۵۶	۰/۰۸۸۱
رتبه نهایی	۲	۹	۴	۵	۶	۱	۸	۳	۷

در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهد. در این پژوهش، بیشترین حساسیت به ترتیب به وزن معیارهای فاصله از فضاهای باز و فاصله از معابر متعلق است که اگر مقدار آنها به ترتیب، به میزان $2/5 \times 10^{-5}$ و $3/5 \times 10^{-5}$ افزایش یابد، به تغییر پاسخ فعلی منجر می‌شود. وزن معیارهای کیفیت ابنیه و سپس مساحت بیشترین انعطاف‌پذیری را دارند که افزایش آنها، به ترتیب تا $3/6 \times 10^{-3}$ و $1/3 \times 10^{-3}$ ، تغییری در پاسخ بهینه یافته‌شده پدید نمی‌آورد.

برای مقایسه روش BWM با روش AHP در این پژوهش، مقایسه‌های زوجی بین معیارها انجام شد و وزن معیارها با روش AHP نیز تعیین شد (جدول ۷). میزان ناسازگاری در روش AHP برابر است با ۰/۰۹، که کمتر از ۰/۱ و در حد مورد قبول است ولی مقدار آن از میزان ناسازگاری حاصل از روش BWM (۰/۰۶) بیشتر است.

چنان‌که در جدول ۵ نیز نشان داده شده، براساس نتایج پژوهش، ناحیه شماره ۶ کمترین احتمال آسیب‌پذیری در برابر زلزله را در مقایسه با سایر نواحی دارد. در مقابل، ناحیه‌های شماره ۲، ۷ و ۹ به ترتیب در معرض بیشترین میزان آسیب‌پذیری‌اند. در مقایسه‌های مرجع (جدول ۲) نیز مشخص شده بود که ناحیه ۲، به‌ازای چهار شاخص کیفیت ابنیه، قدمت ابنیه، مصالح مورد استفاده و دسترسی به فضاهای باز، بدترین (آسیب‌پذیرترین) ناحیه بوده است. این ناحیه حدود ۱۶٪ از کل منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده و شامل ۱۸۱۵ قطعه می‌شود. نقشه نهایی آسیب‌پذیری در برابر زلزله، براساس مدل BWM، در شکل ۵ نشان داده شده است. بررسی مقدار تغییر مجاز، برای متغیر در آنالیز حساسیت، بینش‌هایی را درباره پایداری راه‌حل بهینه فعلی



شکل ۵. نقشه آسیب‌پذیری در برابر زلزله، براساس مدل BWM

جدول ۷. وزن محاسبه‌شده برای معیارها، براساس مدل AHP

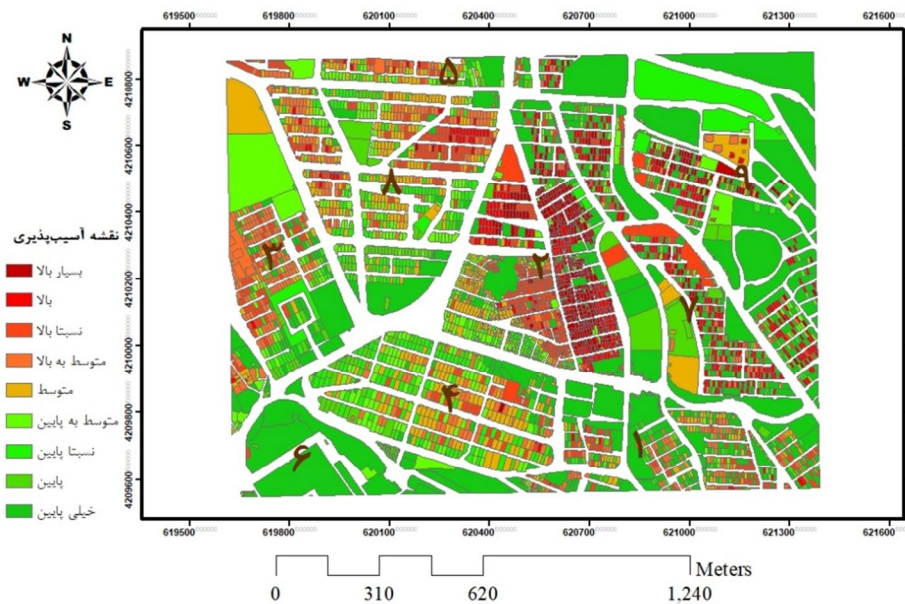
کیفیت ابنیه	نوع مصالح	قدمت ابنیه	تعداد طبقات	تراکم جمعیت	فاصله از گسل	دسترسی به معايير اصلی	دسترسی به فضای باز	مساحت
۰/۲۷۶	۰/۱۸۰	۰/۱۶۶	۰/۱۰۸	۰/۰۸۹	۰/۰۸۴	۰/۰۴۵	۰/۰۳۵	۰/۰۱۷

یکی از تأثیرگذارترین معیارها در نظر گرفته شده است. در مطالعه زارع^۴ و همکاران (۲۰۱۶) نیز کیفیت ابنیه و نوع مصالح، از لحاظ اهمیت در ارزیابی میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله، به ترتیب در اولویت‌های دوم و سوم قرار گرفته‌اند.

در ادامه، برای بررسی دقیق‌تر، نقشه آسیب‌پذیری دیگری نیز تهیه شد که میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله را در حد قطعات ملکی نشان می‌دهد (شکل ۶). برای ایجاد این نقشه، از وزن‌های به‌دست‌آمده برای معیارها و زیرمعیارها و روش مجموع وزن‌دار استفاده شد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ترتیب معیارها از نظر میزان تأثیر در آسیب‌پذیری در روش AHP مشابه روش BWM است اما مقادیر وزنی کمی تفاوت دارد. برای تعیین وزن نه معیار در روش BWM، ۱۵ مقایسه و در روش AHP، ۳۶ مقایسه انجام شد.

در پژوهش حاضر، بالاترین وزن به ترتیب به معیارهای کیفیت ابنیه، نوع مصالح و قدمت ابنیه تعلق گرفته که مشابه نتایج پژوهش موحد^۱ و همکاران (۲۰۱۳) و همچنین اسماعیل‌پور^۲ و همکاران (۲۰۲۳) بوده است. در پژوهش کرمی^۳ (۲۰۱۲) نیز که کل شهر تبریز از نظر آسیب‌پذیری زلزله مطالعه شد، نوع مصالح



شکل ۶. نقشه آسیب‌پذیری قطعات ملکی در برابر زلزله

1. Movahed
2. Esmaeelpour
3. Karami
4. Zare

فضاهای باز، آسیب‌پذیرترین مورد در بین نُه ناحیه بوده است. این ناحیه حدود ۱۶٪ از کل منطقه را به خود اختصاص داده و شامل ۱۸۱۵ قطعهٔ ملکی می‌شود. مطابق نقشهٔ آسیب‌پذیری ایجادشده براساس قطعات ملکی نیز، بیشتر قطعات واقع در این ناحیه آسیب‌پذیری بسیار بالا یا بالا دارند. در زمینهٔ آنالیز حساسیت، مقدار تغییر مجاز یک متغیر (در این پژوهش: وزن معیار) به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند از میزان انعطاف‌پذیری مقادیر متغیرها آگاهی یابند.

۶- منابع

- Aghataher, R., Rabieifar, H. & Neysani Samany, N., 2022, **The Role of Morphological Spatial Indices in the Suitability of Urban Earthquake Management**, Earth Observation and Geomatics Engineering, 6(1), PP. 151-159, 10.22059/eoge.2022.347536.1122.
- Ahadnejad Roshti, M. & Heidari, A., 2009, **Locating Secondary Urban Service Centers in the North of Zanjan City to Reduce Traffic Pressure on the Central Area of the City Using GIS**, Regional Geomatics Conference, Islamshahr, IIAUGEMAT01_014.
- Alam, A. & Mahabubul Haque, SH., 2018, **Assessment of Urban Physical Seismic Vulnerability Using the Combination of AHP and TOPSIS Models: A Case Study of Residential Neighborhoods of Mymensingh City, Bangladesh**, Journal of Geoscience and Environment Protection, 06(02), PP. 165-183, 10.4236/gep.2018.62011.
- Albulescu, A., Grozavu, A. & Larion, D., 2019, **A GIS-Based Application of Fuzzy AHP and Classical TOPSIS Methods on Assessing the Seismic Vulnerability of Galați City, Romania**, International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM; Sofia, 19, PP. 8-96, 10.5593/sgem2019/2.1/S08.096.
- Arkani, E., Hatami Nejad, H. & Qare, S., 2020, **Identifying and Prioritizing the Factors Affecting the Increase of Earthquake Risk in Worn-Out Urban Areas with a Combined Approach of Fuzzy Delphi Technique and BMW Model**, Journal of Applied Researches in Geographical Sciences, 20(59), PP. 291-306, DOI:10.29252/jgs.20. 59.291.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشتر قطعات ملکی که در ناحیهٔ ۲ (آسیب‌پذیرترین ناحیه در نقشهٔ قبلی) قرار گرفته‌اند آسیب‌پذیری بسیار بالا و یا بالا دارند.

۵- نتیجه‌گیری

زلزله یکی از مخاطرات طبیعی است که کشور ما را مدام در معرض تهدید قرار می‌دهد و حدود ۳۵٪ از مساحت کشور با خطر جدی زمین‌لرزه مواجه است. تعیین میزان آسیب‌پذیری بافت‌های شهری در برابر زلزله و برنامه‌ریزی براساس آن می‌تواند نقش مهمی در کاهش تلفات جانی و مالی ناشی از وقوع این پدیده داشته باشد.

در این پژوهش، میزان آسیب‌پذیری احتمالی ناشی از زمین‌لرزه در بخشی از منطقهٔ ۲ شهر تبریز بررسی شد. بدین منظور بر مبنای پیشینه و تجربه‌ها در زمینهٔ تحقیق و با توجه به اطلاعات در دسترس از منطقهٔ مورد مطالعه، معیارهای مؤثر در میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای شناسایی شدند که شامل نُه معیار کیفیت، قدمت، مصالح و تعداد طبقات ساختمان‌ها، فاصله از گسل، معابر اصلی، فضاهای باز، تراکم جمعیت و مساحت می‌شوند. سپس با استفاده از BWM، وزن (اهمیت نسبی) معیارها در تعیین میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله مشخص شد و معیارهای کیفیت ابنیه و مساحت، به ترتیب، بیشترین و کمترین وزن را داشتند. نرخ ناسازگاری در این وزن‌دهی در حدود ۰/۰۶ به دست آمد که مورد قبول است. نتیجهٔ آنالیز حساسیت در این زمینه نشان داد که بیشترین حساسیت به وزن معیار فاصله از فضاهای باز و بیشترین انعطاف‌پذیری به معیار کیفیت ابنیه تعلق دارد. همچنین با روش BWM هریک از قطعات ملکی، براساس هر معیار، ارزش‌گذاری شد. در هریک از نقشه‌های معیار، بهترین و بدترین ناحیه به روش محاسباتی، مشخص و آسیب‌پذیرترین ناحیه‌ها نیز با همین مدل تعیین شدند. براساس نتایج، ناحیه‌های شمارهٔ ۲ و ۷ به ترتیب، بیشترین میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله را دارند که تقریباً در بخش میانی منطقهٔ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. ناحیهٔ ۲، از لحاظ معیارهای کیفیت ابنیه، قدمت ابنیه، مصالح مورد استفاده و دسترسی به

- Arvin, M., Faraji, A. & Bazrafkan, S., 2018, **Study of Social Capital Effect on Earthquake Disaster Management with Emphasis on Resiliency (Case: Tehran City Region 9)**, Social Capital Management, 5(1), PP. 1-24, DOI: 10.22059/jscm.2018.245715.1490.
- Eidivandi, A. & Khosravi, G., 2019, **Zarin Shahr Earthquake Risk Assessment Using GIS**, Geography And Environmental Planning, 30(1), PP. 55-74, DOI: 10.22108/gep.2019.115371.1114.
- Esmaeelpour, M., Lalehpour, M. & Mamaghani, S., 2023, **The Seismic Vulnerability Assessment of Housing of Tabriz (Case Study: District 10)**, Journal of Geography and Planning, 26(82), PP. 27-48, DOI: 10.22034/gp.2022.48908.2921.
- Fazel, S., Taghvaii, M. & Mahmoodzadeh, A., 2017, **Zonation of Urban Seismic Vulnerability Using ANP Model Case Study: Najaf Abad City**, Emergency Management, 6(11), PP. 121-132, 20.1001.1.23453915.1396.6.1.9.1.
- Habibi, K., Pourahmad, A., Meshkini, A.a.f., Asgari, A. & Nazari Adli, S., 2008, **Allocation of Building & Structure Factor Effective in Old Fabrics Vulnerability with Fuzzy Logic & GIS (Case Study: Zanjan City)**, Honar-ha-ye-ziba, (33), PP. 27-36, SID. <https://sid.ir/paper/5630/en>.
- Hataminejad, H., Manouchehri Miandoab, A., Ahar, H. & Salaki, M.A., 2015, **Assessment and Classification of Seismic Zones of the City of Tabriz with Fuzzy Logic in Combining AHP and TOPSIS Environment ARCGIS**, Human Geography Research, 46(4), PP. 697-717, DOI: 10.22059/jhgr.2015.51251.
- Hernantes, J., Patricia, M., Raquel, G., Jose Mari, S. & Leire, L., 2019, **Towards Resilient Cities: A Maturity Model for Operationalizing Resilience**, Cities, 84, PP. 96-103, 10.1016/j.cities.2018.07.010.
- Hoghoghifard, E., Zahedi, M. & Arfteh, A., 2017, **Analysis of Vulnerability Indicators in Dilapidated Urban Textures with an Earthquake Crisis Management Approach (Case Study: District 3 of Shiraz Municipality)**, The 4th Conference on Environmental Planning and Management, Tehran, ESPME04 635.
- Hosseinzadeh, S.R., 2004, **Urban Planning in Line with Natural Hazards with Emphasis on Iran**, Journal of Geography and Regional Development, Ferdowsi University of Mashhad Press, 3, <https://sid.ir/paper/454158/fa>.
- Isalou, S., Latifi, G. & Goodarzi, V., 2017, **Assessment of Physical Vulnerability of the Texture in District 1 of Tehran City against Possible Earthquakes Using IHWP Method and GIS System**, Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR), 25(100), PP. 73-87, DOI: 10.22131/sepehr.2017.24807.
- Jena, R., Pradhan, B., Beydoun, G., Alamri, A. & Shanableh, A., 2022, **Spatial Earthquake Vulnerability Assessment by Using Multi-Criteria Decision Making and Probabilistic Neural Network Techniques in Odisha, India**, Geocarto International, 37(25), PP. 8080-8099, 10.1080/10106049.2021.1992023.
- Kamel, B., 2011, **Earthquake Crisis Management in the Pre-Earthquake Stage Using GIS (Case Study: District One of Tabriz Municipality)**, Master's Thesis, Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Tabriz, 10.30495/jupm.2021.27438.3808.
- Karami, M., 2012, **Risk and Vulnerability Assessing the Risk and Vulnerability of Cities Using Geographic Information System (GIS) (Case Study: Tabriz City)**, Ph.D. Thesis, Faculty of Environmental Sciences and Architecture, University of Tabriz.
- Konurhan, Z., Yucesan, M. & Gul, M., 2023, **Integrating Stratified Best–Worst Method and GIS for Landslide Susceptibility Assessment: A Case Study in Erzurum Province (Turkey)**, Environ. Sci. Pollut. Res. 30, PP. 113978-114000, <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30200-9>.
- Lalehpour, M., Khairizadeh, M. & Zakeri, M., 2022, **Assessing the Vulnerability of Urban Areas to Earthquake Crisis (Case Study: Varzeghan City Neighborhoods)**, Natural Environment Hazards, 11(31), PP. 1-24, 10.22111/jneh.2022.33931.1656.
- Mehrnoor, S., Robati, M., Kheirkhah Zarkesh, M.M., Farsad, F. & Baikpour, S., 2023, **Land Subsidence Hazard Zoning in Hashtgerd Plain Based on Integrated Multi-Criteria Decision-Making Approach: WOI-BWM**, Journal of Geography and Environmental Hazards, 11(4), PP. 127-148, DOI: 10.22067/geoeh.2022.75445.1188.
- Mi, X.M., Tang, M., Liao, H.C., Shen, W.J. & Lev, B., 2019, **The State-of-the-Art Survey on Integrations and Applications of the**

- Best Worst Method in Decision Making: Why, What, What for and What's Next?**, Omega, 87, PP. 205-225, DOI: org/10.1016/J.OMEGA.2019.01.009.
- Moghaddami, A. & Alizadeh, K., 2017, **Investigating the Physical Vulnerability of the City for the Purpose of Crisis Management and Urban Security with Emphasis on Earthquakes (Case Study of Jajorm City)**, First International Conference and Eighth National Conference on Planning and Management, Mashhad.
- Mousavi, S., Abedini, M. & Esmeali Ouri, A., 2015, **Evaluation Seismic Hazard in Izeh Urban Catchment with Using Models, Multi-Criteria: WLC and AHP**, GIS. Emergency Management, 4(7), PP. 93-101, <https://sid.ir/paper/226022/en>.
- Movahed, A., Firoozi, M.A. & Esafi, A., 2013, **Studying the Vulnerability of Urban Buildings against Earthquake Using the Model of Inversion Hierarchical Weight Process in the Geographical Information System: A Case Study on Masjed Soleiman City**, Research and Urban Planning, 3(11), PP. 115-136, SID. <https://sid.ir/paper/220122/en>.
- Nirabadi, H. & Kohbanani, H., 2010, **Site Selection for Temporary Accommodation Camps for Earthquake Survivors Using AHP, Case Study: Neyshabur City**, Geomatics Conference, Tehran, GEO89-124.
- Nyimbil, P.H. & Erden, T., 2021, **Comparative Evaluation of GIS-Based Best-Worst Method (BWM) for Emergency Facility Planning: Perspectives from Two Decision-Maker Groups**, Natural Hazards, 105(1), PP. 1031-1067, 10.1007/s11069-020-04348-3.
- Otari, M. & Arbabi Sabzevari, A., 2017, **Analysis of Human Vulnerability in Different Areas of Tehran's 13th District against Earthquake Crisis**, The 4th Conference on Environmental Planning and Management, ESPME04, Tehran.
- Özmen, M., 2023, **Evaluating Earthquake Vulnerability of 2023 Kayseri, Türkiye via BWM-ABAC Method**, Sādhanā, 48, P. 179, <https://doi.org/10.1007/s12046-023-02216-x>.
- Pourahmad, A., Lotfi, S., Faraji, A. & Azimi, A., 2009, **Investigating the Dimensions of Prevention of Earthquake Crisis (A Case Study of Babol)**, Urban-Regional Studies and Research (University of Isfahan), 1(1), PP. 1-24, SID. <https://sid.ir/paper/153036/en>.
- Rezaei, J., 2015, **Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method**, Omega, 53, PP. 49-57, 10.1016/j.omega.2014.11.009.
- Sarvar, H., 2019, **Identification Worn-Out Urban Textures Based on the Physical Parameters Case Study: Region On Tabriz City**, Sustainable City, 2(1), PP. 1-14, DOI: 10.22034/jsc.2019.91206.
- Tudes, S. & Yigiter, N., 2009, **Preparation of Land Use Planning Model Using GIS Based on AHP: Case Study Adana-Turkey**, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 69(2), PP. 235-245, 10.1007/s10064-009-0247-5.
- Zare, M., Rezaee, M.R. & Rahimi, E., 2016, **Vulnerability Assessment of Old Texture of Marvdasht against to Earthquake by Using (AHP) And (GIS)**, Research and Urban Planning, 7(26), PP. 75-92, SID. <https://sid.ir/paper/220133/en>.