



Earthquake possibility space of Ahvaz city based on intuitionistic fuzzy theory

Sasan Motaghed^{1✉}, Marzieh Shamsizadeh², Nasrolla Eftekhari³

1. Assistant professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran. E-mail: motaghed@bkatu.ac.ir
2. Assistant professor, Department of Mathematic, Faculty of energy and data science, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran. E-mail: shamsizadeh.m@bkatu.ac.ir
3. Assistant professor, Faculty of Technology and Mining, Yasouj University, Yasouj, Iran. E-mail: sn.eftekhari@yu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 8 August 2024
Received in revised form 27
October 2024
Accepted 4 November 2024

Keywords:

probabilistic seismic hazard
analysis (PSHA), logic tree,
uncertainty, occurrence
possibility.

ABSTRACT

In this study, we present the Seismic Hazard Possibility Space (SHPS) for the city of Ahvaz. To achieve this, we applied the intuitionistic fuzzy method to weigh the logic tree used in the hazard analysis and constructed the SHPS based on expert opinions regarding the degrees of membership and non-membership. Hazard disaggregation was performed by through the concept of intuitionistic fuzzy sets, leading to the development of an intuitionistic fuzzy of an Intuitionistic Fuzzy Logic Tree (IFLT). The SHPS includes both the degree of membership and non-membership for pathways contributing to hazard generation. The SHPS illustrates the acceptance, non-acceptance, and ambiguity associated with potential hazard values from an expert perspective, thus assisting analysts in selecting appropriate hazard values. According to the numerical results of our analysis in the Ahvaz region, the seismic hazard is located in an uncertainty (unacceptability) zone, indicating that experts have low confidence in the results of the probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) for Ahvaz. In addition, the hazard is characterized by an "unconfident zone". This finding indicates that experts are fairly confident in the results of the analysis for Ahvaz. This finding implies that the models and parameters used in the PSHA for this region are not accepted by experts, and further efforts are needed to identify or develop appropriate models and accurate parameters specific to the area. In conclusion, this research demonstrates how intuitionistic fuzzy sets can be used to construct SHPS, providing a novel framework for quantifying uncertainty and expert opinion in hazard assessment.

Introduction

Ahvaz, the capital of Khuzestan Province, is recognized as a major industrial center, particularly in the oil, gas and steel sectors. With a population of over 1.5 million, the city lies on the southern edge of the Zagros Fold Belt and is influenced by the subduction movements of the Arabian Plate, resulting in frequent seismic activity. Seismic hazard assessments in Ahvaz show a high degree of variability, mainly due to uncertainties in data and seismic sources. Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) serves as a critical method for assessing these risks; however, it faces challenges related to cognitive biases and

uncertainties arising from incomplete data and oversimplified models. This paper proposes the integration of Intuitionistic Fuzzy Logic Trees (IFLT) into the PSHA framework to address these uncertainties and improve the clarity of seismic risk assessments. This approach enables analysts to explore different scenarios and provide more accurate answers, ultimately contributing to improved risk management strategies in earthquake-prone regions.

Materials and Methods

The main objective of this research is to construct the possibility space of seismic hazard and analyze it using intuitionistic fuzzy theory.

Cite this article: Motaghed, S., Shamsizadeh, M., Eftekhari, N. (2024). Earthquake possibility space of Ahvaz city based on intuitive fuzzy theory. *Journal of Engineering Geology*, 18 (3), 320-340. <https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.3.1018123>



Considering the geographical location and history of earthquakes in Ahvaz, this study aims to provide an analytical framework for seismic hazard assessment and reduce the existing uncertainties in this field. In this study, intuitionistic fuzzy sets were used to construct the possibility space of seismic hazard. This method allows analysts to incorporate expert opinions and experiences in the form of membership and non-membership degrees into analyses. By weighting the logic tree of hazard analysis, different hazard scenarios were examined in more detail. This approach enables analysts to choose appropriate hazard values with a clearer understanding of different hazard scenarios.

Results and Discussion

The results indicate that the seismic hazard in Ahvaz falls within the "non-acceptance" or "uncertainty" region. This means that experts have little confidence in the results of probabilistic seismic hazard analyses in this area. The analyses also show that in the current situation, the existing uncertainties in seismic hazard assessment can lead to incorrect decision-making. The combination of non-acceptance and low ambiguity in seismic hazard analysis implies that experts are quite confident in rejecting the hazard analysis outcomes for Ahvaz. This study can be used as an innovative framework for quantifying uncertainty and expert opinions in seismic hazard assessment. Using intuitionistic fuzzy theory in this field allows analysts to choose appropriate hazard values with a clearer understanding of different hazard scenarios. This can improve the quality of decision-making in crisis management and urban planning. Given the results, it is suggested that further research be conducted to improve seismic hazard models in Ahvaz. Using historical data and past experiences can also help increase the accuracy of analyses.

Additionally, examining the social and economic impacts of earthquakes on the community and urban infrastructure can be considered as an important area of research.

Conclusions

This study can be used as an innovative framework for quantifying uncertainty and expert opinions in seismic hazard assessment. Using intuitionistic fuzzy theory in this field allows analysts to choose appropriate hazard values with a clearer understanding of different hazard scenarios. This can improve the quality of decision-making in crisis management and urban planning. Based on the results, it is suggested that further research be conducted to improve seismic hazard models in Ahvaz. The use of historical data and past experience can also help to improve the accuracy of the analyses. In addition, investigating the social and economic impacts of earthquakes on the community and urban infrastructure can be considered as an important research area. In general, this research is recognized as an important step in seismic hazard assessment in Ahvaz and the application of intuitionistic fuzzy theory in this field. In view of the results, there is a growing need to address uncertainties and improve existing models in seismic hazard assessment is increasingly felt. This approach can be used as an effective tool in crisis management and urban planning against natural hazards. Seismic hazard analysis not only helps to reduce human and financial losses, but can also strengthen urban infrastructure and increase community resilience against to natural disasters. Therefore, attention to the social and economic dimensions of these analyses is essential. By better understanding the risks and preparing to deal for them, it is possible to improve the quality of life and increase the safety of residents in earthquake-prone cities.



فضای امکان خطر زلزله شهر اهواز بر اساس نظریه فازی شهودی

ساسان معتقد^۱، مرضیه شمسی زاده^۲، سید نصراله افتخاری^۳

۱. استادیار، عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران. رایانامه: motaghed@bkatu.ac.ir

۲. استادیار، ریاضی و آمار، دانشکده انرژی و علوم داده، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران. رایانامه: shamsizadeh.m@bkatu.ac.ir

۳. استادیار، دانشکده صنعت و معدن، دانشگاه یاسوج، چرام، ایران. رایانامه: sn.eftekhari@yu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله، فضای امکان خطر لرزه‌ای شهر اهواز ارائه شده است. برای این منظور، درخت منطقی تحلیل خطر به روش فازی شهودی وزن دهی و فضای خطر بر اساس درجات عضویت و عدم عضویت مبتنی بر نظر خبرگان تعریف شده است. سپس تفکیک خطر با استفاده از مفهوم مجموعه‌های فازی شهودی و با ساخت درخت منطقی فازی شهودی انجام شده است. فضای امکان خطر لرزه‌ای شامل درجه عضویت و درجه عدم عضویت مسیرهای سهیم در تولید خطر است. فضای امکان خطر لرزه‌ای، پذیرش، عدم پذیرش و همچنین ابهام هر مقدار ممکن خطر را از دیدگاه متخصصان بیان می‌کند و به تحلیلگر کمک می‌کند دید واضح‌تری نسبت به انتخاب مقدار خطر مناسب داشته باشد. بر اساس نتایج مثال عددی ارائه شده در منطقه اهواز، خطر زلزله شهر اهواز در منطقه عدم اطمینان (عدم پذیرش) واقع شده است. بنابراین، تحلیل احتمالی خطر در این حالت با پذیرش اندک خبرگان مواجه است. این یافته به این معناست که از دیدگاه خبرگان این نتایج چندان قابل قبول نیست، همچنین خطر در منطقه ابهام کم واقع شده است. قابل قبول نبودن در کنار عدم ابهام به معنای آن است که خبرگان در قبول نداشتن این نتایج تقریباً اطمینان دارند. نتیجه کاربردی این یافته این است که مدل‌ها و پارامترهای مورد استفاده در تحلیل خطر منطقه اهواز مورد تایید خبرگان نیست و لازم است تلاش بیشتری برای ارائه یا یافتن مدل‌های مناسب و پارامترهای دقیق منطقه صورت گیرد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

کلیدواژه‌ها:

تحلیل خطر احتمالی زلزله، درخت منطقی، عدم اطمینان، امکان رخداد.

احتمالی خطر زلزله (Probabilistic seismic hazard analysis)

مقدمه

اهواز مرکز استان خوزستان و صنایع نفت و گاز، فولادسازی و نورد است. این شهر موقعیت جغرافیایی و سیاسی ممتازی در منطقه جنوب غرب کشور دارد و جمعیتی بالغ بر ۱/۲ میلیون نفر را در خود اسکان داده است. شهر اهواز در حاشیه جنوبی کمربند چین خوردگی زاگرس و منطقه فروافتادگی دزفول واقع شده است. حرکت صفحه فرو رو عربستان باعث رخداد زلزله متعدد در این ناحیه شده است. تحلیل‌های خطر زلزله انجام شده در شهر اهواز تشتت بالایی دارد که مرتبط با عدم قطعیت‌های داده‌ها، منابع لرزه‌زا و مدل‌های مورد استفاده است (Motaghed et al., 2024). نتایج تحلیل خطر امروزه اغلب مبتنی بر تحلیل احتمالی خطر زلزله (Probabilistic seismic hazard analysis) PSHA است. روشی نویدبخش در ارزیابی خطرات مرتبط با زلزله است، اما ذاتاً مملو از عدم قطعیت‌ها، به‌ویژه عدم قطعیت‌های شناختی است که از دانش و درک محدود پدیده‌های مرتبط با رخداد زلزله ناشی می‌شود (Motaghed et al., 2023). عدم قطعیت‌های شناختی در PSHA از محدودیت دانش در مورد خطرات لرزه‌ای از داده‌های ناقص، مدل‌های ساده‌سازی شده و تفسیرهای ذهنی ناشی می‌شود (Musson, 2012; Delavaud et al., 2021). این عدم قطعیت‌ها می‌توانند به طور قابل توجهی بر دقت و قابلیت

اهواز مرکز استان خوزستان و صنایع نفت و گاز، فولادسازی و نورد است. این شهر موقعیت جغرافیایی و سیاسی ممتازی در منطقه جنوب غرب کشور دارد و جمعیتی بالغ بر ۱/۲ میلیون نفر را در خود اسکان داده است. شهر اهواز در حاشیه جنوبی کمربند چین خوردگی زاگرس و منطقه فروافتادگی دزفول واقع شده است. حرکت صفحه فرو رو عربستان باعث رخداد زلزله متعدد در این ناحیه شده است. تحلیل‌های خطر زلزله انجام شده در شهر اهواز تشتت بالایی دارد که مرتبط با عدم قطعیت‌های داده‌ها، منابع لرزه‌زا و مدل‌های مورد استفاده است (Motaghed et al., 2024). نتایج تحلیل خطر امروزه اغلب مبتنی بر تحلیل



تصمیم‌گیری استفاده می‌کنند (Tahernia, 2014). برخلاف درخت‌های تصمیم سنتی که بر مجموعه‌های معمولی تکیه دارند، IFLTها با ترکیب درجات عضویت و عدم عضویت برای هر عضو در مجموعه، نمایش دقیق‌تری از عدم قطعیت ارائه می‌دهند. فضای امکان خطر، امکان ایجاد تصویر دقیق‌تری از عضویت و عدم‌عضویت در داده‌ها را فراهم می‌آورد و درک فرآیندهای تصمیم‌گیری را با ارائه چارچوبی شفاف و جامع برای رسیدگی به عدم قطعیت‌های شناختی افزایش می‌دهد. خروجی درختان منطقی فازی شهودی، مجموعه همه پاسخ‌های ممکن خطر با میزان امکان و عدم امکان آن‌هاست. به این ترتیب امکان ایجاد شفافیت بیشتر در فرایند تحلیل احتمالی خطر زلزله فراهم می‌شود (Biswas et al., 2017).

در ادامه این مقاله در بخش 2 تعاریف مورد نیاز از نظریه مجموعه‌های فازی شهودی ارائه شده و در بخش 3 روش تشکیل درخت منطقی فازی شهودی و محاسبه فضای امکان خطر بیان شده است. در بخش 4 با انجام محاسبات تفصیلی، فضای امکان خطر برای منطقه اهواز ارائه و مورد بحث قرار گرفته شده است.

مجموعه‌های فازی شهودی

هر چند نظریه مجموعه‌های فازی در مدل‌سازی عدم اطمینان‌های ناشی از ابهام یا تعلقات جزئی به یک مجموعه بطور موفق عمل کرده است، ولی نمی‌تواند همه حالات عدم اطمینان که غالباً در مسائل زندگی واقعی و مختلف وجود دارد مخصوصاً مسائلی که با اطلاعات ناکافی سروکار دارند را مدل‌سازی کند (Atanassov, 1986). آتاناسوف تصمیمی از مجموعه‌های فازی را به نام مجموعه‌های فازی شهودی معرفی نمود که می‌تواند بعد دیگری از تابع عضویت را نمایندگی کند.

اطمینان ارزیابی‌های خطر لرزه‌ای تأثیر بگذارند و به طور بالقوه منجر به تخمین دست پایین یا برآورد بیش از حد خطر لرزه‌ای شوند.

نقش درخت‌های منطقی در مدیریت عدم قطعیت‌های شناختی در PSHA در توانایی آن‌ها در ادغام منابع متنوع اطلاعات و اعمال نظر خبرگان نهفته است (Giner et al., 2002). درخت‌های منطقی رویکرد ساختاریافته‌ای را برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها با ایجاد شاخه‌های متعدد ارائه می‌دهند. این شاخه‌ها، فرضیه‌ها، مدل‌ها یا پارامترهای مختلف را نمایندگی می‌کنند. این ساختار سلسله‌مراتبی، تحلیلگر را قادر می‌سازد تا سناریوها و مفروضات مختلفی را در تحلیل، با دیدگاه‌ها و تفاسیر مختلف از عوامل خطر لرزه بررسی کند (Weatherill and Cotton, 2020). رویای تحلیلگران خطر، کاهش عدم قطعیت PSHA است. لازمه تحقق این رویا ایجاد امکان احتساب عدم قطعیت‌ها در فرایند تحلیل است.

برای استخراج پاسخ و رسیدن به نتیجه واحد قابل استفاده در طراحی سازه در درخت منطقی پاسخ‌های همه شاخه‌ها با احتمالات رخداد (به عنوان وزن هر شاخه) با هم ترکیب شده و یک جواب برای خطر ارائه می‌دهند. این فرایند با پرسش‌های متعدد پژوهشگران مواجه شده است (Ali et al., 2024).

در این مقاله، برای پاسخ به این بخش از پرسش‌ها، فضای امکان خطر زلزله شهر اهواز بر اساس نظریه فازی شهودی ارائه شده است. با ادغام درختان منطقی فازی شهودی (Intuitionistic fuzzy logic tree, IFLT) در PSHA برای رسیدگی به عدم قطعیت شناختی، به درجات عضویت و عدم عضویت و افزایش شفافیت ارزیابی خطر لرزه‌ای پرداخته شده است. درختان منطقی فازی شهودی از مجموعه‌های فازی شهودی برای مدیریت عدم قطعیت شناختی، از درجات عضویت و عدم عضویت در فرآیندهای

است. به این منظور ابتدا لازم است فضای امکان خطر تعریف شود. فضای امکان خطر، فضایی است که بردارهای پایه آن درجه عضویت و درجه عدم عضویت (تشکیل دهنده محورهای افقی که صفحه امکان را شکل می‌دهند) به عنوان متغیرهای مستقل و خطر زلزله (محور قائم) به عنوان متغیر وابسته است. در انتها، با استفاده از درخت منطقی فازی شهودی برای تصمیم‌گیری راحت‌تر در حوزه‌ی مهندسی، نتیجه به صورت کلاسیک ارائه داده شده است. مراحل تولید فضای امکان خطر به شرح زیر است:

۱- آماده‌سازی مدل‌ها (مدل منابع، مدل بازگشت، مدل کاهندگی و مدل رخداد) و پارامترهای مورد نیاز تحلیل احتمالی خطر زلزله (PSHA)

۲- تشکیل درخت منطقی فازی شهودی

۲-۱- تشکیل درخت منطقی تحلیل خطر

۲-۲- تعیین درجه عضویت و عدم عضویت هر انتخاب (گزینه)

۳- انجام تحلیل احتمالی خطر زلزله و تعیین خطر هر شاخه درخت منطقی فازی شهودی

۴- تعیین درجه عضویت و عدم عضویت هر شاخه درخت منطقی فازی شهودی بر مبنای نرم‌های مورد نظر

۵- ترسیم فضای امکان خطر با توجه به نتایج مرحله ۳ (متغیر وابسته) و مرحله ۴ (متغیرهای مستقل)

به این ترتیب فضای امکان خطر در حقیقت تفکیک غیر افزایشی خطر (Non extensive seismic hazard) (deaggregation) است. آنچه نیاز به توضیح بیشتر دارد، درخت منطقی فازی شهودی است. استفاده از درخت منطقی فازی شهودی (IFLTs) در تحلیل احتمالی خطر زلزله (PSHA) رویکرد جدیدی را ارائه می‌دهد که شفافیت ارزیابی خطر لرزه‌ای را با ترکیب اصول منطق فازی شهودی افزایش می‌دهد.

تعریف. یک زیر مجموعه فازی شهودی از X یا یک مجموعه فازی شهودی در X ، مجموعه‌ای مانند A است که به هر عضو $x \in X$ دو درجه یکی "درجه عضویت" و دیگری "درجه عدم عضویت" نسبت می‌دهد. یعنی مجموعه A را با تابع $f_A: X \rightarrow [0, 1] \times [0, 1]$ بطوری که $0 \leq \mu_A(x) + \vartheta_A(x) \leq f_A(x) = (\mu_A(x), \vartheta_A(x))$ برای هر عضو $x \in X$ نظیر می‌کند.

در این بخش توابعی معرفی می‌شوند که می‌توان برحسب لزوم از آن‌ها برای توابع عضویت استفاده نمود (Schweizer and Sklar 1958, 1960, 1961).

تعریف. تابع $T: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ نرم مثلثی یا t -نرم نامیده می‌شود هرگاه در شرایط زیر برای هر $x, y, z \in [0, 1]$ صدق کند:

$$T(1, x) = x \quad 1.$$

$$T(x, y) = T(y, x) \quad 2.$$

$$T(x, T(y, z)) = T(T(x, y), z) \quad 3.$$

اگر $w \leq x$ و $y \leq z$ ، آنگاه

$$T(w, y) \leq T(x, z) \quad 4.$$

برای مدل‌سازی توابع عضویت اجتماع نیز می‌توان از توابعی که t -هم نرم مثلثی (S -نرم) نامیده می‌شوند استفاده کرد که تعریف آن به صورت زیر است:

تعریف. تابع $S: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ یک t -هم نرم مثلثی نامیده می‌شود هرگاه برای هر $x, y, z \in [0, 1]$ در شرایط زیر صدق کند:

$$S(0, x) = x \quad 1.$$

$$S(x, y) = S(y, x) \quad 2.$$

$$S(x, S(y, z)) = S(S(x, y), z) \quad 3.$$

اگر $w \leq x$ و $y \leq z$ ، آنگاه

$$S(w, y) \leq S(x, z)$$

مواد و روش‌ها

چنانچه در بخش‌های قبل شرح داده شد، در این مقاله هدف شفاف‌سازی فرایند تصمیم‌گیری در حوزه خطر زلزله

عدد 1 منطقه‌ی ابهام خطر را نشان می‌دهد. درجه عضویت $(\mu(v))$ میزان اطمینان تحلیل از وقوع آن شاخه از درخت، درجه عدم عضویت $(\vartheta(v))$ میزان اطمینان از عدم وقوع آن شاخه از درخت و منطقه ابهام عدم اطلاع از وضعیت را نمایندگی می‌کند. برای آشنایی بهتر سه حالت مختلف ضرایب در نظر گرفته شده است:

حالت A: $\mu(v) = 1$ ، که به فرمت $(1, 0)$ یا $(A, 1, 0)$ نمایش داده می‌شود.

حالت B: $\mu(v) = 0/7$ و $\vartheta(v) = 0$ ، که به فرمت $(0/7, 0)$ یا $(B, 0/7, 0)$ نمایش داده می‌شود.

حالت C: $\mu(v) = 0/7$ و $\vartheta(v) = 0/2$ ، که به فرمت $(0.7, 0.2)$ یا $(C, 0/7, 0/2)$ نمایش داده می‌شود.

حالت A، به معنای اطمینان کامل و بدون ابهام از وقوع رخداد مورد نظر است. حالت B به معنای وجود 70% اطمینان از گزینه مورد نظر و 30% ابهام در رخداد است. حالت C به معنای وجود 70% اطمینان از گزینه مورد نظر، 20% رد گزینه و 10% ابهام در رخداد است. به منظور توضیح بیشتر فرض کنید که این وزن‌ها بر اساس نظر 10 نفر کارشناس خبره در زمینه خطر انتخاب شده‌اند. فرض کنید این 10 نفر برای هر رخداد دو مقدار ارائه دهند که یکی از آن‌ها، درجه‌ی اطمینان از وقوع رخداد و عدد دوم درجه‌ی عدم اطمینان از وقوع رخداد را نشان می‌دهد. با استفاده از تابع میانگین یک مقدار دوتایی واحد، برای هر رخداد به دست می‌آید، به عبارت دیگر با استفاده از تابع میانگین و نظرات 10 کارشناس، برای هر رخداد یک درجه‌ی اطمینان و یک درجه‌ی عدم اطمینان به دست آورده می‌شود.

به این ترتیب، درخت منطقی فازی شهودی (IFLTs)، فضای گسسته‌ای از پاسخ‌های ممکن خواهد داشت که تعداد اعضای آن برابر با تعداد مسیرهای درخت منطقی است. در مرحله نهایی بر اساس این اطلاعات، تصمیم‌گیری

برای ساختن درخت منطقی فازی شهودی، با مبنای انتخاب خبرگانی یا مبتنی بر فیزیک (Motaghd et al., 2023)، مفهوم فازی شهودی در انتخاب مدل و تخصیص وزن گنجانده می‌شود. در این روش بر خلاف روش معمول PSHA که هر شاخه درخت منطقی با یک وزن مشخص است، به هر شاخه از درخت منطقی بر اساس تئوری فازی شهودی دو وزن تخصیص داده می‌شود. وزن شاخه‌ها درجه عضویت (میزان امکان وقوع، پذیرش، اطمینان یا قطعیت) هر گزینه و همچنین درجه عدم عضویت (میزان امکان عدم وقوع، عدم پذیرش، عدم اطمینان یا رد) را تعیین می‌کند. اگر انتخاب مبتنی بر نظر خبرگان باشد، هر کارشناس نظر خود را در رابطه با رخداد مورد نظر به صورت یک دوتایی بیان می‌کند که عدد اول درجه‌ی اطمینان از وقوع رخداد و عدد دوم درجه‌ی اطمینان از عدم وقوع رخداد را بیان می‌کند. در صورتی که انتخاب بر اساس فیزیک رخداد مبتنی بر معیارهای ریاضی (رتبه‌بندی) باشد، مشابه آنچه برای خبرگان انجام شد تنظیم می‌شود. همچنین، موقعیت گزینه در رتبه‌بندی هر روش به عنوان یک وزن برای هر درجه‌ی عضویت و عدم عضویت در نظر گرفته می‌شود.

هر شاخه v از درخت با یک زوج مرتب $(\mu(v), \vartheta(v))$ نشان داده می‌شود که v گزینه (مدل یا پارامتر) مورد نظر، $\mu(v)$ درجه‌ی عضویت مدل v و $\vartheta(v)$ درجه‌ی عدم عضویت مدل v است. هر مسیر در درخت یک پاسخ احتمالی دو مقداری (خطر) را ارائه می‌دهد. درجه پذیرش این پاسخ توسط t -نرم و درجه عدم پذیرش این پاسخ توسط یک t -هم نرم تعیین می‌شود. به این ترتیب، نتیجه هر مسیر درخت، پاسخی با درجه‌ای از پذیرش (قطعیت) و درجه‌ای از عدم پذیرش خواهد داشت.

توجه داشته باشید که مجموع وزن در هر گزینه، عددی بزرگ‌تر یا مساوی صفر و کوچک‌تر یا مساوی 1 است. میزان اختلاف مجموع درجات عضویت و عدم عضویت با

منطقه عدم اطلاع: منطقه‌ای مربع شکل از صفحه امکان که در آن درجه عضویت و درجه عدم عضویت کمتر از 0/5 باشد.

خط عدم ابهام: خط متصل‌کننده نقطه 1 از محور عضویت به نقطه 1 از محور عدم عضویت است. روی این خط مجموع درجات عضویت و عدم عضویت برابر 1 است و ابهام برابر صفر است.

منطقه ابهام زیاد: منطقه‌ای مثلث شکل از صفحه امکان که در آن مجموع درجات عضویت و عدم عضویت کمتر از 0/5 است.

منطقه ابهام کم: منطقه‌ای دوزنقه شکل از صفحه امکان که در آن مجموع درجات عضویت و عدم عضویت بیشتر از 0/5 است.

نقطه ابهام کامل: مبدأ مختصات یا محل تقاطع محورهای درجه عضویت و درجه عدم عضویت است. در این نقطه مجموع درجات عضویت و عدم عضویت برابر صفر است و ابهام کامل در مورد رابطه وجود دارد.

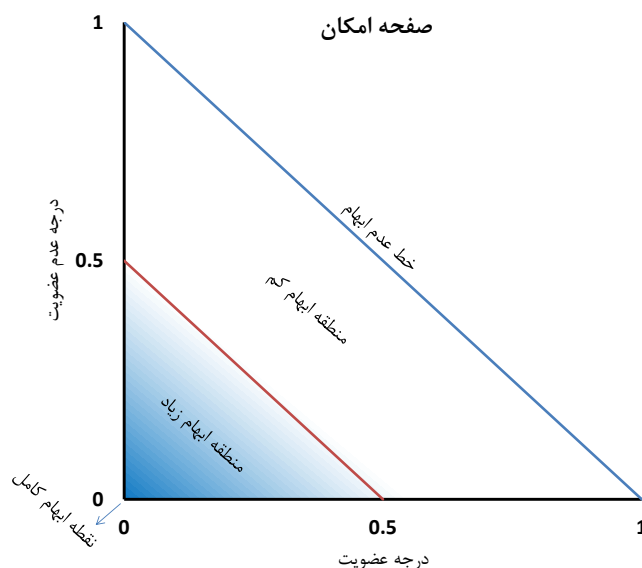
به صورت ترکیبی یا غیر ترکیبی ممکن است. در روش ترکیبی جواب واحد ارائه می‌شود، که برای به دست آوردن جواب می‌توان از اصل مین-ماکس یا سایر روش‌ها استفاده کرد. این روش کمکی به شفافیت تحلیل خطر نمی‌کند. در روش غیر ترکیبی از مقادیر عضویت و عدم عضویت شاخه‌ها برای به دست آوردن مجموعه پاسخ استفاده می‌شود. به این ترتیب فضای امکان خطر لرزه‌ای تولید می‌شود. به منظور تفسیر نتایج از تعاریف زیر آن‌گونه که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است بهره برده می‌شود:

فضای امکان: در ابتدای همین بخش تعریف شد.

صفحه امکان: صفحه‌ای که شامل دو محور متقاطع درجه عضویت و درجه عدم عضویت است. توجه کنید که این دو محور فقط در بعد مثبت دارای معناست.

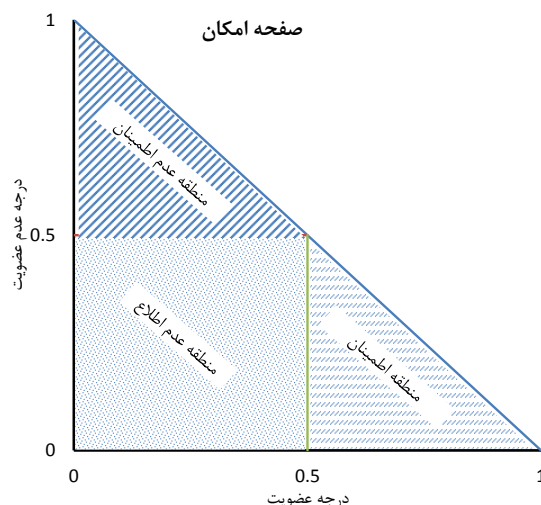
منطقه اطمینان (پذیرش): منطقه‌ای مثلث شکل از صفحه امکان که در آن درجه عضویت بیشتر از 0/5 و درجه عدم عضویت کمتر از 0/5 است.

منطقه عدم اطمینان (عدم پذیرش): منطقه‌ای مثلث شکل از صفحه امکان که در آن درجه عضویت کمتر از 0/5 و درجه عدم عضویت بیشتر از 0/5 است.



شکل ۱. صفحه امکان خطر، تعاریف ابهام

Fig. 1. hazard possibility plane description



شکل ۲. صفحه امکان خطر، تعاریف پذیرش

Fig. 2. hazard possibility plane description

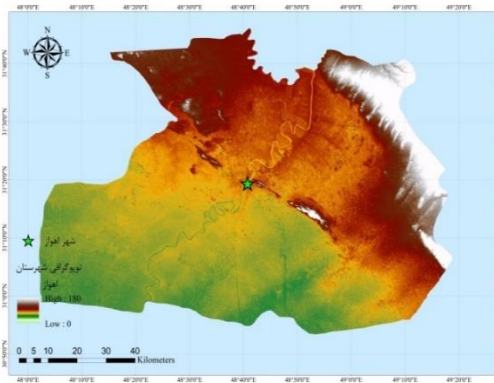
استان خوزستان در ناحیه رسوبی دامنه‌های غربی رشته کوه‌های زاگرس قرار گرفته است و به دو منطقه کوهستانی و جلگه‌ای قابل تقسیم است. با حرکت از رشته کوه‌ها و قله‌های بلند زاگرس به سمت غرب و جنوب، در فواصل میان کوه‌ها، ناودیس‌هایی قابل شناسایی است که در دوره کواترنری در نتیجه تجمع آبرفت به صورت دشت دیده می‌شوند. بخش مرکزی و جنوب استان را جلگه‌ای خوزستان تشکیل می‌دهد که با شیبی ملایم به خلیج فارس می‌رسد. این جلگه عمدتاً نتیجه رسوب‌گذاری رودخانه‌های کرخه، کارون، جراحی، زهره و دز در دوره‌ی کواترنری است. تکوین شهر اهواز در حاشیه جنوبی زاگرس مربوط به زمان سنوزویک و کواترنری است (Motiei, 1995). جوان‌ترین چین‌خوردگی این ناحیه در پلیوسن-پلیستوسن رخ داده و باعث ایجاد توپوگرافی فعلی منطقه شده است. این حرکات تاقدیس‌ها و ناودیس‌های موازی با یکدیگر از جمله تاقدیس اهواز را به وجود آورده است. حرکت صفحه عربستان به سمت شمال و شمال شرق و چین‌خوردگی زاگرس همچنان ادامه دارد. میزان حرکت افقی این صفحه حدود

با داشتن اطلاعات از موقعیت خطر در صفحه امکان و مقدار خطر، طراحان سازه یا تصمیم‌گیرندگان قادر خواهند بود تا بر اساس تمام اطلاعات موجود با توجه به عملکرد هدف مورد نظر خود تصمیمات آگاهانه‌تر بگیرند.

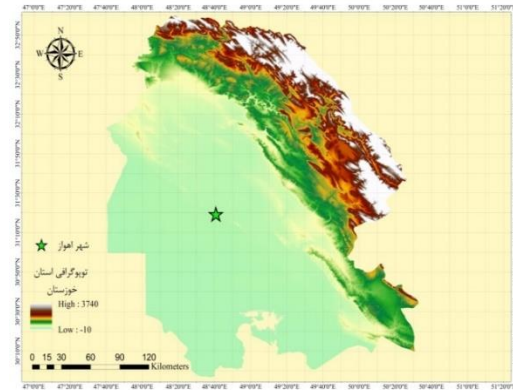
تحلیل و نتایج

بر مبنای آنچه در بخش قبل گفته شد، برای تولید فضای امکان خطر نیاز به انجام تحلیل خطر زلزله به تعداد شاخه‌های درخت منطقی و تعیین خطر زلزله در هر شاخه است. هر شاخه‌ی درخت از فرضیات، مدل‌ها و پارامترهایی که درجات عضویت و عدم عضویت آن‌ها قبلاً تعیین شده است تشکیل می‌شود. به این ترتیب لازم است ابتدا منابع لرزه‌زا تعیین و مدل‌سازی شود. سپس، کاتالوگ یکسان‌سازی شده‌ی منطقه، تهیه و پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه (ضرایب رابطه گوتنبرگ ریشتر، حداکثر بزرگا و حداقل بزرگا) محاسبه شوند. مرحله بعد، زمان انتخاب رابطه(های) کاهندگی و مدل(های) رخداد زلزله و انجام تحلیل احتمالی خطر زلزله است. فرضیات متفاوت و عدم اطمینان مدل‌ها و پارامترها در شاخه‌های مختلف درخت تصمیم منعکس می‌شود.

راندگی اصلی زاگرس است (Esmaeili et al., 2015)؛ روند شمال شمال غرب- جنوب جنوب شرق با مکانیزیم راستا لغز و معکوس است و با سامانه گسلش قطر-کازرون همخوانی دارد (Ebrahimi Samani et al., 2017).



3/5 تا 4/8 سانتیمتر و حرکت قائم حدود دو میلی‌متر در سال برآورد می‌شود (Aghanabati, 2004). به لحاظ ساختاری دو روند اصلی در دشت خوزستان و شهر اهواز قابل شناسایی است: شمال شرق- جنوب غرب، که گسل اهواز در این گروه قرار گرفته و در موازات راستای



شکل ۳. نقشه‌های توپوگرافی استان خوزستان و شهر اهواز

Fig. 3. Topography of Khuzestan province and Ahwaz city

بر اساس این شواهد، شهر اهواز در آستانه منطقه لرزه‌خیز زاگرس قرار گرفته (بین منطقه با لرزه خیزی بالا و منطقه با لرزه خیزی پایین بر اساس شکل ۳) و به همین علت ابهامات زیادی در خصوص لرزه‌خیزی گذشته آن وجود دارد. این ابهامات تعیین خطر زلزله در این شهر را با مشکل جدی روبرو کرده است. بر اساس اسناد تاریخی، در سال 840 میلادی زمین‌لرزه‌ای ویرانگر در دامنه زاگرس روی داده است. در این زلزله در اهواز خانه‌های بسیار و نیز مسجد جامع ویران شده و باعث شده مردم شهر را ترک کنند. همچنین، تپه مشرف به شهر اهواز شکاف برداشته است. این زلزله پس لرزه‌های زیادی داشته است. منشأ احتمالی این زلزله گسل اهواز بوده است. بزرگای این زمین لرزه 6/4 در مقیاس بزرگای گشتاوری و 6/5 در مقیاس بزرگای موج سطحی برآورد شده است (Mousavi-Bafrouei et al., 2014; Ambraseys and Arian et al., 1982). آراین و همکاران (Melville, 1982).

2015) اهواز را در زمره شهرهای دارای بیشترین خطر زلزله ایالت لرزه‌خیز زاگرس بیان کرده است. وتر و همکاران (Vetr et al., 2016) بیشینه شتاب روی سنگ بستر را برای اهواز بین 0.3g تا 0.37g پیشنهاد داده است. بر اساس مطالعات چرچی و همکاران (Charchi et al., 2009) حداکثر شتاب اهواز 0.34g گزارش شده است. این شتاب‌ها معادل خطر بسیار زیاد استاندارد 2800 است. وضعیت گسل اهواز نیز در بررسی خطر اهواز قابل توجه است. گسل معکوس اهواز با طول بالای 100 کیلومتر، با روند شمال غربی- جنوب شرقی از مرکز شهر اهواز عبور می‌کند. نقش این گسل در وضعیت رودخانه کارون، امکان فعالیت آن را نشان می‌دهد. این گسل کوتاه‌تری و فعال است (Hessami et al., 2003) و از لحاظ شرایط زمین‌شناسی شهر را به دو بخش شمال - شمال شرقی (فردادیواره) و جنوب- جنوب غربی (فروادیواره) تقسیم کرده

شکل ۳. نقشه‌های توپوگرافی استان خوزستان و شهر اهواز

که نشان دهنده خطر زلزله متوسط منطقه است (Zafarani et al., 2015).

ولز و کاپراسمیت (Wells and Coppersmith, 1994) روابط مختلفی برای تخمین حداکثر بزرگای بر اساس پارامترهای مختلف گسل ارائه داده‌اند. بر اساس رابطه بزرگای- طول گسیختگی ولز و کاپراسمیت و با فرض گسیختگی 100 درصد، گسل اهواز با طول 100 کیلومتر توان تولید زلزله‌ای با بزرگای حداکثر $M_w = 7.54$ و بر اساس رابطه بزرگای- سطح گسیختگی توان بزرگایی برابر $M_w = 6.15$ دارد (Wells and Coppersmith, 1994). آزادمهر (Azadmehr, 2009) $M_w = 7.1$ ، وتر و همکاران (Vetr et al., 2016) $M_w = 7$ و چرچی و همکاران (Charchi et al., 2009) $M_w = 6.16-6.69$ (ML=6/9) را برای حداکثر بزرگای پیشنهاد داده‌اند (Azadmehr, 2009; Vetr et al., 2016; Charchi et al., 2009). لازم به ذکر است که بزرگای ارائه شده توسط چرچی و همکاران (Charchi et al., 2009) بر حسب بزرگای ریشتر بوده است که با استفاده از رابطه موسوی-بهرروی و همکاران (Mousavi-Bafrouei et al., 2014) به بزرگای گشتاوری تبدیل شده است. برآورد چرچی و همکاران (Charchi et al., 2009) با برآورد مبتنی بر رابطه بزرگای- سطح گسیختگی ولز و کاپراسمیت همخوانی دارد.

۳- روابط کاهندگی: بر اساس مطالعات افتخاری و همکاران (Eftekhari et al., 2022)، حدود 67 رابطه کاهندگی مختلف برای منطقه اهواز قابل استفاده است. استفاده از روابط متفاوت یا مجموعه‌های متفاوت از این روابط، منجر به ارائه خطرات متفاوت می‌شود که ممکن است تا حدود ۶۰ درصد اختلاف داشته باشند (Motaghd et al., 2018). بر این اساس و با توجه به نقش مهم روابط کاهندگی در تحلیل خطر، 10 مجموعه رابطه کاهندگی مورد استفاده قرار گرفته است. مجموعه 1 شامل روابط

است (Esmaeili et al., 2015). گمان بر این است که این گسل عامل زمین لرزه تاریخی اهواز بوده است.

بر اساس کاتالوگ‌های زلزله موجود (Mousavi-Bafrouei and Mahani, 2020)، زلزله‌های گذشته اهواز نشان‌دهنده‌ی لرزه‌خیزی متوسط منطقه است. بر اساس استاندارد 2800، شهر اهواز خطر لرزه‌ای متوسط با شتاب مبنای 0/25g دارد. سوال مهمی که لازم است در اینجا پاسخ داده شود این است که علت این اختلاف در مورد خطر زلزله شهر اهواز چیست؟ علت این پراکندگی نتایج را می‌توان پراکندگی ورودی‌ها شامل پارامترها و مدل‌ها دانست. مهم‌ترین این اختلافات به شرح زیر است:

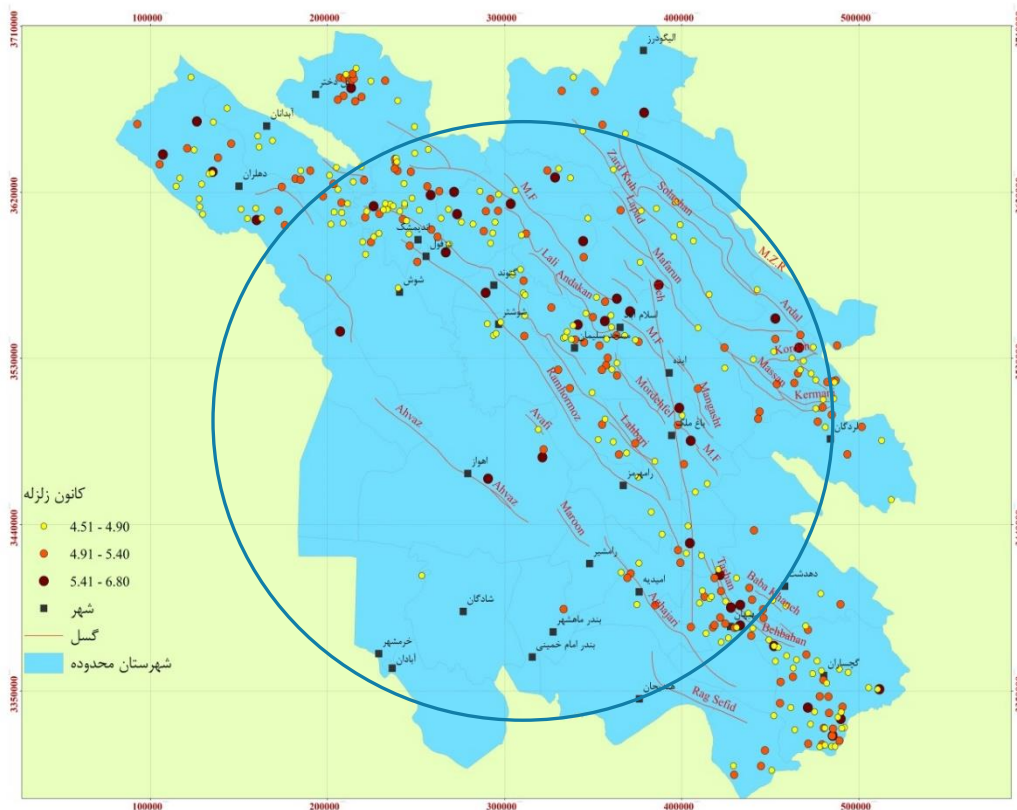
۱- مشخصات گسل اهواز: در مورد طول و عمق گسل اهواز اختلاف نظر زیادی وجود دارد. بر اساس مطیعی، گسل اهواز، گسلی کم عمق است که تا سازند گچساران ادامه دارد (Motiei, 1995). منطقه فشاری تاقدیس اهواز از سازند گچساران آغاز و گسل اهواز از این سازند تا سطح ادامه پیدا می‌کند. داده‌های چاه پیمایی، این عمق را حدود 1600 متر تخمین می‌زند (Farhadian Babadi et al., 2012). مک کواری گسل اهواز را گسلی عمیق می‌داند (Mc Quarrie et al., 2004).

۲- ضرایب لرزه‌خیزی و حداکثر بزرگای: نوروزی (Nowroozi, 1976)، ایران را به 23 ایالت لرزه‌خیزی تقسیم کرده است. زعفرانی و همکاران (Zafarani et al., 2015) این ایالت بندی را اصلاح و ایران را به 15 ایالت تقسیم کرد. در این ایالت‌بندی ضریب لرزه‌خیزی ایالت 3 (شامل منطقه اهواز)، برابر $8/67$ ، مقدار b برابر $1/26$ و حداکثر بزرگای برابر با $6/3$ داده شده است. مقدار b بالا، نشان از کم بودن زلزله‌های با بزرگای زیاد در منطقه دارد

می‌شود سه حالت (۱) کل منابع لرزه‌زای شناسایی شده بعلاوه لرزه‌خیزی پس‌زمینه، (۲) منابع لرزه‌زای شناسایی شده و (۳) منابع لرزه‌زا منهای گسل اهواز در مدل مورد توجه قرار گرفته است. شکل ۴ گسل‌ها و رومراکز زلزله‌های ابزاری پیرامون شهر اهواز به شعاع 200 کیلومتر را نشان می‌دهد. این گسل‌ها حسب مورد به همراه منبع پس زمینه ناحیه‌ای در نرم افزار اپن کوئیک مدل شده است. در نظر نگرفتن منبع ناحیه‌ای برای نشان دادن لزوم یا عدم لزوم مدل‌سازی آن با توجه به آنچه در اغلب تحلیل‌ها در نظر گرفته نشده است صورت گرفته است. لحاظ نکردن گسل اهواز به این علت است که برخی متخصصان آنرا گسل با امکان کم فعالیت یا خطر کم در صورت فعالیت می‌دانند.

کاهندگی آکار و همکاران (Akkar et al., 2014)، قاسمی و همکاران (Gasemi et al., 2009)، حمزه لو و معهود (Hamzehloo and mahood., 2012)، صداقتی و پزشکی (Sedaghati and Pezeshk, 2017) و زعفرانی و همکاران (Zafarani et al., 2012) هر کدام با وزن ۰/۲ است (Motaghd et al., 2022). سایر روابط استفاده شده شامل (Campbell, 1997; Boore et al., 2014; Sharma et al., 2009; Saffari et Khademi, 2002; Ambraseys et ; Bommer et al., 2003 ; al., 2012 Zare et al., 1999; Ghodrati Amiri et al., al., 2005) است (جدول ۱).

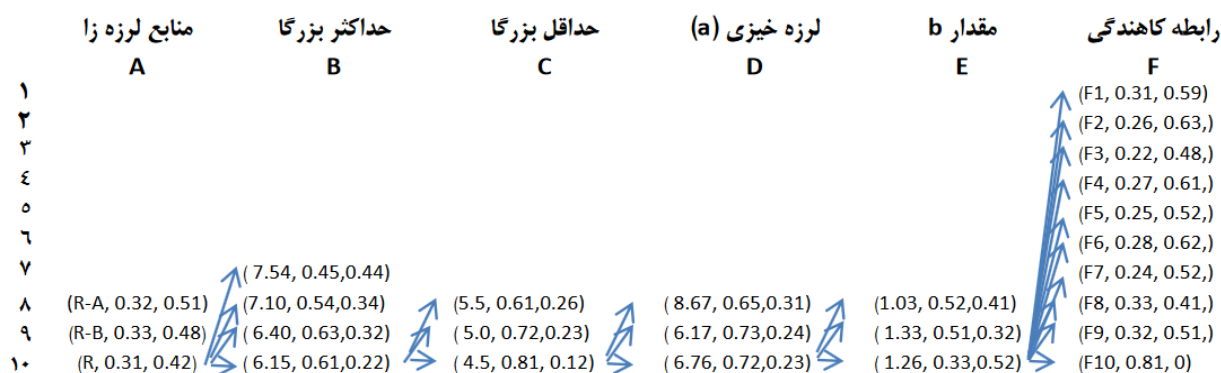
با توجه به این نکات در این مقاله فضای امکان خطر زلزله شهر اهواز ارائه می‌شود. ارائه این اطلاعات می‌تواند به شفافیت تصمیم در حوزه خطر و ریسک زلزله کمک کند. بر اساس آنچه در ادبیات تحلیل خطر شهر اهواز مشاهده



شکل ۴. گسل‌ها و رو مرکز زلزله‌ها پیرامون شهر اهواز

Fig. 4. Faults and epicenters of earthquakes around Ahvaz city

منظور، ۱۰ شاخه از درخت منطقی برای لحاظ روابط کاهندگی که قبلاً در منطقه استفاده شده‌اند یا پتانسیل استفاده دارند، در نظر گرفته شده است. مجموعه روابط کاهندگی در جدول ۱ نشان داده شده است. پس از تعیین این شاخه‌ها از ۹ نفر از متخصصان خواسته شده است که درجه عضویت و درجه عدم عضویت مدل‌ها و مقادیر پیشنهادی در شاخه‌های درخت منطقی را تعیین کنند. پس از اخذ نظرات، درجه عضویت و عدم عضویت هر شاخه با استفاده از تابع میانگین و نظرات متخصصین تعیین شده است. این مقادیر در درخت منطقی فازی شهودی شکل ۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ۵. بخشی از درخت منطقی فازی شهودی برای تعیین خطر زلزله شهر اهواز

Fig. 5. A part of Intuitionistic fuzzy logic tree to determine the earthquake hazard of Ahvaz city

کار رفته در شمای درخت منطقی شکل ۵ در جدول ۱ نشان داده شده است.

پارامترهای رابطه بازگشت زلزله بر اساس مطالعات زعفرانی و همکاران (Zafarani et al., 2015) و معتقد و همکاران (Motaghd et al., 2024) ارائه شده توسط زعفرانی و همکاران (Zafarani et al., 2015) در بخش ۲ گفته شد. معتقد و همکاران به روش کیچکو ($a=6/76, b=1/33$) و آماری مصنوعی ($a=6/17, b=1/03$) مقادیر ضریب لرزه خیزی اهواز را ارائه داده‌اند. بر اساس آنچه در بخش ۱ گفته شد، حداکثر بزرگا برابر با $6/15, 6/40, 7/10, 7/54$ و بر اساس توصیه معتقد و فخریات (Motaghd and Fakhriyat, 2022) حداقل بزرگا برابر با $5/5$ و $5/4$ انتخاب شده است. بر اساس نظر غالب خبرگان، توجه ویژه به استفاده از رابطه کاهندگی مناسب برای منطقه اهواز لازم است. به این

توجه داشته باشید که در شکل ۵ تنها تعدادی از شاخه‌های درخت منطقی نشان داده شده است و برای ایجاد امکان نمایش، سایر شاخه‌ها حذف شده است. علائم اختصاری به

جدول ۱. علائم بکار رفته در درخت منطقی شکل ۵

Table 1. Symbols used in the logic tree of Figure 5

نماد	توصیف	نماد	توصیف
R	کل منابع	F3	Campbell, 1997
R-B	گسل‌ها (بدون پس زمینه)	F4	Khademi., 2002
R-A	کل منابع (بدون گسل اهواز)	F5	Sharma et al., 2009
F1	روابط کاهندگی; Akkar et al., 2014; Gasemi et al., 2009; Hamzehloo and mahood., 2012; Sedaghati and Pezeshk, 2017; Zafarani et al., 2012 (وزن همگی ۰/۲)	F6	Saffari et al., 2012
		F7	Bommer et al., 2003
		F8	Ambraseys et al., 2005
		F9	Zare et al., 1999
F2	Boore et al., 2014	F10	Ghodrati Amiri et al., 2007

تایی است که نشان‌دهنده‌ی درجه اطمینان و درجه عدم اطمینان وقوع خطر زلزله است. در شکل ۵ این دوتایی به همراه نام ورودی به صورت سه تایی نشان داده شده است. برای نمونه درجه‌ی عضویت و عدم عضویت خطر شاخه $A_8B_7C_8D_8E_8F_1$ به صورت به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \mu(A_8B_7C_8D_8E_8F_1) &= \mu(A_8) \wedge \mu(B_7) \wedge \mu(C_8) \wedge \mu(D_8) \wedge \mu(E_8) \wedge \mu(F_1) \\ &= 0/32 \wedge 0/45 \wedge 0/61 \wedge 0/65 \wedge 0/52 \wedge 0/31 = 0/31, \\ \vartheta(A_8B_7C_8D_8E_8F_1) &= \vartheta(A_8) \vee \vartheta(B_7) \vee \vartheta(C_8) \vee \vartheta(D_8) \vee \vartheta(E_8) \vee \vartheta(F_1) \\ &= 0/51 \vee 0/44 \vee 0/26 \vee 0/31 \vee 0/41 \vee 0/59 = 0/59. \end{aligned}$$

نتایج به صورت فضای امکان خطر در شکل ۶ نمایش داده شده است.

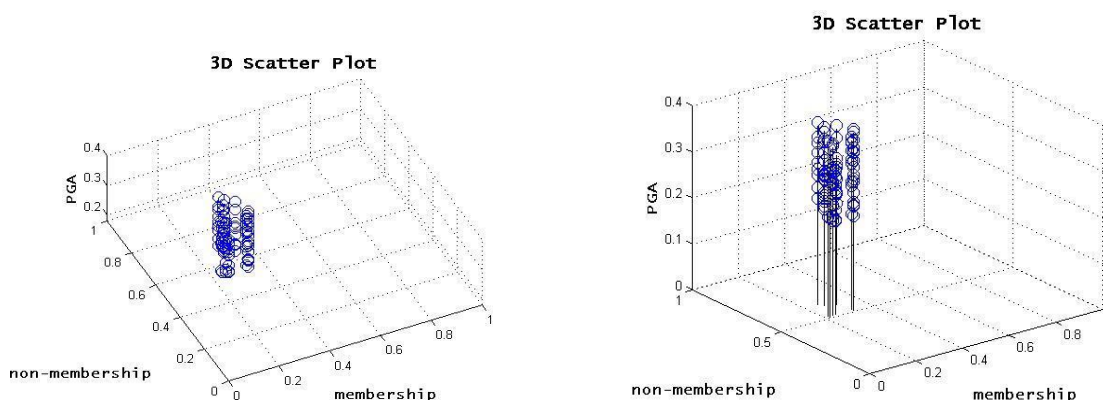
این درخت ۱۰۸۰ شاخه دارد که با استفاده از t -نرم، مقدار عضویت هر شاخه و با استفاده از t -هم نرم، مقدار عدم عضویت هر شاخه را می‌توان تعیین کرد. در اینجا برای محاسبه‌ی درجه عضویت و عدم عضویت شاخه‌ها از t -نرم معروف مینیمم و t -هم نرم معروف ماکسیمم استفاده می‌شود. همچنین خروجی هر مسیر درخت، یک عدد دو

در اینجا، به عنوان مثال درجه عضویت و عدم عضویت خطر بعضی از شاخه‌های درخت منطقی فازی شهودی به صورت جدول ۲ است. با انجام تحلیل خطر، شتاب زلزله حاصل از هر شاخه درخت منطقی فازی شهودی محاسبه و

جدول ۲. نمونه نتایج مثال درجات عضویت و عدم عضویت و همچنین خطر بعضی از شاخه‌های درخت منطقی فازی شهودی شکل ۵
Table 2. Sample results of degree of membership and non-membership as well as the seismic hazard (earthquake pga) of some branches of Intuitionistic fuzzy logic tree of Figure 5

شاخه	(μ, ϑ)	خطر (شتاب g)	شاخه	(μ, ϑ)	خطر (شتاب g)
$A_8B_7C_8D_8E_8F_1$	(0/31, 0/59)	0/22	$A_8B_7C_8D_8E_8F_6$	(0/28, 0/62)	0/24
$A_8B_7C_8D_8E_8F_2$	(0/26, 0/63)	0/29	$A_8B_7C_8D_8E_8F_7$	(0/24, 0/52)	0/28
$A_8B_7C_8D_8E_8F_3$	(0/22, 0/51)	0/29	$A_8B_7C_8D_8E_8F_8$	(0/32, 0/51)	0/32
$A_8B_7C_8D_8E_8F_4$	(0/27, 0/61)	0/23	$A_8B_7C_8D_8E_8F_9$	(0/32, 0/51)	0/32
$A_8B_7C_8D_8E_8F_5$	(0/25, 0/52)	0/26	$A_8B_7C_8D_8E_8F_{10}$	(0/32, 0/51)	0/20
$A_8B_7C_8D_8E_9F_1$	(0/31, 0/59)	0/21	$A_8B_7C_8D_8E_9F_6$	(0/28, 0/62)	0/24
$A_8B_7C_8D_8E_9F_2$	(0/26, 0/63)	0/31	$A_8B_7C_8D_8E_9F_7$	(0/24, 0/52)	0/23
$A_8B_7C_8D_8E_9F_3$	(0/22, 0/51)	0/37	$A_8B_7C_8D_8E_9F_8$	(0/32, 0/51)	0/22
$A_8B_7C_8D_8E_9F_4$	(0/27, 0/61)	0/39	$A_8B_7C_8D_8E_9F_9$	(0/32, 0/51)	0/36
$A_8B_7C_8D_8E_9F_5$	(0/25, 0/52)	0/31	$A_8B_7C_8D_8E_9F_{10}$	(0/32, 0/51)	0/20
$A_8B_7C_8D_8E_{10}F_1$	(0/31, 0/59)	0/28	$A_8B_7C_8D_8E_{10}F_6$	(0/28, 0/62)	0/39
$A_8B_7C_8D_8E_{10}F_2$	(0/26, 0/63)	0/37	$A_8B_7C_8D_8E_{10}F_7$	(0/24, 0/52)	0/40
$A_8B_7C_8D_8E_{10}F_3$	(0/22, 0/52)	0/28	$A_8B_7C_8D_8E_{10}F_8$	(0/32, 0/52)	0/38
$A_8B_7C_8D_8E_{10}F_4$	(0/27, 0/61)	0/38	$A_8B_7C_8D_8E_{10}F_9$	(0/32, 0/52)	0/28

$A_8B_7C_8D_8E_{10}F_5$	(0/25, 0/52)	0/34	$A_8B_7C_8D_8E_{10}F_{10}$	(0/32, 0/52)	0/31
$A_8B_7C_8D_9E_8F_1$	(0/31, 0/59)	0/33	$A_8B_7C_8D_9E_8F_6$	(0/28, 0/62)	0/30
$A_8B_7C_8D_9E_8F_2$	(0/26, 0/63)	0/21	$A_8B_7C_8D_9E_8F_7$	(0/24, 0/52)	0/25
$A_8B_7C_8D_9E_8F_3$	(0/22, 0/51)	0/29	$A_8B_7C_8D_9E_8F_8$	(0/32, 0/51)	0/30
$A_8B_7C_8D_9E_8F_4$	(0/27, 0/61)	0/39	$A_8B_7C_8D_9E_8F_9$	(0/32, 0/51)	0/27
$A_8B_7C_8D_9E_8F_5$	(0/25, 0/52)	0/21	$A_8B_7C_8D_9E_8F_{10}$	(0/32, 0/51)	0/27
$A_8B_7C_8D_9E_9F_1$	(0/31, 0/59)	0/29	$A_8B_7C_8D_9E_9F_6$	(0/28, 0/62)	0/22
$A_8B_7C_8D_9E_9F_2$	(0/26, 0/63)	0/28	$A_8B_7C_8D_9E_9F_7$	(0/24, 0/52)	0/35
$A_8B_7C_8D_9E_9F_3$	(0/22, 0/51)	0/34	$A_8B_7C_8D_9E_9F_8$	(0/32, 0/51)	0/33
$A_8B_7C_8D_9E_9F_4$	(0/27, 0/61)	0/33	$A_8B_7C_8D_9E_9F_9$	(0/32, 0/51)	0/23
$A_8B_7C_8D_9E_9F_5$	(0/25, 0/52)	0/29	$A_8B_7C_8D_9E_9F_{10}$	(0/32, 0/51)	0/31
$A_8B_7C_8D_9E_{10}F_1$	(0/31, 0/59)	0/21	$A_8B_7C_8D_9E_{10}F_6$	(0/28, 0/62)	0/30
$A_8B_7C_8D_9E_{10}F_2$	(0/26, 0/63)	0/24	$A_8B_7C_8D_9E_{10}F_7$	(0/24, 0/52)	0/31
$A_8B_7C_8D_9E_{10}F_3$	(0/22, 0/52)	0/37	$A_8B_7C_8D_9E_{10}F_8$	(0/32, 0/52)	0/22
$A_8B_7C_8D_9E_{10}F_4$	(0/27, 0/61)	0/36	$A_8B_7C_8D_9E_{10}F_9$	(0/32, 0/52)	0/36
$A_8B_7C_8D_9E_{10}F_5$	(0/25, 0/52)	0/32	$A_8B_7C_8D_9E_{10}F_{10}$	(0/32, 0/52)	0/26
$A_8B_7C_8D_{10}E_8F_1$	(0/31, 0/59)	0/28	$A_8B_7C_8D_{10}E_8F_6$	(0/28, 0/62)	0/27
$A_8B_7C_8D_{10}E_8F_2$	(0/26, 0/63)	0/32	$A_8B_7C_8D_{10}E_8F_7$	(0/24, 0/52)	0/33
$A_8B_7C_8D_{10}E_8F_3$	(0/22, 0/51)	0/35	$A_8B_7C_8D_{10}E_8F_8$	(0/32, 0/51)	0/30
$A_8B_7C_8D_{10}E_8F_4$	(0/27, 0/61)	0/28	$A_8B_7C_8D_{10}E_8F_9$	(0/32, 0/51)	0/24
$A_8B_7C_8D_{10}E_8F_5$	(0/25, 0/52)	0/37	$A_8B_7C_8D_{10}E_8F_{10}$	(0/32, 0/51)	0/28
$A_8B_7C_8D_{10}E_9F_1$	(0/31, 0/59)	0/24	$A_8B_7C_8D_{10}E_9F_6$	(0/28, 0/62)	0/36
$A_8B_7C_8D_{10}E_9F_2$	(0/26, 0/63)	0/37	$A_8B_7C_8D_{10}E_9F_7$	(0/24, 0/52)	0/36
$A_8B_7C_8D_{10}E_9F_3$	(0/22, 0/51)	0/23	$A_8B_7C_8D_{10}E_9F_8$	(0/32, 0/51)	0/37
$A_8B_7C_8D_{10}E_9F_4$	(0/27, 0/61)	0/23	$A_8B_7C_8D_{10}E_9F_9$	(0/32, 0/51)	0/38
$A_8B_7C_8D_{10}E_9F_5$	(0/25, 0/52)	0/35	$A_8B_7C_8D_{10}E_9F_{10}$	(0/32, 0/51)	0/30
$A_8B_7C_8D_{10}E_{10}F_1$	(0/31, 0/59)	0/38	$A_8B_7C_8D_{10}E_{10}F_6$	(0/28, 0/62)	0/32
$A_8B_7C_8D_{10}E_{10}F_2$	(0/26, 0/63)	0/20	$A_8B_7C_8D_{10}E_{10}F_7$	(0/24, 0/52)	0/29
$A_8B_7C_8D_{10}E_{10}F_3$	(0/22, 0/52)	0/33	$A_8B_7C_8D_{10}E_{10}F_8$	(0/32, 0/52)	0/31
$A_8B_7C_8D_{10}E_{10}F_4$	(0/27, 0/61)	0/21	$A_8B_7C_8D_{10}E_{10}F_9$	(0/32, 0/52)	0/27
$A_8B_7C_8D_{10}E_{10}F_5$	(0/25, 0/52)	0/27	$A_8B_7C_8D_{10}E_{10}F_{10}$	(0/32, 0/52)	0/23



شکل ۶. فضای امکان خطر شهر اهواز

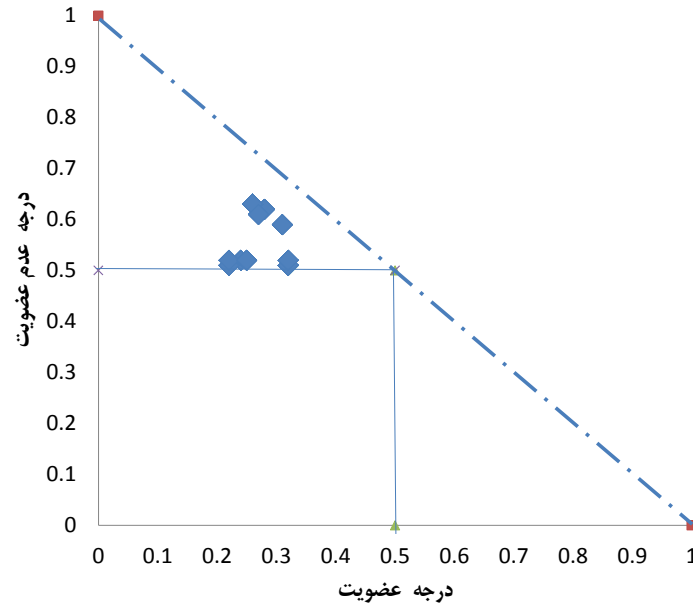
Fig. 6. The seismic hazard possibility space of in the Ahvaz city

خطر متمرکز شویم. شکل‌های ۷ و ۸ صفحه امکان، خطر شهر اهواز را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۷، خطر شهر اهواز در منطقه عدم اطمینان (عدم پذیرش) واقع شده

بر اساس آنچه در شکل ۶ دیده می‌شود، میزان خطر و درجه اطمینان خبرگان از آن میزان خطر، قابل دسترسی است. برای درک درست‌تر شکل، بهتر است بر صفحه امکان

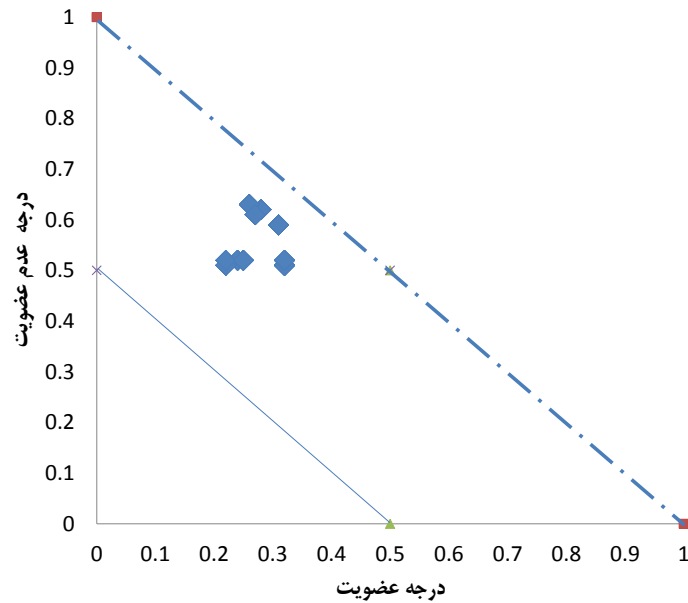
شده است. قابل قبول نبودن در کنار ابهام کم به معنای آن است که خبرگان در قبول نداشتن این نتایج تقریباً اطمینان دارند.

است. بنابراین، تحلیل احتمالی خطر در این حالت با پذیرش اندک خبرگان مواجه است. معنی این بیان آن است که از دیدگاه خبرگان این نتایج چندان قابل قبول نیست. بر اساس شکل ۸ خطر شهر اهواز در منطقه ابهام کم واقع



شکل ۷. خطر زلزله شهر اهواز در منطقه عدم اطمینان صفحه امکان خطر

Fig. 7. The seismic hazard of Ahvaz city in the uncertainty part of the possibility space



شکل ۸. خطر زلزله شهر اهواز در منطقه ابهام کم صفحه امکان خطر

Fig. 8. The seismic hazard of Ahvaz city in the low ambiguity part of the possibility space

علمی برای تصمیم‌گیری‌های بهتر در زمینه مدیریت خطرات زلزله در مناطق شهری مورد استفاده قرار گیرد. این تحقیق چارچوب نوآورانه برای کمی‌سازی عدم قطعیت و نظرات کارشناسان در ارزیابی خطرات زلزله ارائه داده است. بر اساس نتایج این پژوهش امکانات زیر قابل تصور است:

- ۱- انتخاب مقادیر مناسب‌تر خطر با توجه به شفافیت ایجاد شده توسط فضای امکان و تعاریف صفحه امکان،
- ۲- بازنگری در نتایج تحلیل خطر با توجه به قرار گرفتن در مناطق مختلف صفحه امکان،
- ۳- ابطال نتایج تحلیل خطر و تلاش برای کسب اطلاعات پایه دقیق‌تر و بسط و توسعه مدل‌های مناسب‌تر و تکرار تحلیل خطر با اطلاعات دقیق.

استفاده از نظریه فازی شهودی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر در تحلیل خطر زلزله و مدیریت بحران در مناطق شهری مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در ارزیابی خطر زلزله، نیاز به رویکردهای نوین و چندبعدی در این زمینه بیش از پیش احساس می‌شود. این تحقیق می‌تواند مبنای علمی برای تصمیم‌گیری‌های بهتر در زمینه مدیریت خطرات زلزله در مناطق شهری باشد.

قدردانی

در انجام این پژوهش از امکانات پردازش اطلاعات مرکز پایش، ارزیابی و پیش‌بینی بحران‌های ناشی از بلایای طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان استفاده شده است. به این وسیله از آقایان مهدی محمدی، حشمت اله محمودیان و محمد طاهر محقق قدردانی می‌شود.

References

Aghanabati, A., (2004). The Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, geological survey of Iran. (In Persian).

بر اساس این نتایج ترکیب عدم پذیرش و ابهام کم در تحلیل خطر زلزله، به این معناست که کارشناسان به‌طور کلی در رد نتایج تحلیل‌های خطر زلزله در اهواز اطمینان بیشتری دارند. این یافته‌ها بر لزوم بهبود مدل‌های خطر زلزله و استفاده از داده‌های دقیق‌تر در این منطقه به منظور بالا بردن اطمینان و کاهش ابهام تأکید دارند. همچنین، تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در شرایط کنونی، عدم قطعیت‌های موجود در ارزیابی خطر زلزله می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های نادرست منجر شود. بنابراین، می‌توان گفت که هر نتیجه تحلیل خطری که برای شهر اهواز ارائه شده است نمی‌تواند مبنای مطمئنی برای طراحی باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، رویکردی نوین برای ارزیابی خطر زلزله در شهر اهواز با استفاده از نظریه فازی شهودی ارائه شده است. با ساخت فضای امکان‌پذیری و وزن دهی به درخت منطقی تحلیل خطر، توانسته شد به درک بهتری از سناریوهای مختلف خطر دست یافت. نتایج نشان‌دهنده این است که خطر زلزله در اهواز در ناحیه "عدم پذیرش" یا "عدم قطعیت" قرار دارد، که به معنای پایین بودن اعتماد کارشناسان به نتایج تحلیل‌های احتمالی خطر زلزله است. این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از مجموعه‌های فازی شهودی می‌تواند به عنوان یک چارچوب نوآورانه برای کمی‌سازی عدم قطعیت و نظرات کارشناسان در ارزیابی خطرات مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، یافته‌ها بر لزوم بررسی و بهبود مدل‌های خطر زلزله در اهواز تأکید دارند. به طور کلی، این مطالعه می‌تواند به عنوان یک مبنای

Akkar, S., Sandikkaya, M.A., & Bommer, J.J., (2014). Empirical Ground-motion Models for Point-and Extended-source Crustal Earthquake Scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of earthquake engineering*, 12(1),

- 359-387. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9461-4>
- Ali, M. S., Saeed, K., Dong, L., & Jianxun, M. (2024). Quantifying the role of logic tree parameters in soil probabilistic seismic hazard assessment: Insights from sensitivity analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 181, 108635. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108635>
- Ambraseys, N. N., Douglas, J., Sarma, S. K., & Smit, P. M. (2005). Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration. *Bulletin of earthquake engineering*, 3(1), 1-53. <https://doi.org/10.1007/s10518-005-0183-0>
- Ambraseys, N.N., & Melville, C.P., (1982). *A history of Persian Earthquakes*, Cambridge University Press. Cambridge; New York .
- Arian, M., 2015. Seismotectonic-geologic Hazards Zoning of Iran. *Earth Sciences Research Journal*, 19(1), 7-13. <https://doi.org/10.15446/esrj.v19n1.40664>
- Azadmehr, M., (2009). Risk Assessment and Vulnerability Evaluation of Ahwaz Urban Tunnel, Tarbiat Modares University (TMU).
- Atanassov, K.T. (1986), *Intuitionistic Fuzzy Sets, Fuzzy Sets and Systems*, 20, 87-96.
- Berberian, M., & King, G.C.P., (1981). Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Can. J. Earth Sci.* 18 (2), 210-265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Biswas, S., Bansal, S., & Gupta, A., (2017). Neutrosophic Group Decision for Modeling of Post Earthquake Disaster Assessment. *IRACST – Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ)*, 7(2), 1-8. <https://vixra.org/pdf/1711.0053v1.pdf>
- Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., & Atkinson, G. M. (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1057-1085. <https://doi.org/10.1193/070113EQS184M>
- Bommer, J. J., Douglas, J., & Strasser, F. O. (2003). Style-of-faulting in ground-motion prediction equations. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1(2), 171-203. <https://doi.org/10.1023/A:1026323123154>
- Brophy, J.G., (2008). A study of rare earth element (REE)-SiO₂ variations in felsic liquids generated by basalt fractionation and amphibolite melting: a potential test for discriminating between the two different processes. *Contrib. Mineral. Petrol.* 156 (3), 337-357. <https://doi.org/10.1007/s00410-008-0289-x>
- Campbell, K. W. (1997). Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra. *Seismological research letters*, 68(1), 154-179. <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.4.474>
- Charchi, A., Asghari, E., Karmi, R., & Nazarpour, N., (2009). Ahwaz Fault Mechanism and It's Seismic Activity, 12th Symposium of Geological Society of Iran, February 18 , Ahwaz
- Delavaud, E., Cotton, F., Akkar, S., Scherbaum, F., Danciu, L., Beauval, C., ... & Theodoulidis, N. (2012). Toward a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe. *Journal of Seismology*, 16, 451-473. <https://doi.org/10.1007/s10950-012-9281-z>
- Ebrahimi Samani B., Esmaeili B., Zare M., & Dana M., (2017). An Overview of the Geology of Ahwaz City. *Arianaghsh*. (In Persain)
- Eftekhari, N., Motaghd, S., Emadali, L., & Sayyadpour, H., (2022). Ranking of ground motion prediction equation for use in the seismic hazard analysis of Ahwaz city using data envelopment analysis. *Journal of Engineering Geology* 2022; 16 (2) :99-124. (In Persain) <http://jeg.khu.ac.ir/article-1-3083-en.html>
- Esmaeili, B., Almasian, M., Samani, B., & Samani, A., (2015). Age Dating of Ahwaz Fault Activities and Karoun River Displacement by Thermal Luminescence and Geotechnical Studies and Recording of New-Found Faults During Performance of Ahwaz Urban Railway Project. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 24, 69-79. (In Persain) <https://doi.org/10.22071/gsj.2015.43353>
- Farhadian Babadi, M., Masoudi, F., & Zarasvandi, A. (2012). Environmental assessment of drilling wastes: wastes of well No. 449 in Ahwaz oil field

- (a case study). *Advanced Applied Geology*, 2(3), 100-110. (In Persian) https://aag.scu.ac.ir/article_11580.html?lang=en
- Giner, J. J., Molina, S., Delgado, J., & Jáuregui, P. (2002). Mixing methodologies in seismic hazard assessment via a logic tree procedure: an application for Eastern Spain. *Natural Hazards*, 25, 59-81. <https://doi.org/10.1023/A:1013390825237>
- Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y., & Koketsu, K. (2009). An Empirical Spectral Ground-motion Model for Iran. *Journal of seismology*, 13(4), 499-515. <https://doi.org/10.1007/s10950-008-9143-x>
- Ghodrati Amiri, G., Mahdavian, A., & Dana, F. M. (2007a). Attenuation relationships for Iran. *Journal of Earthquake Engineering*, 11(4), 469U" -492. <https://doi.org/10.1080/13632460601034049>
- Hamzehloo, H., & Mahood, M., (2012). Ground-motion Attenuation Relationship for East Central Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(6), 2677-2684. <https://doi.org/10.1785/0120110249>
- Harrison, T.M., Leloup, P.H., Ryerson, F.J., Tapponnier, P., Lacassin, R., & Chen, W., (1995). Diachronous initiation of transtension along the Ailao Shan-Red River shear zone, Yunnan and Vietnam, In: Ann Yin, Harrison, T.M. (Eds.), *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge University Press, pp. 208-226. <https://geologie.enslyon.fr/HERVE/recherche/publications/zipper.pdf>
- Hessami, K., Jamali, F., & Tabassi, H., (2003). Major Active Faults of Iran, Scale 1: 2,500,000. *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*.
- Khademi, M. H. (2002, September). Attenuation of peak and spectral accelerations in the Persian plateau. In *Proceedings of the Twelfth European Conference on Earthquake Engineering*.
- Mc Quarrie, N., (2004). Crustal Scale Geometry of Zagros Fold, thrust belt, Iran, *Journal of Structural Geology*, Volume 26, Issue 3, 519-535. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.08.009>
- Motaghed, S., Eftekhari, N., Emadali, L., & Sayyadpour, H. (2024). Revision of Ahvaz City seismic hazard analyzes according to the state of Ahvaz fault. *Advanced Applied Geology*. (In Persian). [doi: 10.22055/aag.2024.44810.2405](https://doi.org/10.22055/aag.2024.44810.2405).
- Motaghed, S., Eftekhari, N., Mohammadi, M., & Khazaei, M. (2023). Logic tree branches' weights in the probabilistic seismic hazard analysis: the need to combine inter-subjective and propensity probability interpretations. *Journal of Seismology*, 27(6), 1035-1046. <https://doi.org/10.1007/s10950-023-10177-1>
- Motaghed, S., & Fakhriyat, A. R. (2022). A Reliable Method for Determining the Tapered Minimum Magnitude in a Probabilistic Seismic Hazard Analysis. *International Journal of Reliability, Risk and Safety: Theory and Application*, 5(2), 89-95. [10.30699/IJRRS.5.2.9](https://doi.org/10.30699/IJRRS.5.2.9)
- Motaghed, S., Yazdani, A., Nicknam, A., & Khanzadi, M. (2018). Sobol sensitivity generalization for engineering and science applications. *Journal of modeling in engineering*, 16(54), 217-226. (In Persian). [10.22075/jme.2017.12259.1221](https://doi.org/10.22075/jme.2017.12259.1221)
- Motiei, H., (1995). *Petroleum Geology of Zagros*. Geological Survey of Iran Publication 589. (In Persian).
- Mousavi-Bafrouei, S.H., Mirzaei, N., & Shabani, E., (2014). A Declustered Earthquake Catalog for the Iranian Plateau. *Annals of geophysics*, 57(6), <https://doi.org/10.4401/AG-6395>
- Mousavi-Bafrouei, S.H., & Mahani, A.B., (2020). A Comprehensive Earthquake Catalogue for the Iranian Plateau (400 BC to December 31, 2018). *Journal of Seismology* 24, 709-724. <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09923-6>
- Musson, R. (2012). On the nature of logic trees in probabilistic seismic hazard assessment. *Earthquake Spectra*, 28(3), 1291-1296.
- Nowroozi, A.A., (1976). Seismotectonic Provinces of Iran. *Bulltain of Seismological Society of America* 66, 1249-1276. <https://doi.org/10.1785/BSSA0660041249>
- Saffari, H., Kuwata, Y., Takada, S., & Mahdavian, A. (2012). Updated PGA, PGV, and spectral acceleration attenuation relations for Iran. *Earthquake spectra*, 28(1), 257-276. <https://doi.org/10.1193/1.3673622>
- Sajona, F.G., Maury, R.C., Bellon, H., Cotten, J., Defant, M.J., & Pubellier, M., (1993). Initiation of subduction and the generation of slab melts in

- western and eastern Mindanao, Philippines. *Geology* 21 (11), 1007–1010. [https://doi.org/10.1130/00917613\(1993\)021<1007:IOSATG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/00917613(1993)021<1007:IOSATG>2.3.CO;2)
- Schweizer, B. & Sklar, A. (1958). Espaces metriques aleatoires. *C. R. Acad. Sci. Paris Ser. A* 247:2092-2094.
- Schweizer, B. & Sklar, A. (1960). Statistical metric spaces. *Pacific J. Math.* 10:313-334.
- Schweizer, B. & Sklar, A. (1961). Associative functions and statistical triangle inequalities. *Publ. Math. Debrecen* 8:169- 186.
- Sharma, M. L., Douglas, J., Bungum, H., & Kotadia, J. (2009). Ground-motion prediction equations based on data from the Himalayan and Zagros regions. *Journal of Earthquake Engineering*, 13(8), 1191-1210. <https://doi.org/10.1080/13632460902859151>
- Sedaghati, F., & Pezeshk, S., (2017). Partially Nonergodic Empirical Ground motion Models for Predicting Horizontal and Vertical PGV, PGA, and 5% Damped Linear Acceleration Response Spectra Using Data from the Iranian Plateau. *Bulletin of the Seismological Society of America* 107(2), 934-948. <https://doi.org/10.1785/0120160205>
- Tahernia, N. (2014). Fuzzy-logic tree approach for seismic hazard analysis. *International Journal of Engineering and Technology*, 6(3), 182. <https://doi.org/10.7763/IJET.2014.V6.692>
- Vetr Tamijani, M., Tabarok, M., & Riahi Nouri, A., (2016). Development of Iran's Earthquake Code Rules for Applying the Near Field Effect - Case Application: Sites of Imam Reza Holy Shrine (AS) and Ahvaz Oil Field. *Sharif Journal of Civil Engineering* 31.2(4.2), 53-60.
- <https://doi.org/20.1001.1.26764768.1394.312.42.6.5>
- Weatherill, G., & Cotton, F. (2020). A ground motion logic tree for seismic hazard analysis in the stable cratonic region of Europe: regionalisation, model selection and development of a scaled backbone approach. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(14), 6119-6148. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00940-x>
- Wells, D.L., & Coppersmith, K.J., (1994). New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America* 84(4), 974-1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>
- Zadeh, L.A., (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), pp.338-353.
- Zafarani, H., Ghafoori, S.M.M., Adlparvar, M.R., Rajaeian, P., & Hasankhani, A., (2015). Application of Time and Magnitude Predictable Model for Long-term Earthquake Prediction in Iran. *Natural Hazards* 78, 155-178. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1708-8>
- Zafarani, H., Luzi, L., Lanzano, G., & Soghrat, M.R., (2018). Empirical Equations for the Prediction of PGA and Pseudo Spectral Accelerations Using Iranian Strong-motion Data. *Journal of Seismology* 22(1), 263-285. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9704-y>
- Zare, M., Ghafory-Ashtiany, M., & Bard, P.-Y. (1999). Attenuation law for the strong-motions in Iran. *Proceedings of the Third International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, vol. 1. Pp. 345–354 .

پیوست

“درجه عدم عضویت” نسبت می‌دهد. یعنی مجموعه A را با تابع $f_A: X \rightarrow [0, 1] \times [0, 1]$ بطوری که $0 \leq \mu_A(x) + \vartheta_A(x) \leq 1$ و $f_A(x) = (\mu_A(x), \vartheta_A(x))$ برای هر عضو $x \in X$ نظیر می‌کند.

با توجه به محدودیت فوق می‌توان درجه عضویت در مجموعه‌های فازی شهودی را مجموعه

$$L = \{(x, y) \in [0, 1]^2 \mid 0 \leq x + y \leq 1\}$$

در این بخش تعاریف پایه مورد استفاده در روش پیشنهادی به طور خلاصه آورده شده است (Atanassov, 1986).

تعریف. یک زیر مجموعه فازی شهودی از X یا یک مجموعه فازی شهودی در X ، مجموعه‌ای مانند A است که به هر عضو $x \in X$ دو درجه یکی “درجه عضویت” و دیگری

نرم‌های مثلثی زیادی توسط محققان برای کاربردهای متفاوت معرفی شده است. مهم‌ترین نرم‌های مثلثی که بیشترین کاربرد را دارند برای هر $x, y \in [0, 1]$ عبارتند از:

$$\bullet \quad T_M(x, y) = \min(x, y) \quad \text{نرم مثلثی مینیمم}$$

$$\bullet \quad T_P(x, y) = x \cdot y \quad \text{نرم مثلثی حاصلضرب.}$$

می‌توان نشان داد که نرم مثلثی مینیمم از همه نرم‌های مثلثی بزرگ‌تر است، به این معنی که برای هر نرم مثلثی T و هر $x, y \in [0, 1]$ داریم: $T(x, y) \leq \min(x, y)$.
برای مدل‌سازی توابع عضویت اجتماع نیز می‌توان از توابعی که t -هم نرم مثلثی (S -نرم) نامیده می‌شوند استفاده کرد که تعریف آن به صورت زیر است:

تعریف تابع $S: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ یک t -هم نرم مثلثی نامیده می‌شود هرگاه برای هر $x, y, z \in [0, 1]$ در شرایط زیر صدق کند:

$$۵. \quad S(0, x) = x$$

$$۶. \quad S(x, y) = S(y, x)$$

$$۷. \quad S(x, S(y, z)) = S(S(x, y), z)$$

$$۸. \quad \text{اگر } w \leq x \text{ و } y \leq z \text{، آنگاه}$$

$$S(w, y) \leq S(x, z)$$

شرایط ۱، ۲، ۳ و ۴ ترتیب خواص جابجایی، هم‌نوایی، شرکت‌پذیری و مرزی هستند. به آسانی از آن‌ها نتیجه می‌شود که $S(1, 0) = S(0, 1) = S(1, 1) = 1$ و $S(0, 0) = 0$. خواص مرزی فوق این معنی را نمایان می‌سازند که هر t -هم نرم مثلثی S می‌تواند تعمیم مناسبی برای تابع درستی فصل و در نتیجه، مدلی برای درجه عضویت اجتماع دو مجموعه فازی باشد. پس اگر A و B دو مجموعه فازی باشند برای هر $x \in X$ می‌توان نوشت:

$$(A \cup B)(x) = S(A(x), B(x))$$

در نظر گرفت. در تعریف بالا تابع عضویت μ_A و تابع عدم عضویت θ_A هر دو مجموعه‌های فازی هستند. از این رو مجموعه‌های فازی شهودی را مجموعه‌های فازی دو بعدی نیز می‌گویند. مقدار $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \theta_A(x)$ درجه شک و تردید عضویت $x \in X$ در A نامیده می‌شود.

برای تعیین تابع عضویت اشتراک دو مجموعه فازی بر اساس لطفعلی زاده (Zadeh, 1965)، از تابع مینیمم (\min) استفاده می‌شود. تحدید این تابع به مجموعه دو عضوی $\{0, 1\}$ همان جدول درستی \wedge (عطف) در منطق کلاسیک است. تابع ماکسیمم (\max) نیز تعمیم تابع \vee (فصل) در منطق کلاسیک می‌باشد. برحسب لزوم می‌توان از توابعی زیر برای توابع عضویت استفاده نمود (Schweizer & Sklar 1958, 1960, 1961).

تعریف. تابع $T: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ نرم مثلثی یا t -نرم نامیده می‌شود هرگاه در شرایط زیر برای هر $x, y, z \in [0, 1]$ صدق کند:

$$۱. \quad T(1, x) = x$$

$$۲. \quad T(x, y) = T(y, x)$$

$$۳. \quad T(x, T(y, z)) = T(T(x, y), z)$$

$$\text{اگر } w \leq x \text{ و } y \leq z \text{، آنگاه}$$

$$۴. \quad T(w, y) \leq T(x, z)$$

شرایط ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب خواص جابجایی، هم‌نوایی، شرکت‌پذیری و مرزی هستند. از این خواص نتیجه می‌شود که $T(1, 0) = T(0, 1) = T(0, 0) = 0$ و $T(1, 1) = 1$. خواص مرزی فوق این معنی را نمایان می‌سازند که هر نرم مثلثی T می‌تواند تعمیم مناسبی برای تابع درستی عطف و در نتیجه مدلی برای درجه عضویت اشتراک دو مجموعه فازی باشد. پس اگر A و B دو مجموعه فازی باشند، برای هر $x \in X$ می‌توان نوشت:

$$(A \cap B)(x) = T(A(x), B(x))$$

نظیر نرم‌های داده شده، t -هم نرم‌های زیر را برای هر $x, y \in [0, 1]$ داریم:

- $S_M(x, y) = \max(x, y)$, (هم-ماکسیمم t نرم)
- $S_P(x, y) = x + y - x \cdot y$, (هم-نرم حاصل جمع t جبری).

مانند نرم‌های مثلثی، t -هم نرم‌های زیادی معرفی شده اند. اما همیشه به خاطر دوگان بودن این دو مفهوم می‌توان از یک نرم مثلثی داده شده T , یک t -هم نرم مثلثی S ساخت و برعکس. رابطه آن‌ها برای هر $x, y \in [0, 1]$ به صورت زیر است:

$$S(x, y) = 1 - T(1 - x, 1 - y)$$