

## GIS-based multi-criteria decision-making for seismic vulnerability modeling using OWA conceptual quantifiers

Yasaman Asadi<sup>1</sup>, Meysam Argany<sup>2\*</sup> , Keyvan Ezimand<sup>3</sup>

1. PhD student in Remote Sensing and Geographic Information System Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University Tehran, Tehran, Iran

2. *Corresponding Author*, Assistant Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Iran

3. PhD student in Remote Sensing and Geographic Information Systems, Faculty of Earth Sciences, Department of Remote Sensing and Geographic Information Systems, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

---

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**

**Received:** 30 January 2022  
**Revised:** 30 March 2024  
**Accepted:** 13 May 2024

**Keywords:**

Modeling, seismic vulnerability, urban buildings, liquefaction.

### ABSTRACT

Earthquake is one of the most destructive disasters that cause a lot of damage to structures and humans. Many factors play a role in the vulnerability of urban areas to earthquakes. In Tehran, the presence of old buildings, high population density, and the existence of numerous faults have caused the city to be significantly vulnerable to earthquakes and on the other hand the phenomenon of liquefaction during earthquakes. The high level of groundwater and the type of alluvial and sandy soils in some areas increases vulnerability in Tehran. In this research, a map of the physical vulnerability of Tehran to earthquakes has been prepared in two different scenarios (considering the depth of groundwater level and not considering the depth of groundwater level) and the weighted average operator arranged to provide a wide range. Some of the answers from pessimistic to optimistic solutions have been used based on multi-criteria analysis and the results in different scenarios have been divided into five categories: very high, high, medium, low, and very low. The results show that considering the fuzzy concept quantifier "at least one" in the 6-parameter scenario 67% and in the 7-parameter scenario 85% of the buildings in the three zones 20, 16, and 11 are classified in the "very vulnerable" class. Comparison of the results of the two scenarios Due to the variability of groundwater depth in the study areas shows that in the 7-parameter scenario (taking into account the groundwater depth) in almost all decision-making strategies, the vulnerability increased from north to south of the study area. The study areas are in high and very high vulnerability classes.

---

**Cite this article:** Asadi, Y. , Argany, M. and Ezimand, K. (2025). GIS-based multi-criteria decision-making for seismic vulnerability modeling using OWA conceptual quantifiers. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 14(45), 1-16. DOI: 10.22111/jneh.2024.41473.1873



© Meysam Argany

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2024.41473.1873

---

\* Corresponding Author Email: [argany@ut.ac.ir](mailto:argany@ut.ac.ir)

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۴۵، شماره پیاپی ۳، مهر ۱۴۰۴

## تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر GIS برای مدل‌سازی آسیب‌پذیری لرزه‌ای با

### استفاده از کمیت‌سنج‌های مفهومی OWA

یاسمن اسدی<sup>۱</sup>، میثم ارگانی<sup>۲\*</sup>، کیوان عزیزی مند<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۲. استادیار گروه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول)

۳. دانشجوی دکتری سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	زلزله یکی از مخرب‌ترین بلایایی است که خسارت‌های زیادی به سازه‌ها و انسان وارد می‌کند. عوامل زیادی در آسیب‌پذیری مناطق شهری در برابر زلزله نقش دارند. در تهران وجود ساختمان‌های قدیمی، تراکم بالای جمعیت، وجود گسل‌های متعدد، تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و نوع خاک سبب شده که این شهر به میزان قابل‌توجهی در برابر خطر زلزله آسیب‌پذیر باشد. به همین منظور در این مطالعه نقشه آسیب‌پذیری فیزیکی شهر تهران در برابر زلزله در دو سناریوی متفاوت (با در نظر گرفتن سطح آب زیرزمینی و بدون در نظر گرفتن سطح آب زیرزمینی) تهیه شده است. در این مطالعه از عملگر میانگین وزنی مرتب‌شده برای ارائه طیف گسترده‌ای از راه‌حل‌های بدبینانه تا خوش‌بینانه بر اساس تحلیل چندمعیاره استفاده شده است و نتایج آن در سناریوهای مختلف ارائه شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد با در نظر گرفتن کمیت‌سنج مفهومی فازی "حداقل یکی" در سناریوی ۶ پارامتری ۶۷ درصد و در سناریوی ۷ پارامتری ۸۵ درصد ساختمان‌های سه منطقه ۲۰ و ۱۶ و ۱۱ در کلاس «آسیب‌پذیری بسیار زیاد» طبقه‌بندی شده‌اند. مقایسه نتایج دو سناریو با توجه به متغیر بودن سطح آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد که در سناریوی ۷ پارامتری (با در نظر گرفتن سطح آب زیرزمینی) تقریباً در تمام استراتژی‌های تصمیم‌گیری میزان آسیب‌پذیری از شمال به جنوب منطقه مورد مطالعه افزایش یافته و مناطق مورد مطالعه در کلاس آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته‌اند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۰	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴	
واژه‌های کلیدی:	
مدل‌سازی، آسیب‌پذیری	
لرزه‌ای، ساختمان‌های شهری، روان‌گرایی.	

استناد: اسدی، یاسمن، ارگانی، میثم و عزیزی مند، کیوان (۱۴۰۴). تصمیم‌گیری چند معیاره مبتنی بر GIS برای مدل‌سازی آسیب‌پذیری لرزه‌ای با

استفاده از کمیت‌سنج‌های مفهومی OWA. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۴(۴۵)، ۱-۱۶. DOI: 10.22111/jneh.2024.41473.1873



© یاسمن اسدی، میثم ارگانی\*، کیوان عزیزی مند.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

## مقدمه

زلزله یکی از پرهزینه‌ترین مخاطرات طبیعی است که مردم با آن مواجه هستند و بدون هشدار صریح و همراه با خسارت‌های مالی و جانی است (موسترا<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۱؛ شادمان و پای<sup>۲</sup>، ۲۰۲۳). با این حال، خسارت‌های احتمالی ناشی از زلزله را می‌توان تخمین زد (دوزگون و همکاران، ۲۰۱۱) و علاوه بر این، واکنش‌های کارآمد پس از فاجعه را نیز می‌توان برنامه‌ریزی کرد (چراغی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۲۴). عوامل زیادی در آسیب‌پذیری مناطق شهری در برابر زلزله نقش دارند که می‌توان به قدمت، تراکم ساختمان‌ها، کیفیت مصالح، تراکم جمعیت و غیره اشاره کرد (اسدی<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۹؛ اسدی و همکاران ۲۰۲۲). بنابراین، ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای یک مسئله چندمعیاره است و در نتیجه برای تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری و برنامه‌ریزی‌های مکانی مرتبط با آن نیاز به استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است. برنامه‌ریزی مکانی شامل فن‌های تصمیم‌گیری است که با فن‌هایی مانند تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) و ارزیابی چندمعیاره (MCE) مرتبط است. ترکیب GIS با روش‌های MCDA ابزار قدرتمندی برای برنامه‌ریزی مکانی ایجاد می‌کند (کانکپورن و امامی<sup>۶</sup>، ۲۰۱۱؛ بلخیری<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۱؛ صالحی<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۲؛ اشرفی<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۱۲؛ اسدی و همکاران ۲۰۲۲؛ شادمان و پای<sup>۱۰</sup>، ۲۰۲۳). ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهری به دلیل ساختار نامناسب، راه‌حل منحصر به فردی ندارد (راشد و ویکز<sup>۱۱</sup>، ۲۰۰۳). بتازگی پژوهش‌های فشرده‌ای برای ارائه راه‌حل قابل‌اعتمادی برای این مشکل انجام شده است که همه آن‌ها به دو دسته اصلی استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی زلزله و استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) تقسیم می‌شوند (دوزگون و همکاران، ۲۰۱۱). دو نمونه از نرم‌افزارهای مورد استفاده برای مدل‌سازی زلزله‌ها HAZUS و SELENA هستند (حسین پور<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). اگرچه استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی زلزله دارای مزایای متعددی از جمله استفاده از فرمت‌های داده‌های استاندارد و داشتن سطوح پایین‌تر خطاهای محاسباتی است؛ اما روش‌های MCDM این مزیت را دارند که کارشناسان را برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای از طریق هر سناریوی زلزله توانمند می‌سازد. علاوه بر این، با استفاده از الگوریتم‌های MCDM، کارشناسان می‌توانند شرایط مورد استفاده برای مدل‌سازی را با شرایط شهر تنظیم کنند (موهانتی<sup>۱۲</sup> و همکاران ۲۰۰۷؛ کولات<sup>۱۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۲؛ مرادی<sup>۱۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۵).

ایران در منطقه‌ای فعال از نظر لرزه‌ای واقع شده است و هر ساله زلزله‌های متعددی را تجربه می‌کند (اسدی و همکاران ۲۰۱۹). این زلزله‌ها در صورت وقوع با ریشترهای نسبتاً بالا می‌تواند خسارت‌های زیادی به زیرساخت‌ها وارد کنند. ساخت ساختمان‌هایی با مصالح غیراستاندارد، ساخت شهرها در نزدیکی گسل‌های اصلی، مناطق شهری پرازدحام و

1 Moustra et al  
 2 Shadmaan & Popy  
 3 Duzgun et al  
 4 Cheraghi et al  
 5 Asadi et al  
 6 Kanokporn and Iamaram  
 7 Belkhiri et al  
 8 Salehi et al  
 9 Ashrafi et al  
 10 Rashed and Weeks  
 11 Hosseinpour et al  
 12 Mohanty et al  
 13 Kolat et al  
 14 Moradi et al

فقدان برنامه‌های مدیریتی جامع از عوامل عمده‌ای هستند که به خسارت‌های بیشتر منجر می‌شوند (چینی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۹). تهران که تقریباً یک چهارم جمعیت کل کشور را در خود جای داده است، دارای سه گسل بزرگ شناخته‌شده و بسیاری از گسل‌های ناشناخته در محدوده خود است که آن را به شدت در برابر زلزله آسیب‌پذیر می‌کند (صمدی علی نیا و دلاور<sup>۲</sup>، ۲۰۱۱). هر ۱۵۰ سال یک‌بار زلزله‌هایی با بزرگی ۶ ریشتر یا بیشتر در تهران پیش‌بینی می‌شود. آخرین زمین‌لرزه بزرگ تقریباً ۱۷۰ سال پیش روی داده است. بنابراین، کارشناسان استدلال می‌کنند که باید در آینده نزدیک انتظار یک زلزله بزرگ را داشت (سیلاوی<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۶). پژوهش‌های بسیاری برای ارائه مدل‌های مختلف آسیب‌پذیری لرزه‌ای انجام شده است که به بررسی برخی از آن‌ها پرداخته‌ایم. اسریکانت<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۰) به پهنه‌بندی و ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمانی شهرهای گاندهی<sup>۵</sup> داهم<sup>۶</sup> و ادیپور<sup>۷</sup> هند پرداخته و به این نتیجه رسیده‌اند که دلیل اصلی خسارت‌ها در این شهرها کیفیت پایین در الگوی ساخت ساختمان‌ها بوده است. لیو و مالزوسکی<sup>۸</sup> (۲۰۱۳) از میانگین وزنی مرتب‌شده محلی و جهانی مبتنی بر GIS به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری در شهر لندن، استفاده کردند و به این نتیجه رسیده‌اند که تفاوت‌های اساسی بین الگوهای فضایی تولیدشده توسط روش‌های محلی و جهانی OWA وجود دارد. رحمان<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهر دهاکای بنگلادش<sup>۹</sup> در برابر زلزله و خطر آتش‌سوزی ناشی از وقوع زلزله را بر اساس پارامترهایی همچون قدمت، تعداد طبقات و همچنین تراکم جمعیت موردبررسی قراردادند. اسدی و همکاران (۲۰۱۹) از میانگین وزنی مرتب‌فازی (F-OWA) برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های و شبکه معابر شهری در منطقه ۶ تهران استفاده کردند. اسدی و همکاران (۲۰۲۲) مدل‌های WLC و تئوری راف را برای آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها به کار برده‌اند. آن‌ها نقش هر پارامتر را تجزیه و تحلیل کردند و اهمیت آن‌ها را نشان دادند. مالاکار و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۲۳) روش AHP را برای وزن‌دهی کردن و ادغام پارامترهای مؤثر بر آسیب‌پذیری ساختمان‌ها به کار بردند. آن‌ها بیان کردند که دقت دانش کارشناسان و مدل استفاده‌شده برای مدل‌سازی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها بسیار مؤثر است. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات مختلفی در رابطه با آسیب‌پذیر ساختمان‌ها در مقابله با خطر زلزله با روش‌های مختلف صورت گرفته است؛ اما در وهله اول توجه به سطح آب‌های زیرزمینی در سایر مطالعات گذشته کمتر موردتوجه قرار گرفته است و همچنین تولید سناریوهای مختلف آسیب‌پذیری به‌عنوان راه‌حلی برای حل مشکلات تصمیم‌گیری توسط سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری کمتر موردتوجه سایر پژوهشگران قرار گرفته است. در این مقاله با توجه به توسعه ترکیب روش‌های چندمعیاره فازی<sup>۱۱</sup> OWA شرایطی مهیا شد که امکان استفاده از عبارتهای مفهومی فازی در فرآیند تصمیم‌گیری وجود داشته باشد، چنین سیستم تجزیه و تحلیل چندمعیاره می‌تواند با ساده‌سازی تعریف راهبردهای تصمیم‌گیری راه‌حل مناسبی

1 Chini

2 Samadi Alinia and Delavar

3 Silavi

4 Srikanth

5 Gandhidham

6 Adipur

7 Lio and Malczewski

8 Rahman

9 Dhaka city, Bangladesh

10 Malakar

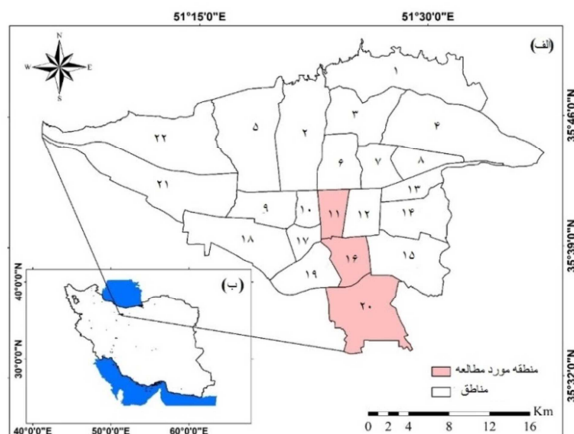
11 Ordered weighted Average

را برای حل مشکلات تصمیم‌گیری ارائه دهد. بنابراین با توجه به مطالب بیان‌شده، هدف اصلی این مطالعه تعیین و مقایسه نقاط آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهری با طراحی دو سناریو (در نظر گرفتن پارامتر مهم سطح آب زیرزمینی و بدون آن) و در درجات ریسک‌پذیری متفاوت است. همچنین هدف این مقاله بهره‌گیری از ترکیب مزایای استفاده از روش فازی و روش OWA در GIS به منظور تولید نقشه‌های آسیب‌پذیری بر اساس درجات مختلف ریسک بر اساس روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در جهت حل مشکل تصمیم‌گیری است.

## داده‌ها و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش مناطق یازده، شانزده و بیست شهرداری تهران است که از بین مناطق ۲۲ گانه تهران انتخاب شده است. تهران بیش از ده میلیون نفر جمعیت دارد و بیشترین تراکم آن در مناطق مرکزی و جنوب شهر ساکن است. اکثر این مناطق دارای ساختمان‌های قدیمی و غیراستاندارد هستند. علت انتخاب این مناطق از شهر تهران گسترش طولی آن‌ها در جهت شمالی-جنوبی شهر است و همچنین با توجه به متغیر بودن سطح آب زیرزمینی که بین مناطق شمالی و جنوبی وجود دارد، می‌توان نمایی کلی از آسیب‌پذیری شهری شهر تهران بدست آورد.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه نسبت به کشور ایران و موقعیت مناطق ۱۱، ۱۶ و ۲۰ نسبت به مناطق ۲۲ گانه شهر تهران

### معیارهای آسیب‌پذیری

قبل از تهیه و آماده‌سازی لایه‌های مختلف باید معیارها شناسایی، کلاس‌های آسیب‌پذیری تعیین و مرز کلاس‌ها مشخص شود (جدول ۱). در این مطالعه بر اساس نظرات کارشناسان و همچنین سایر مطالعات گذشته، ۷ شاخص آسیب برای مدل‌سازی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در نظر گرفته شد که کلاس‌های آسیب‌پذیری مربوط به هر شاخص نیز بر اساس نظرات کارشناسان و مطالعات گذشته صورت گرفته است (اسدی و همکاران، ۲۰۱۹؛ اسدی و همکاران، ۲۰۲۲؛ مالاکار و همکاران، ۲۰۲۳). چهار شاخص از عوامل آسیب‌پذیری فیزیکی ساختمانی شامل: نوع مصالح ساختمانی، قدمت بنا، فاصله از خط گسل‌های شمال تهران (مشا - فشم)، گسل جنوب تهران (گسل ری)، گسل محمودیه، گسل داوودیه، گسل شیان و ...، تراکم ساختمان و دو شاخص از عوامل زیرزمینی شامل: جنس خاک،

سطح آب زیرزمینی و یک شاخص هم از عوامل انسانی شامل: تراکم جمعیت، در نظر گرفته شده است (جدول ۱). قابل یادآوری است که منبع تهیه داده‌های بالا سازمان زمین‌شناسی، سازمان نقشه‌برداری کل کشور، شهرداری مناطق ۱۱، ۱۶ و ۲۰، شرکت آب منطقه‌ای استان تهران و مرکز آمار ایران بوده است.

جدول ۱: شاخص‌های آسیب‌پذیری ساختمان، طبقه‌بندی و امتیاز آسیب‌پذیری مربوط به هر طبقه بر اساس نظرات کارشناسان و سایر مطالعات گذشته

شاخص آسیب‌پذیری	کلاس آسیب‌پذیری	مرز کلاس
فاصله از خط گسل (متر)	۵	۰-۱۴۱۲
	۴	۱۴۱۳-۳۰۵۳
	۳	۳۰۵۴-۴۸۸۵
	۲	۴۸۸۶-۷۱۷۵
	۱	۷۱۷۶-۹۶۹۴
آب زیرزمینی (متر)	۵	۱۱-۱۹
	۴	۲۰-۳۰
	۳	۳۱-۴۶
	۲	۴۷-۶۲
	۱	۶۳-۸۵
قدمت ساختمان	۴	بیشتر از ۲۵ سال
	۳	بین ۱۶ تا ۲۵ سال
	۲	بین ۵ تا ۱۵ سال
	۱	کمتر از ۵ سال
نوع مصالح ساختمان	۵	سایر
	۴	بلوک سیمانی
	۳	آجر و آهن
	۲	فلزی و بتنی
	۱	بتن‌آرمه
تراکم جمعیت	۵	بیشتر از ۵۹۸۰ نفر
	۴	۲۴۸۶-۵۹۸۰
	۳	۹۴۹-۲۴۸۶
	۲	۲۲۸-۹۴۹
	۱	کمتر از ۲۲۸ نفر
تراکم ساختمانی	۵	بیشتر از ۸۸۳
	۴	۳۹۹-۸۸۳
	۳	۱۹۹-۳۹۹
	۲	۸۸-۱۹۹
	۱	کمتر از ۸۸
جنس خاک	۴	خاک رس
	۳	خاک ماسه‌ای و رسی
	۲	خاک ماسه‌ای
	۱	خاک شنی

## روش‌شناسی پژوهش

روند مدل پیشنهادی در هفت مرحله در شکل ۲ نشان داده شده است. در این پژوهش آسیب‌پذیری ساختمان‌های سه منطقه از شهر تهران در ۲ سناریوی متفاوت ۶ پارامتری و ۷ پارامتری مدل‌سازی شده است. ابتدا از میان تمامی معیارهایی که در سایر مطالعات گذشته به کار گرفته شده‌اند (اسدی و همکاران، ۲۰۱۹؛ اسدی و همکاران، ۲۰۲۲؛ مالاکار و همکاران، ۲۰۲۳)، هفت معیار ارجح بر اساس نظر کارشناسان انتخاب شده است. با استفاده از آراء مستقیم کارشناسان و مقایسه جامع بین معیارهای انتخاب‌شده، وزن‌دهی معیارها صورت گرفته است. در مرحله بعد، وزن‌های ترتیبی بر اساس کمیت زبانی موردنظر محاسبه شده و مقادیر معیار مرتب‌شده با استفاده از بردار وزن محاسبه‌شده بر اساس کمیت سازهای مفهومی فازی، تجمیع می‌شود و درجه آسیب‌پذیری نسبی لرزه‌ای به ساختمان‌ها اختصاص می‌یابد. درنهایت، پس از طبقه‌بندی و محاسبه درجات آسیب‌پذیری در نرم‌افزار ArcGIS (جدول ۲)، نقشه‌های نهایی آسیب‌پذیری در دو سناریوی مختلف با استراتژی‌های متفاوت تصمیم‌گیری تهیه شده است.



شکل ۲: مراحل ارزیابی آسیب‌پذیری

جدول ۲: کلاس‌های آسیب‌پذیری (مالزوسکی، ۲۰۰۶)

کلاس‌ها	بازه	تعریف
۱	۰-۰/۲	بسیار کم
۲	۰/۲-۰/۴	کم
۳	۰/۴-۰/۶	متوسط
۴	۰/۶-۰/۸	زیاد
۵	۰/۸-۱	بسیار زیاد

## روش میانگین وزنی مرتب‌شده OWA

تصمیم‌گیری در GIS مانند انتخاب و تخصیص مکان، تصمیم‌گیرنده را ملزم به درنظرگرفتن امتیاز گزینه‌ها در ابعاد چندگانه می‌کند که یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره است (گرین<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۱). به نظر می‌رسد MCDM مهم‌ترین بخش سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری در GIS است (جیانگ و ایستمن،<sup>۲</sup> ۲۰۰۰) MCDM مکانی

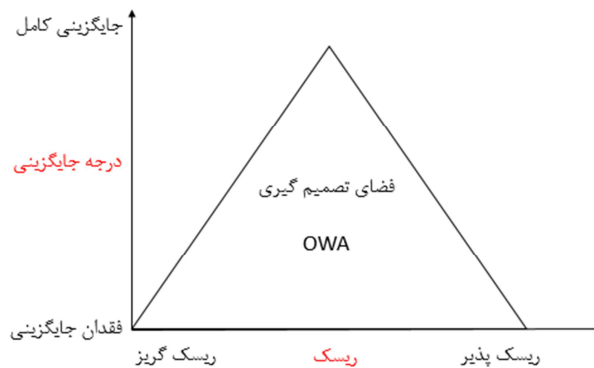
<sup>1</sup> Greene et al

<sup>2</sup> Jiang and Eastman

فرآیندی است که اطلاعات مفید (موردنیاز در تصمیم‌گیری) را از مقادیر ویژگی داده‌های مکانی استخراج می‌کند. اگرچه GIS و MCDM دو حوزه تحقیقاتی مجزا هستند، اما می‌توانند مکمل یکدیگر باشند. GIS تجسم و مدیریت داده‌های مکانی را تسهیل می‌کند، درحالی‌که MCDM مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها را برای کمک به کاربران در تصمیم‌گیری آگاهانه ارائه می‌دهد (الدراندالی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۳). با ترکیب این دو حوزه پژوهش، ابزار قدرتمندی برای MCDM مبتنی بر GIS تولید می‌شود (بروشاکی و مالزوسکی<sup>۲</sup>، ۲۰۱۰). روش میانگین وزنی مرتب‌شده یکی از روش‌های نسبتاً جدید در تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی است. روش میانگین وزنی مرتب‌شده OWA یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که قابلیت در نظر گرفتن اولویت‌ها و ارزیابی ذهنی تصمیم‌گیرنده را داراست. فرایند اتخاذ تصمیم نهایی در این روش بر اساس ریسک‌گزینی و ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرنده است. معادله روش OWA که در رابطه ۱ نشان داده شده است.

$$OWA_j = \sum_{i=1}^n \left( \frac{u_i v_i}{\sum_{i=1}^n u_i v_i} \right) Z_{ij} \quad (1)$$

$u_i$  وزن معیار مرتب‌شده  $i$  ( $w_i$ ) است،  $v_i$  المانی از وزن ترتیبی است  $v_i \in [0,1]$  و  $V=[V_1, V_2, \dots, V_n]$ ؛  $Z_{1j} \geq Z_{2j} \geq \dots \geq Z_{nj}$  که با مرتب‌سازی مجدد معیارها به‌دست آمده است و مقادیر آن  $X_{1j}, X_{2j}, X_{nj}$  است (بروشاکی و مالزوسکی<sup>۳</sup>، ۲۰۰۸).



شکل ۳: فضای تصمیم‌گیری در روش OWA (Romano et al., 2015)

شکل ۳ درجه‌ی ریسک‌پذیری موقعیت عملگر OWA را در بین روابط AND (مینیمم) و OR (ماکزیمم) نشان می‌دهد. این درجه بیانگر میزان تأکید تصمیم‌گیر بر روی مقادیر بهتر و یا بدتر یک مجموعه از شاخص‌ها و یا همان ریسک‌پذیری و ریسک‌گزینی تصمیم‌گیر است. درجه‌ی ORness به‌صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود.

$$ORness = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (n-i) \cdot W_i, \quad 0 \leq ORness \leq 1 \quad (2)$$

هرچقدر مقدار ORness بیشتر باشد، میزان ریسک‌پذیری یا خوش‌بینی تصمیم‌گیر بیشتر خواهد بود و هرچقدر مقدار ORness کمتر باشد، میزان بدبینی و یا ریسک‌گزینی تصمیم‌گیر بیشتر خواهد بود. به‌طورکلی یک عملگر OWA با درجه ریسک‌پذیری بیشتر از ۰/۵ معرف یک تصمیم‌گیر ریسک‌پذیر و خوش‌بین، درجه ریسک‌پذیری برابر با ۰/۵

1 Eldrandaly

2 Boroushaki and Malczewski

3 Boroushaki and Malczewski

معرف یک تصمیم‌گیر خنثی و درجه ریسک‌پذیری کمتر از  $0/5$  معرف یک تصمیم‌گیر ریسک‌گریز و بدبین خواهد بود (مالزوسکی، ۲۰۰۶). لازم به یادآوری است که هر چه رفتار عملگر OWA به عملگر "OR" نزدیک‌تر باشد، مقدار درجه ریسک‌پذیری به یک نزدیک‌تر است. درحالی‌که هر چه رفتار عملگر OWA به عملگر "AND" نزدیک‌تر باشد، مقدار درجه ریسک‌پذیری به صفر نزدیک‌تر است.

### کمیت سنج‌های مفهومی فازی

بر اساس نوع عبارت‌های مفهومی می‌توان آن‌ها را به دو دسته تقسیم کرد: کمیت‌سنج‌های مفهومی مطلق و کمیت-سنج‌های مفهومی نسبی (زاده<sup>۱</sup>، ۱۹۸۳). عبارت‌هایی مانند حداقل، حدوداً، تقریباً، بیشتر از و غیره نمونه‌هایی از کمیت‌سنج‌های مطلق هستند. کمیت‌سنج‌های مفهومی نسبی مبین کمیت نسبی مانند اغلب، تعداد زیادی، اندکی، تقریباً همگی، تقریباً نصف و غیره هستند. آن‌ها را می‌توان به‌عنوان دسته‌های فازی در فاصله واحد  $[0,1]$  در نظر گرفت. درواقع این کمیت‌سنج‌های مفهومی برای اندازه‌گیری تناسب مجموعه استفاده می‌شود که در آن‌ها "صفر" بیانگر  $0/$  و "یک" به معنی "تناسب  $100/$ " خواهد بود. بنابراین اگر  $Q$  یک کمیت‌سنج مفهومی باشد می‌تواند به‌عنوان یک دسته فازی  $Q$  از فاصله واحد  $[0,1]$  ارائه شود که برای هر  $P \in [0,1]$ ،  $Q(P)$  مبین درجه سازگاری  $P$  با مفهوم بیان‌شده توسط  $Q$  خواهد بود (مالزوسکی، ۲۰۰۶). با تغییر مشخصه  $\alpha$  می‌توان انواع مختلفی از کمیت‌سنج‌ها و عملگرهای آن‌ها را به‌دست آورد. به‌طورمثال، اگر  $\alpha$  یک باشد  $Q(P)$  متناسب با  $\alpha$  خواهد بود. بنابراین متناظر کمیت-سنج "نصف" می‌شود. با میل کردن  $\alpha$  به سمت صفر، کمیت‌سنج  $Q(P)$  بیانگر یکی از کران‌هایش خواهد بود. عبارت "حداقل یکی" را خواهیم داشت که با عملگر MAX مطابقت دارد. از طرف دیگر با میل کردن  $\alpha$  به سمت بی‌نهایت، کمیت‌سنج  $Q(P)$  کران دوم خود را ارائه می‌کند (عبارت همگی یا All) که برابر با عملگر MIN است.

$$Q_P = p^\alpha \quad \alpha > 0 \quad (3)$$

بردار وزن OWA با استفاده از کمیت‌های مفهومی فازی

$$W_j = Q_P \left( \frac{j}{n} \right) - Q_P \left( \frac{j-1}{n} \right), j = 1, 2, \dots \quad (4)$$

که در آن  $n$  تعداد کل معیارها و  $w_j$  وزن معیار  $j$  است.

با استفاده از معادلات (۳) و (۴)، وزن‌های ترتیبی در معادله (۵) محاسبه می‌شود (یاگر<sup>۲</sup>، ۱۹۸۸).

$$W_j = \left( \frac{j}{n} \right)^\alpha - \left( \frac{j-1}{n} \right)^\alpha, j = 1, 2, \dots \quad (5)$$

در اینجا مقدار  $\alpha$  درجه ORness یا خوش‌بینی است.

### روش Fuzzy-OWA

<sup>1</sup> Zadeh

<sup>2</sup> Yager

برای ترکیب مجموعه‌های فازی سه نوع عملیات پایه وجود دارد: (۱) عملیات اشتراک مجموعه‌های فازی (Intersection) (۲) عملیات اجتماع مجموعه‌های فازی (Union) (۳) عملیات میانگین‌گیری (Averaging). یاگر (۱۹۸۸) یک فن ترکیب بر پایه عملیات OWA که تلفیقی از سه نوع تابع ترکیبی بالا است، ارائه داد که عملیات ترکیب فازی پیوسته‌ای را بین اشتراک (AND) و اجتماع (OR) فازی، با تلفیق میانگین وزنی که بین آن دو قرار می‌گیرد، فراهم می‌آورد. از طرف دیگر، روش OWA انعطاف‌پذیری زیادی در لحاظ کردن اولویت تصمیم‌گیرندگان دارد و در ترکیب با سایر روش‌های تصمیم‌گیری پشتیبانی می‌تواند به نتایج بهتری منجر شود. روش‌های مرسوم OWA هنگامی که معیارهای ارزیابی گسترده باشند کارایی محدودی دارد. در این مواقع ترکیب معیارها به گونه‌ای که مفروضات تصمیم‌گیرنده در قبال روابط میان معیارها در نظر گرفته شود بسیار دشوار خواهد بود (مالزوسکی و همکاران، ۲۰۰۳). در چنین حالاتی جنبه‌های کلیدی مسئله تصمیم‌گیری ممکن است برحسب بعضی از کمیت‌های مفهومی فازی مانند "اکثر معیارها باید برآورده شود" یا "۸۰ درصد معیارها باید برآورده شود" بیان شود. این امر نیازمند تغییری در روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره‌است، به طوری که بتواند با شرایطی که شامل این کمیت‌های فازی است، مطابقت پیدا کند. این روش شامل ۳ بخش اصلی می‌شود: (۱) مشخص کردن نوع کمیت سنج مفهومی فازی، (۲) تولید یک دسته از وزن‌های ترتیبی مربوط به کمیت سنج مفهومی فازی، (۳) محاسبه و ارزیابی مربوط به موقعیت هر کدام از سلول‌ها با استفاده از تابع ترکیبی OWA (بروشاکی و مالزوسکی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۰).

### بحث و نتایج

برای محاسبه وزن معیارهای آسیب‌پذیری ساختمان در دو سناریوی شش و هفت پارامتری، از روش AHP و نرم‌افزار Expert Choice 11 استفاده شده، همه وزن‌ها با استفاده از مقایسه زوجی و فرمول‌های AHP محاسبه شده است (ساعتی<sup>۲</sup>، ۱۹۸۸). نتایج حاصل در جدول (۳) نشان داده شده است. برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری پس از وزن‌دهی معیارها و نرمال‌سازی آن‌ها و تهیه نقشه‌های معیار، این نقشه‌ها با استفاده از OWA فازی (با  $\alpha$  متفاوت) ترکیب شدند و ۱۰ نقشه آسیب‌پذیری با درجات ریسک‌پذیری مختلف در دو سناریو استخراج شد. مقدار وزن‌های ترتیبی و مقدار عملگر OWA در سناریوهای شش و هفت پارامتری با استفاده از جدول ۵ و ۴ به دست آمده است.

جدول ۳: وزن نهایی هریک از شاخص‌های آسیب‌پذیری

<sup>1</sup> Boroushaki and Malczewski

<sup>2</sup> Saaty

الف: آسیب پذیری با ۷ پارامتر		
وزن نهایی	معیارها	
۰/۲۳۰	تراکم ساختمانی	
۰/۲۱۰	تراکم جمعیت	
۰/۱۹	قدمت ساختمان	
۰/۱۶	آب	
۰/۱۱	مصالح ساختمان	
۰/۰۶	خط غسل	
۰/۰۴	جنس خاک	
ضریب ناسازگاری: ۰/۰۶		
ب: آسیب پذیری با ۶ پارامتر		
۰/۲۵	تراکم ساختمان	
۰/۲۳	تراکم جمعیت	
۰/۲۱	قدمت ساختمان	
۰/۱۳	نوع مصالح	
۰/۱۱	خط غسل	
۰/۰۷	جنس خاک	
ضریب ناسازگاری: ۰/۰۷		

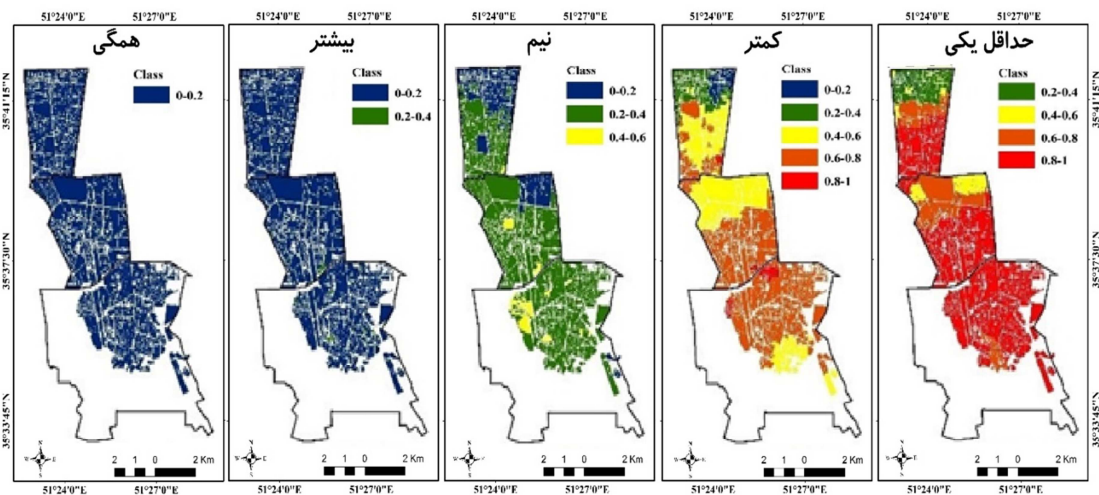
جدول ۴: وزن بردار به دست آمده بر اساس هر کمیت مفهومی فازي و استراتژی های تصمیم گیری برای سناریوی ۶ پارامتری

کمیت زبانی	وزن ۶ پارامتری	آلفا	اپراتور	سناریو	ریسک پذیری
حداقل یکی	۱۰۰۰۰۰	۰/۰۰۱	OR	بسیار خوشبینانه	۱
کمتر	۰ ۰/۰۲۵ ۰/۰۵ ۰/۱۲۵ ۰/۳ ۰/۵	۳	%	خوش بینانه	۰/۷۵
نیم	۰/۱۶۶ ۰/۱۶۶ ۰/۱۶۶ ۰/۱۶۶ ۰/۱۶۶ ۰/۱۶۶	۱	WLC	خنثی	۰/۵
بیشتر	۰/۵ ۰/۳ ۰/۱۲۵ ۰/۰۵ ۰/۰۲۵ ۰	۳	%	بدبینانه	۰/۲۵
همگی	۰۰۰۰۰۱	۱۰۰۰	AND	بسیار بدبینانه	۰

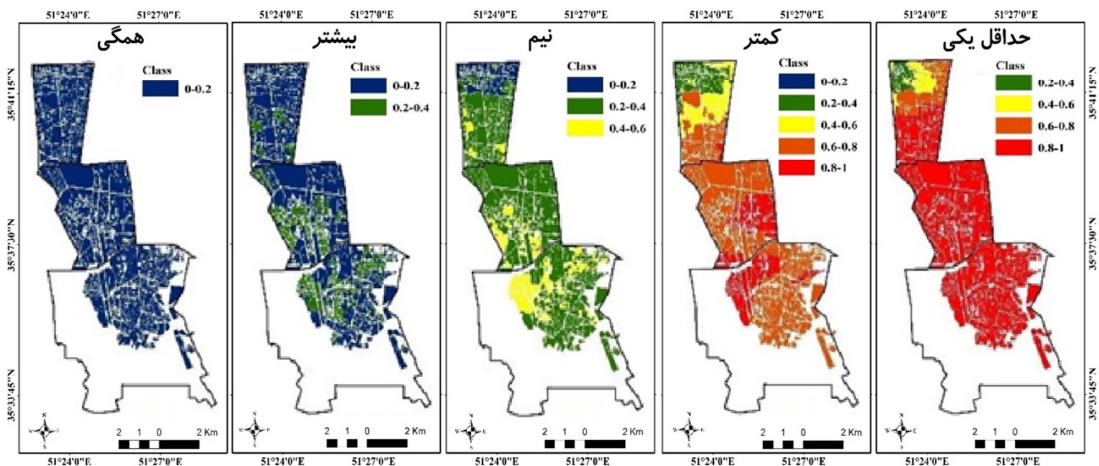
جدول ۵: وزن بردار به دست آمده بر اساس هر کمیت مفهومی فازي و استراتژی های تصمیم گیری برای سناریوی ۷ پارامتری

کمیت های مفهومی فازي	وزن ۷ پارامتری	آلفا	اپراتور	استراتژی تصمیم گیری	ریسک پذیری
حداقل یکی	۱۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۱	OR	بسیار خوش بینانه	۱
کمتر	۰ ۰/۰۳۲ ۰/۰۰۸ ۰/۰۷۸ ۰/۱۵۷ ۰/۲۲۷ ۰/۴۴۵	۳	%	خوش بینانه	۰/۷۵
نیم	۰/۱۴۲ ۰/۱۴۲ ۰/۱۴۲ ۰/۱۴۲ ۰/۱۴۲ ۰/۱۴۲ ۰/۱۴۲	۱	WLC	خنثی	۰/۵
بیشتر	۰/۴۴۵ ۰/۲۲۷ ۰/۱۵۷ ۰/۰۷۸ ۰/۰۳۲ ۰/۰۰۸ ۰	۳	%	بدبینانه	۰/۲۵
همگی	۰۰۰۰۰۰۱	۱۰۰۰	AND	بسیار بدبینانه	۰

شکل ۴ و ۵ راه‌حل‌های مختلف، برای مسئله ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای بر اساس استراتژی‌های تصمیم‌گیری متفاوت به کار گرفته شده را نشان می‌دهد. استراتژی‌های خوش‌بینانه در مقایسه با استراتژی بدبینانه منجر به درجه آسیب‌پذیری بالاتری می‌شوند؛ زیرا در سناریوهای خوش‌بینانه وزن‌های بالاتر به ویژگی‌های با مقادیر بالاتر اختصاص داده می‌شود و بالعکس. در نتیجه، تعداد واحدهای طبقه‌بندی شده در طبقات آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد در حال افزایش است. با این حال، در استراتژی‌های تصمیم‌گیری بدبینانه، بیشتر ساختمان‌ها در کلاس‌های «آسیب‌پذیری بسیار کم» و «آسیب‌پذیری کم» طبقه‌بندی می‌شوند.



شکل ۴: پنج نقشه آسیب‌پذیری لرزه‌ای تهران با ۶ معیار بر اساس کمیت‌سنج‌های مختلف با استفاده از اپراتور OWA



شکل ۵: پنج نقشه آسیب‌پذیری لرزه‌ای تهران بر اساس کمیت‌سنج‌های مختلف با استفاده از اپراتور OWA

استفاده از کمیت "حداقل یکی" به این معنی است که باید در انتظار یک استراتژی تصمیم‌گیری بسیار خوش‌بینانه باشیم. این کمیت برای ایجاد شدن، حداقل به یکی از معیارها نیاز دارد که برابر با عملگر "OR" است. بردار وزن ترتیبی اول در سناریوی ۶ پارامتری [۰.۰ و ۰.۰ و ۰.۰ و ۰.۰ و ۰.۰ و ۰.۰] و در سناریوی ۷ پارامتری [۰.۰ و ۰.۰ و ۰.۰ و ۰.۰ و ۰.۰ و ۰.۰ و ۰.۰]، بر اساس کمیت

"حداقل یکی" در هر دو سناریو به دست می‌آید (جدول ۵ و ۴). ضرب این بردار وزن در بردار معیارهای ورودی که به صورت نزولی مرتب شده، منجر به ایجاد حداکثر مقدار می‌شود. بنابراین، مقدار ترکیبی (درجه آسیب‌پذیری) و مقدار حداکثر ویژگی یکسان خواهد بود. بر اساس این استراتژی، در سناریوی ۷ پارامتری ۸۵ درصد و در سناریوی ۶ پارامتری ۶۷ درصد ساختمان‌های سه منطقه ۲۰ و ۱۶ و ۱۱ در کلاس «بسیار آسیب‌پذیر» طبقه‌بندی شده‌اند و تنها کمتر از ۵ درصد ساختمان‌ها در هر دو سناریو به عنوان «آسیب‌پذیری بسیار کم» در نظر گرفته می‌شوند. علاوه بر این، تأثیر آب زیرزمینی در اینجا بسیار محسوس است و باعث می‌شود تقریباً تمام ساختمان‌های منطقه ۲۰ و ۱۶ و ساختمان‌های بخش جنوبی منطقه ۱۱ به عنوان «بسیار آسیب‌پذیر» طبقه‌بندی شوند (شکل ۵ و ۴).

با استفاده از کمیت‌سنج‌های "کمتر از"، یک تصمیم خوش‌بینانه در مورد مشکل آسیب‌پذیری لرزه‌ای گرفته شده است. بر اساس این کمیت‌ها، وزن‌های بالاتری به مقادیر بااهمیت بیشتر اختصاص داده می‌شود و بالعکس. بنابراین، در نتایج منجر به ایجاد مقدار ترکیبی می‌شود که نزدیک به حداکثر مقدار است. بردارهای وزن ترتیبی دوم ۶ پارامتری [۰/۲۵ و ۰/۰۵ و ۰/۱۲۵ و ۰/۳ و ۰/۵] و وزن ترتیبی دوم ۷ پارامتری [۰ و ۰/۰۰۸ و ۰/۰۳۲ و ۰/۰۷۸ و ۰/۱۵۷ و ۰/۲۲۷ و ۰/۴۴۵] به ترتیب در سناریوهای ۶ پارامتری و ۷ پارامتری با استفاده از کمیت‌سنج‌های "کمتر از" به دست می‌آیند (جدول ۴ و ۵). در سناریوی ۶ پارامتری ۵۵ درصد و در سناریوی ۷ پارامتری ۶۳ درصد از کل ساختمان‌ها همچنان به کلاس «آسیب‌پذیری زیاد» مربوط می‌شود. به طوری که نتایج "کمتر از" بیشتر شبیه عملگر "Max" است. علاوه بر این، تأثیر سطح آب‌های زیرزمینی در مقایسه با «حداقل یکی» کاهش یافته است و برخی از ساختمان‌های جنوب منطقه ۱۱ و ۲۰ و شمال منطقه ۱۶ دیگر «بسیار آسیب‌پذیر» در نظر گرفته نمی‌شوند (شکل ۵ و ۴). کمیت "نصف" یک کمیت‌سنج خنثی است و مطابق با استراتژی است که در آن ۵۰٪ از معیارها باید توسط یک مقدار قابل قبول جایگزین شود. بر اساس این کمیت، وزن‌های مساوی به مقادیر ویژگی‌ها بااهمیت بالا و پایین اختصاص داده می‌شود. بنابراین [۰/۱۶۶ و ۰/۱۶۶ و ۰/۱۶۶ و ۰/۱۶۶ و ۰/۱۶۶ و ۰/۱۶۶] در سناریوی ۶ پارامتری و [۰/۱۴۲ و ۰/۱۴۲ و ۰/۱۴۲ و ۰/۱۴۲ و ۰/۱۴۲ و ۰/۱۴۲ و ۰/۱۴۲] در سناریوی ۷ پارامتری باید در بردار مقادیر معیارهای ورودی که به صورت نزولی مرتب شده ضرب شود. در این استراتژی، ارزش ترکیبی حاصل، به بسیار زیاد یا بسیار کم تمایل ندارد. در نتیجه، بیشتر ساختمان‌ها در کلاس «متوسط» طبقه‌بندی می‌شوند (شکل ۵ و ۴).

"بیشتر از" کمیت‌هایی هستند که به ترتیب در سناریوی شش پارامتری با ۲٪ و در سناریوی هفت پارامتری با ۲۱٪ درجه خوش‌بینی مشکل را حل می‌کند. "بیشتر از" کمیت بدبینانه‌ای است که طیفی از پاسخ‌ها را ارائه می‌دهند که بین «AND» و «WLC» قرار می‌گیرد (جدول ۵ و ۴). با استفاده از معادله ۵ برای «بیشتر از» وزن‌های ترتیبی در سناریوی ۶ پارامتری [۰/۵ و ۰/۳ و ۰/۱۲۵ و ۰/۰۵ و ۰/۰۲۵ و ۰] و در سناریوی ۷ پارامتری [۰/۴۴۵ و ۰/۲۷۷ و ۰/۱۵۷ و ۰/۰۷۸ و ۰/۰۳۲ و ۰/۰۰۸ و ۰] است. این کمیت‌ساز تمایل دارد که وزن‌های بالاتری را به مقادیر ویژگی‌های بااهمیت پایین‌تر اختصاص دهد و بالعکس. بر اساس استراتژی «بیشتر از»، بیش از ۹۲ درصد ساختمان‌ها در سناریوی هفت پارامتری و بیش از ۷۹ درصد ساختمان‌ها در سناریوی شش پارامتری در کلاس «آسیب‌پذیری کم» و «آسیب‌پذیری بسیار کم» طبقه‌بندی می‌شوند. علاوه بر این، تأثیر آب‌های زیرزمینی کاهش یافته و باعث شده قسمت‌های زیادی از منطقه ۲۰ و ۱۶ و ۱۱ به عنوان ساختمان‌هایی با آسیب‌پذیری کم در نظر گرفته شوند (شکل ۵ و ۴).

زمانی که کارشناس می‌خواهد همه معیارها با یک نتیجه قابل قبول ارائه شوند، «همه» باید به‌عنوان کمیت زبانی انتخاب شود. بنابراین، کمیت «همه» با عملگر «AND» مطابقت دارد. بردار وزن ۶ پارامتری [۱ و ۰ و ۰ و ۰ و ۰ و ۰]، و بردار وزن ۷ پارامتری [۱ و ۰ و ۰ و ۰ و ۰ و ۰ و ۰] با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود. به این معنی که وزن تمام مقادیر معیار به‌جز حداقل یکی، صفر است. به طوری که کمتر از ۵ درصد از کل ساختمان‌ها در کلاس بسیار آسیب‌پذیر قرار دارند (شکل ۵ و ۴).

### نتیجه‌گیری

این مطالعه کاربرد کمیت‌سنج‌های مفهومی OWA را در ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله سه منطقه از شهر تهران و در دو سناریو با در نظر گرفتن سطح آب زیرزمینی و بدون آن نشان می‌دهد. این مدل می‌تواند اطلاعات کمی و کیفی در مورد استراتژی تصمیم‌گیری را با استفاده از کمیت‌سنج‌های زبانی که ابزار قدرتمندی برای تعامل انسان و رایانه هستند، در خود بگنجانند. همچنین این مدل توانایی ارائه استراتژی‌های متفاوت تصمیم‌گیری را برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان از طریق کمیت سازه‌های مختلف ارائه می‌دهد که در مدل‌های معمول تصمیم‌گیری چندمعیاره کمتر مورد توجه بوده است. به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری مناطق ۱۱، ۱۶ و ۲۰ شهر تهران، مجموعه‌ای از معیارها که با استفاده از نظرات کارشناسان و مطالعات گذشته انتخاب شده بودند، در مدل OWA مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این معیارها شامل: (۱) تراکم ساختمان، (۲) تراکم جمعیت، (۳) قدمت (سال ساخت)، (۴) سطح آب زیرزمینی، (۵) نوع مصالح، (۶) فاصله از خط گسل و (۷) جنس خاک است. در سناریوی اول شش معیار (بدون در نظر گرفتن سطح آب زیرزمینی) و سناریوی دوم شامل هفت معیار (با در نظر گرفتن سطح آب زیرزمینی) در فرایند ارزیابی آسیب‌پذیری مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در سناریوی ۶ پارامتری و در خوش‌بینانه‌ترین حالت ۶۷ درصد ساختمان‌های مناطق ۱۱ و ۱۶ و ۲۰ تهران از آسیب‌پذیری بالایی برخوردار هستند که این مقدار با همان استراتژی تصمیم‌گیری، در سناریوی ۷ پارامتری با در نظر گرفتن سطح آب زیرزمینی در این مناطق به ۸۵ درصد رسیده است که نشان‌دهنده افزایش قابل توجه آسیب‌پذیری است. آسیب‌پذیری فیزیکی مناطق ۲۰، ۱۶، ۱۱ تهران با در نظر گرفتن سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد که بر اساس همه استراتژی‌های تصمیم‌گیری میزان آسیب‌پذیری از شمال به سمت جنوب افزایش یافته است. به‌عبارت‌دیگر، میزان آسیب‌پذیری در مناطق ۲۰ و ۱۶ که دارای سطح آب زیرزمینی کمتری نسبت به منطقه ۱۱ است رو به افزایش است و این موضوع نمایانگر حساسیت آسیب‌پذیر بودن برخی مناطق قدیمی و جنوبی شهر تهران به علت عمق کم سطح آب زیرزمینی و ایجاد پدیده روانگرایی هنگام وقوع زلزله است. برای تحلیل نتایج، صحت‌سنجی و معرفی عوامل بسیار مهم در افزایش آسیب‌پذیری شهری، بازدیدهای مجدد از مناطق صورت گرفته است. ساختمان‌هایی که دارای میزان آسیب‌پذیری بالایی بوده‌اند بیشتر در محدوده‌ای تمرکز داشته‌اند که دارای عمق سطح آب زیرزمینی کمتر، بافت فرسوده بیشتر، دارای تمرکز شدید ساخت‌وساز و نوع مصالح نیز مناسب نبوده است. بنابراین با ساماندهی کردن و تمرکززدایی ساخت‌وساز در بخش‌های مختلف شهری و همچنین برنامه‌ریزی شهری تا حد زیادی می‌توان میزان آسیب‌پذیر بودن ساختمان را کاهش داد.

استفاده از این نتایج در برنامه‌ریزی شهری، به‌ویژه در توسعه شهری و برنامه‌ریزی برای جستجو و نجات زلزله‌زدگان را از منظر مدیریت بلایای شهری تسهیل کند که اساساً در رشد و مدیریت کلان‌شهر هوشمند ضروری است. اگرچه مدل پیشنهادی نتایج امیدوارکننده‌ای را ارائه می‌کند که تا حدودی به تعدادی از نگرانی‌ها پاسخ می‌دهد؛ اما مسائل جدید در مدیریت بلایا به پژوهش‌های بیشتری نیاز دارد. کارهای آینده ممکن است شامل تعدادی مسائل به شرح زیر باشد: ۱- تصمیم‌گیری گروهی: کارشناسان مختلف نه‌تنها نظرات متفاوتی در مورد یک موضوع دارند، بلکه ممکن است در برخی موارد دارای اشتباه نیز باشند. استفاده بیش از یک متخصص در تصمیم‌گیری ممکن است نتایج دقیق‌تر و بهتری ارائه دهد که قابلیت اطمینان استراتژی تصمیم را تضمین می‌کند. ۲- بررسی آسیب‌پذیری انسان در برابر زلزله: آسیب‌پذیری لرزه‌ای انسان به‌اندازه آسیب‌پذیری لرزه‌ای فیزیکی حیاتی است. اگر زلزله در شب اتفاق بیفتد، تلفات بیشتری در مناطق مسکونی و تلفات کمتری در مناطق تجاری و صنعتی رخ می‌دهد. بنابراین، آسیب‌پذیری لرزه‌ای انسان نقش کلیدی در عملیات جستجو و نجات دارد و اطلاعات دقیق در مورد آسیب‌پذیری انسان، چگونگی یافتن افراد مصدوم را بهبود می‌بخشد. گنجاندن درجه خوش‌بینی در آسیب‌پذیری انسان می‌تواند موضوع مطالعات آینده باشد.

## منابع

- Asadi, Y., Samany, N. N., & Ezimand, K. 2019. Seismic vulnerability assessment of urban buildings and traffic networks using a fuzzy ordered weighted average. *Journal of Mountain Science*, 16(3), 677-688.
- Asadi, Y., Neysani Samany, N., Kiavarz Moqadam, M., Abdollahi Kakroodi, A., & Argany, M. 2022. Seismic vulnerability assessment of urban buildings using the rough set theory and weighted linear combination. *Journal of Mountain Science*, 19(3), 849-861
- Ashrafi, Kh., Shafiepour, M. Ghasemi, L. and B. Najaraarabi. 2012. Prediction of Climate Change Induced Temperature Rise in Regional Scale Using Neural Network, *International Journal of Environmental Research* 6 (3), 677-688
- Belkhiri, L., Boudoukha, A., and L. Mouni. 2011. A multivariate Statistical Analysis of 250 Groundwater Chemistry Data, *International Journal of Environmental Research* 5 (2), 537- 544.
- Borouhaki, S., and J. Malczewski. 2010. "Using the Fuzzy Majority Approach for GIS-Based Multicriteria Group Decision-Making." *Computers & Geosciences* 36 (3): 302– 312. doi:10.1016/j.cageo.2009.05.011.
- Borouhaki, S., Malczewski, J., 2008. Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS. *Comput. Geosci.* 34, 399–410.
- Cheraghi, A., Wang, Y., Marković, N., & Ou, G. 2024. Efficient post-earthquake reconnaissance planning using adaptive batch-mode active learning. *Advanced Engineering Informatics*, 60, 102414.
- Chini, M., N. Pierdicca, and W. J. Emery. 2009. "Exploiting SAR and VHR Optical Images to Quantify Damage Caused by the 2003 Bam Earthquake." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47 (1): 145–152. doi:10.1109/TGRS.2008.2002695.
- Duzgun, H. S. B., M. S. Yucemen, H. S. Kalaycioglu, K. Celik, S. Kemec, K. Ertugay, and A. Deniz. 2011. "An Integrated Earthquake Vulnerability Assessment Framework for Urban Areas." *Natural Hazards* 59 (2): 917–947. doi:10.1007/s11069-011-9808-6.
- Eldrandaly, K. A. 2013. "Exploring Multi-Criteria Decision Strategies in GIS with Linguistic Quantifiers: An Extension of the Analytical Network Process Using Ordered Weighted Averaging Operators." *International Journal of Geographical*
- Greene, R., R. Devillers, J. E. Luther, and B. G. Eddy. 2011. "GIS- Based Multiple-Criteria Decision Analysis." *Geography Compass* 5 (6): 412–432. doi:10.1111/j.1749-8198.2011. 00431.
- Jiang, H., and J. Ronald Eastman. 2000. "Application of Fuzzy Measures in Multi-Criteria Evaluation in GIS." *International Journal of Geographical Information Science* 14 (2): 173– 184. doi:10.1080/136588100240903.
- Hosseinpour, V., Saeidi, A., Nollet, M. J., & Nastev, M. 2021. Seismic loss estimation software: a comprehensive review of risk assessment steps, software development, and limitations. *Engineering structures*, 232, 111866.
- Kanokporn, K. and V. Iamaram. 2011. *Ecological Impact Assessment; Conceptual Approach for Better Outcomes*, Int. J. Environ. Res., 5 (2), 435-446.
- Kolat, C., R. Ulusay, and M. Lutfi Suzen. 2012. "Development of Geotechnical Microzonation Model for Yenisehir (Bursa, Turkey) Located at a Seismically Active Region." *Engineering Geology* 127: 36–53. doi:10.1016/j.enggeo. 2011.12.014.

- Malakar, S., Rai, A. K., & Gupta, A. K. 2023. Earthquake risk mapping in the Himalayas by integrated analytical hierarchy process, entropy with neural network. *Natural Hazards*, 116(1), 951-975.
- Malczewski, J., et al. (2003). GIS multicriteria evaluation with ordered weighted averaging (OWA): a case study of developing watershed management strategies. *Environment and Planning A* 35 (10), 1769-1784
- Malczewski, J. 2006. "Ordered Weighted Averaging with Fuzzy Quantifiers: GIS-Based Multicriteria Evaluation for LandUse Suitability Analysis." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 8 (4): 270-277. doi:10.1016/j.jag.2006.01.003.
- Mohanty, W. K., M. Yanger Walling, S. K. Nath, and I. Pal. 2007. "First Order Seismic Microzonation of Delhi, India Using Geographic Information System (GIS)." *Natural Hazards* 40 (2): 245-260. doi:10.1007/s11069-006-0011-0.
- Moustra, M., Avraamides, M., & Christodoulou, C. 2011. Artificial neural networks for earthquake prediction using time series magnitude data or seismic electric signals. *Expert systems with applications*, 38(12), 15032-15039.
- Moradi, M., Delavar, M. R., & Moshiri, B. (2015). A GIS-based multi-criteria decision-making approach for seismic vulnerability assessment using quantifier-guided OWA operator: a case study of Tehran, Iran. *Annals of GIS*, 21(3), 209-222.
- Rahman, N., Ansary, M. A., & Islam, I. (2015). GIS-based mapping of vulnerability to earthquake and fire hazard in Dhaka city, Bangladesh. *International journal of disaster risk reduction*, 13, 291-300.
- Rashed, T., and J. Weeks. 2003. "Assessing Vulnerability to Earthquake Hazards through Spatial Multicriteria Analysis of Urban Areas." *International Journal of Geographical Information Science* 17 (6): 547-576. doi:10.1080/1365881031000114071
- Samadi Alinia, H., and M. R. Delavar. 2011. "Tehran's Seismic Vulnerability Classification Using Granular Computing Approach." *Applied Geomatics* 3 (4): 229-240. doi:10.1007/s12518-011-0068-7.
- Salehi, E., Zebardast, L. and A. R. Yavri. 2012. Detecting Forest Fragmentation with Morphological Image Processing in Golestan National Park in Northeast of Iran, *International Journal of Environmental Research* 6 (2), 531-536
- Shadmaan, M. S., & Popy, S. (2023). An assessment of earthquake vulnerability by multi-criteria decision-making method. *Geohazard Mechanics*, 1(1), 94-102
- Srikanth, Terala and others. (2010). Earthquake Vulnerability Assessment of Existing Buildings in Gandhidham and Adipur Cities Kachchh, Gujarat, India.
- Silavi, T., M. R. Delavar, M. R. Malek, N. Kamalian, and K. Karimizand. 2006. "An Integrated Strategy for GIS-Based Fuzzy Improved Earthquake Vulnerability Assessment." *Proceedings of Conference, ISPRS, The Second International Symposium on Geo-information for Disaster Management (Gi4DM)*, Goa, September 25-26, 6p
- Zadeh, L.A. 1983. A computational approach to fuzzy quantifiers in natural languages. *Computers and Mathematics with Applications* 9, 149-184.
- Yager RR 1988. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 18 (1): 183-190. <https://doi.org/10.1109/21.87068>.

## References

### References (in Persian)

### References (in English)

- Asadi, Y., Samany, N. N., & Ezimand, K. 2019. Seismic vulnerability assessment of urban buildings and traffic networks using a fuzzy ordered weighted average. *Journal of Mountain Science*, 16(3), 677-688.
- Asadi, Y., Neysani Samany, N., Kiavarz Moqadam, M., Abdollahi Kakroodi, A., & Argany, M. 2022. Seismic vulnerability assessment of urban buildings using the rough set theory and weighted linear combination. *Journal of Mountain Science*, 19(3), 849-861
- Ashrafi, Kh., Shafiepour, M. Ghasemi, L. and B. NajarAraabi. 2012. Prediction of Climate Change Induced Temperature Rise in Regional Scale Using Neural Network, *International Journal of Environmental Research* 6 (3), 677-688
- Belkhir, L., Boudoukha, A., and L. Mouni. 2011. A multivariate Statistical Analysis of 250 Groundwater Chemistry Data, *International Journal of Environmental Research* 5 (2), 537- 544.
- Borouhaki, S., and J. Malczewski. 2010. "Using the Fuzzy Majority Approach for GIS-Based Multicriteria Group Decision-Making." *Computers & Geosciences* 36 (3): 302– 312. doi:10.1016/j.cageo.2009.05.011.
- Borouhaki, S., Malczewski, J., 2008. Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS. *Comput. Geosci.* 34, 399–410.
- Cheraghi, A., Wang, Y., Marković, N., & Ou, G. 2024. Efficient post-earthquake reconnaissance planning using adaptive batch-mode active learning. *Advanced Engineering Informatics*, 60, 102414.
- Chini, M., N. Pierdicca, and W. J. Emery. 2009. "Exploiting SAR and VHR Optical Images to Quantify Damage Caused by the 2003 Bam Earthquake." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47 (1): 145–152. doi:10.1109/TGRS.2008.2002695.
- Duzgun, H. S. B., M. S. Yucemen, H. S. Kalaycioglu, K. Celik, S. Kemec, K. Ertugay, and A. Deniz. 2011. "An Integrated Earthquake Vulnerability Assessment Framework for Urban Areas." *Natural Hazards* 59 (2): 917–947. doi:10.1007/s11069-011-9808-6.
- Eldrandaly, K. A. 2013. "Exploring Multi-Criteria Decision Strategies in GIS with Linguistic Quantifiers: An Extension of the Analytical Network Process Using Ordered Weighted Averaging Operators." *International Journal of Geographical*
- Greene, R., R. Devillers, J. E. Luther, and B. G. Eddy. 2011. "GIS- Based Multiple-Criteria Decision Analysis." *Geography Compass* 5 (6): 412–432. doi:10.1111/j.1749-8198.2011. 00431.
- Jiang, H., and J. Ronald Eastman. 2000. "Application of Fuzzy Measures in Multi-Criteria Evaluation in GIS." *International Journal of Geographical Information Science* 14 (2): 173– 184. doi:10.1080/136588100240903.
- Hosseinpour, V., Saeidi, A., Nollet, M. J., & Nastev, M. 2021. Seismic loss estimation software: a comprehensive review of risk assessment steps, software development, and limitations. *Engineering structures*, 232, 111866.
- Kanokporn, K. and V. Jamaram. 2011. Ecological Impact Assessment; Conceptual Approach for Better Outcomes, *Int. J. Environ. Res.*, 5 (2), 435-446.
- Kolat, C., R. Ulusay, and M. Lutfi Suzen. 2012. "Development of Geotechnical Microzonation Model for Yenisehir (Bursa, Turkey) Located at a Seismically Active Region." *Engineering Geology* 127: 36–53. doi:10.1016/j.enggeo. 2011.12.014.
- Malakar, S., Rai, A. K., & Gupta, A. K. 2023. Earthquake risk mapping in the Himalayas by integrated analytical hierarchy process, entropy with neural network. *Natural Hazards*, 116(1), 951-975.
- Malczewski, J., et al. (2003). GIS multicriteria evaluation with ordered weighted averaging (OWA): a case study of developing watershed management strategies. *Environment and Planning A* 35 (10), 1769–1784
- Malczewski, J. 2006. "Ordered Weighted Averaging with Fuzzy Quantifiers: GIS-Based Multicriteria Evaluation for LandUse Suitability Analysis." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 8 (4): 270–277. doi:10.1016/j.jag.2006.01.003.
- Mohanty, W. K., M. Yanger Walling, S. K. Nath, and I. Pal. 2007. "First Order Seismic Microzonation of Delhi, India Using Geographic Information System (GIS)." *Natural Hazards* 40 (2): 245–260. doi:10.1007/s11069-006-0011-0.
- Moustra, M., Avraamides, M., & Christodoulou, C. 2011. Artificial neural networks for earthquake prediction using time series magnitude data or seismic electric signals. *Expert systems with applications*, 38(12), 15032-15039.
- Moradi, M., Delavar, M. R., & Moshiri, B. (2015). A GIS-based multi-criteria decision-making approach for seismic vulnerability assessment using quantifier-guided OWA operator: a case study of Tehran, Iran. *Annals of GIS*, 21(3), 209-222.
- Rahman, N., Ansary, M. A., & Islam, I. (2015). GIS-based mapping of vulnerability to earthquake and fire hazard in Dhaka city, Bangladesh. *International journal of disaster risk reduction*, 13, 291-300.
- Rashed, T., and J. Weeks. 2003. "Assessing Vulnerability to Earthquake Hazards through Spatial Multicriteria Analysis of Urban Areas." *International Journal of Geographical Information Science* 17 (6): 547–576. doi:10.1080/1365881031000114071
- Samadi Alinia, H., and M. R. Delavar. 2011. "Tehran's Seismic Vulnerability Classification Using Granular Computing Approach." *Applied Geomatics* 3 (4): 229–240. doi:10.1007/s12518-011-0068-7.
- Salehi, E., Zebardast, L. and A. R. Yavri. 2012. Detecting Forest Fragmentation with Morphological Image Processing in Golestan National Park in Northeast of Iran, *International Journal of Environmental Research* 6 (2), 531-536

- Shadmaan, M. S., & Popy, S. (2023). An assessment of earthquake vulnerability by multi-criteria decision-making method. *Geohazard Mechanics*, 1(1), 94-102
- Srikanth, Terala and others. (2010). Earthquake Vulnerability Assessment of Existing Buildings in Gandhidham and Adipur Cities Kachchh, Gujarat, India.
- Silavi, T., M. R. Delavar, M. R. Malek, N. Kamalian, and K. Karimizand. 2006. "An Integrated Strategy for GIS-Based Fuzzy Improved Earthquake Vulnerability Assessment." *Proceedings of Conference, ISPRS, The Second International Symposium on Geo-information for Disaster Management (Gi4DM)*, Goa, September 25–26, 6p
- Zadeh, L.A. 1983. A computational approach to fuzzy quantifiers in natural languages. *Computers and Mathematics with Applications* 9, 149–184.
- Yager RR 1988. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 18 (1): 183-190. <https://doi.org/10.1109/21.87068>.