

پهنه‌بندی زمین‌لرزه‌ای گستره تهران و نواحی مجاور با استفاده از مجموعه‌های فازی

الهام بوستان^{۱*}، نوربخش میرزائی^۲، مرتضی اسکندری قادی^۳ و علی شفیعی^۴

^۱ استادیار، گروه زمین‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، ایران

^۲ دانشیار، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳ کاندیدار، گروه علوم پایه مهندسی دانشکده فنی دانشگاه تهران، ایران

^۴ استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(دریافت: ۸۹/۳/۳، پذیرش نهایی: ۹۰/۴/۱۳)

چکیده

ارزیابی خطر زمین‌لرزه، مانند بسیاری از موضوعات دیگر زلزله‌شناسی، به دلیل تنوع عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لرزه‌ها، مبحث پیچیده‌ای است. وجود عدم قطعیت که ناشی از مبهم بودن و ناکامل بودن داده‌های مرتبط است، استفاده از روش‌های مناسب در بررسی خطر زمین‌لرزه را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. استفاده از روش فازی این امکان را فراهم می‌سازد که بتوان عدم قطعیت‌ها را در این بررسی‌ها لحاظ کرد. در این پژوهش با استفاده از روش احتمالاتی و به‌کارگیری مجموعه‌های فازی، به‌مثابه ریاضیاتی که براساس عدم قطعیت بنا شده، تحلیل خطر زمین‌لرزه برای منطقه تهران و نواحی پیرامون، صورت گرفته است. ابتدا، پارامترهای موردنیاز محاسبات تحلیل احتمالاتی خطر زمین‌لرزه، با روش بُرش α به صورت فازی محاسبه شده‌اند. پس از به‌کارگیری مقادیر فازی در روابط موجود و استخراج خروجی به صورت فازی، با استفاده از روش مرکز سطح، خروجی غیر فازی شده است و درنهایت برای شبکه‌ای از نقاط، در منطقه‌ای به مختصات $37^{\circ}N - 34^{\circ}E$ و $54^{\circ} - 49^{\circ}E$ شامل تهران و نواحی پیرامون، مقادیر شتاب افقی مورد انتظار از رویداد زمین‌لرزه در چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه محاسبه و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در گستره تهران تهیه شده است. نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه برای ۱۰٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ سال)، و ۶۳٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۵۰ سال)، در گستره تهران تهیه و ارائه شده است. با توجه به نقشه‌های ارائه شده، شهر تهران در پهنه‌ای با شتاب جنبش زمین معادل $0.38g - 0.35g$ برای ۱۰٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال، و $0.15g - 0.12g$ برای ۶۳٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال قرار دارد. مقایسه نتایج این مطالعه با نتایج تحقیقات انجام شده به روش‌های مرسوم، نشان از دقت جمع‌آوری داده‌های پایه، انتخاب مناسب تابع‌های عضویت و تطبیق بهتر نتایج با تجربیات موجود دارد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل خطر زمین‌لرزه، چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه، مجموعه‌های فازی، بُرش α

Seismic zoning of Tehran Region using fuzzy sets

Boostan, E.¹, Mirzaei, N.², Eskandari Ghadi, M.³ and Shafiee, A.⁴

¹ Assistant Professor, Department of Geology, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

² Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Associate Professor, Department of Engineering Science, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran

⁴ Assistant Professor, Geotechnical Department, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIIES), Tehran, Iran

(Received: 24 May 2010, Accepted: 04 Jul 2011)

Abstract

Seismic hazard assessment like many other issues in seismology is a complicated problem, which is due to variety of parameters affecting the occurrence of earthquake. Uncertainty, which is a result of vagueness and incompleteness of the data, should be

considered in a rationale way. Herein, fuzzy set theory is used to take into account the uncertainty existed in the seismic hazard analysis. The Fuzzy Set Theory (FST) is an attractive methodology when vague and subjective judgments of a unique phenomenon enter probabilistic or mathematical models. Fuzzy sets are sets whose elements have degrees of membership. In classical set theory, the membership of elements in a set is assessed in binary terms according to a bivalent condition; an element either belongs or does not belong to the set. By contrast, fuzzy set theory permits the gradual assessment of the membership of elements in a set; this is described with the aid of a membership function valued in the real unit interval $[0, 1]$. Fuzzy sets generalize classical sets, since the indicator functions of classical sets are special cases of the membership functions of fuzzy sets, if the latter only take values 0 or 1. In fuzzy set theory, classical bivalent sets are usually called crisp sets.

Tehran is a densely populated metropolitan in which more than 10 million people live. Many destructive earthquakes happened in Iran in the last centuries. It comes from historical references that at least 6 times, Tehran has been destroyed by catastrophic earthquakes. The oldest one happened in the 4th century BC.

In this study, seismic hazard assessment of Tehran region, capital city of Iran, is conducted using a combination of probabilistic approach and fuzzy sets theory. The earthquake catalog used in the current study contains occurrence times and hypocentre locations of Iranian earthquakes and is derived from the seismic catalog published by Mirzaei et al (2002) for earthquakes during 1975 to 2000. The International Seismological Centre catalog (www.isc.ac.uk) was used to update the catalog data up until the year 2007.

In order to calculate seismic hazard for different return periods in probabilistic procedure for the Tehran region, an area encompassed by the 49.5° – 54° E longitudes and 34° – 37° N latitudes has been divided by 0.1° intervals generating 1350 grid points. Seismicity parameters are evaluated using the method in which magnitude uncertainty and incompleteness of earthquake data are considered.

A total of 20 area potential seismic sources are introduced, and several seismicity rates and b-values, maximum expected magnitudes are assigned to each of seismotectonic province and potential seismic sources.

To carry out seismic hazard analysis in the framework of fuzzy sets theory, all of the variables converted into triangular fuzzy sets with α -cut method. Eventually, the fuzzy response is defuzzified using the surface center method. Two maps are developed to indicate the earthquake hazard of the region in the form of iso-acceleration contours. They display a fuzzy-probabilistic estimate of peak ground acceleration (PGA) over bedrock for the return periods of 475 and 50 years. PGA values for this region are estimated to be 0.35g-0.38g and 0.12g-0.15g for 475- and 50-years return periods, respectively. Outcomes of this study would contribute for the quick and better estimation of the seismic design of structures.

Key words: Seismic hazard assessment, Potential seismic sources, Fuzzy set, α - cut

۱ مقدمه

برآورد خطر زمین لرزه در کلانشهر تهران در مقام یکی از بزرگترین و پرجمعیتترین کلان‌شهرهای دنیا، به‌علت

ایران به منزله قسمتی از کمربند آلپ-همالیا، یکی از سرزمین‌های زلزله‌خیز جهان است. تحقیقات لرزه‌خیزی و

شهری از سوی چونگ فو (۱۹۹۶) است. از دیگر کارهای صورت گرفته در این راستا می‌توان به تبدیل اطلاعات احتمالاتی به مجموعه‌های فازی مثلثی یا ذوزنقه‌ای، برای تحلیل‌های مهندسی از سوی آنوپ و همکاران (۲۰۰۶) و ارزیابی خطرپذیری (کریمی و هالرمیتر، ۲۰۰۷)، اشاره کرد که مبنای نظری تحقیق، استفاده از نظریه مجموعه فازی در حکم مکمل نظریه احتمالاتی، با یک بُعد اضافی به نام عدم قطعیت است. عدم قطعیت‌ها در مورد ارتباط پارامترهای شدت خطر، خسارت، تلفات و به عبارت دیگر روابط آسیب‌پذیری، با روابط فازی مطرح شده، ترکیب احتمال فازی خطر و رابطه آسیب‌پذیری، احتمال فازی خسارت (یا تلفات) را به بار می‌آورد. دستگاه عرضه شده در این تحقیق برای برآورد خطرپذیری بلایای طبیعی، به‌ویژه تحت شرایط نامطمئن مورد استفاده قرار گرفته است. وجودی و همکاران (۲۰۰۷)، مدل استنتاج فازی برای تحلیل خطر زلزله را به دست داده‌اند، که در آن سه پارامتر "طول گسل" و "فاصله از ساختگاه" و "دوره بازگشت" برای تشکیل موتور استنتاج فازی مورد استفاده قرار گرفته است.

روش احتمالاتی رایج‌ترین و برترین راهکار برای برآورد خطر زمین‌لرزه است (میرزائی، ۱۳۸۵). مراحل اصلی این روش ابتدا از سوی کورنل (۱۹۶۸) عرضه شد. شکی نیست که هر کدام از گام‌های تحلیل خطر زمین‌لرزه با عدم قطعیت‌هایی روبه‌رو است. به عبارت دیگر، در بسیاری از مسائل، فقط با یک عدد قاطع سروکار نداریم و ذات مسئله به گونه‌ای است که نمی‌توان یک عدد را به یک متغیر نسبت داد. در حقیقت مجموعه‌ای از مقادیر با امکان وقوع متفاوت بر مسئله حاکم است. استفاده از روش فازی در این مبحث راه نوینی است که این امکان را فراهم می‌کند که بتوان این عدم قطعیت‌ها را در مسئله لحاظ کرد. در نهایت، خروجی مسئله چه به صورت مجموعه فازی و چه به صورت عدد قاطع (که از غیر فازی کردن

قرار گرفتن در مجاورت گسل‌های فعال و لرزه‌خیز، اهمیت ویژه‌ای دارد. به دلیل وجود عدم قطعیت که ناشی از ناکامل بودن داده‌های مرتبط است، استفاده از روش‌های مناسب در بررسی خطر زمین‌لرزه ضروری است. از جمله این روش‌ها، کاربرد نظریه مجموعه‌های فازی است. برای کاربرد منطق فازی در این پژوهش، از پارامترهای فازی در برآورد خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی، استفاده شده است.

تحقیقاتی چند در ارتباط با برآورد بیشینه شتاب افقی جنبش زمین در گستره تهران صورت گرفته است که از جمله آنها می‌توان به تحقیقات بربریان و همکاران (۱۳۶۴)، زارع (۱۳۸۴)، میرزائی (۱۳۸۵) و قدرتی امیری و همکاران (۲۰۰۳) که همگی از روش احتمالاتی استفاده کرده‌اند، اشاره کرد. تحقیقات ذکر شده در مواردی همچون رابطه تضعیف مورد استفاده، مدل و تعداد چشمه‌های تعیین شده و همچنین، شیوه تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی برای محاسبه دوره بازگشت زلزله‌ها متفاوت‌اند. استفاده از روش فازی از سوی محققان در مباحث متفاوت زلزله‌شناسی متداول است. از این میان می‌توان به عرضه روابط دوره بازگشت زلزله، با استفاده از بزرگی‌های فازی شده از سوی چن و همکاران (۱۹۸۸) اشاره کرد. تحقیق پیش‌گفته با جداسازی تابع‌های عضویت بزرگی‌های فازی شده و به‌کارگیری روش ورتکس (Vertex)، به منظور تعیین تابع‌های عضویت ثابت‌های رگرسیون، α و β ، صورت می‌گیرد (دانگ و شاه، ۱۹۸۶). همچنین، مفاهیم پیش‌بینی خطر زمین‌لرزه با استفاده از نظریه فازی از سوی فرانگوپول و همکاران (۱۹۸۸)، گسترش داده شده و برآورد خطر زمین‌لرزه متغیر با زمان براساس خصوصیات مکانی و زمانی پیش‌نشانگرهای معین، از سوی دی و ایچیکاوا (۱۹۸۹) به صورت کمی عرضه شده است. تحقیق دیگر در این زمینه عرضه روشی برای محاسبه فازی خطرپذیری زلزله، در ارزیابی شدت در ساختگاه و تلفات

به دست می آید) پارامتر مورد نظر را بسیار منطقی تر بیان می کند.

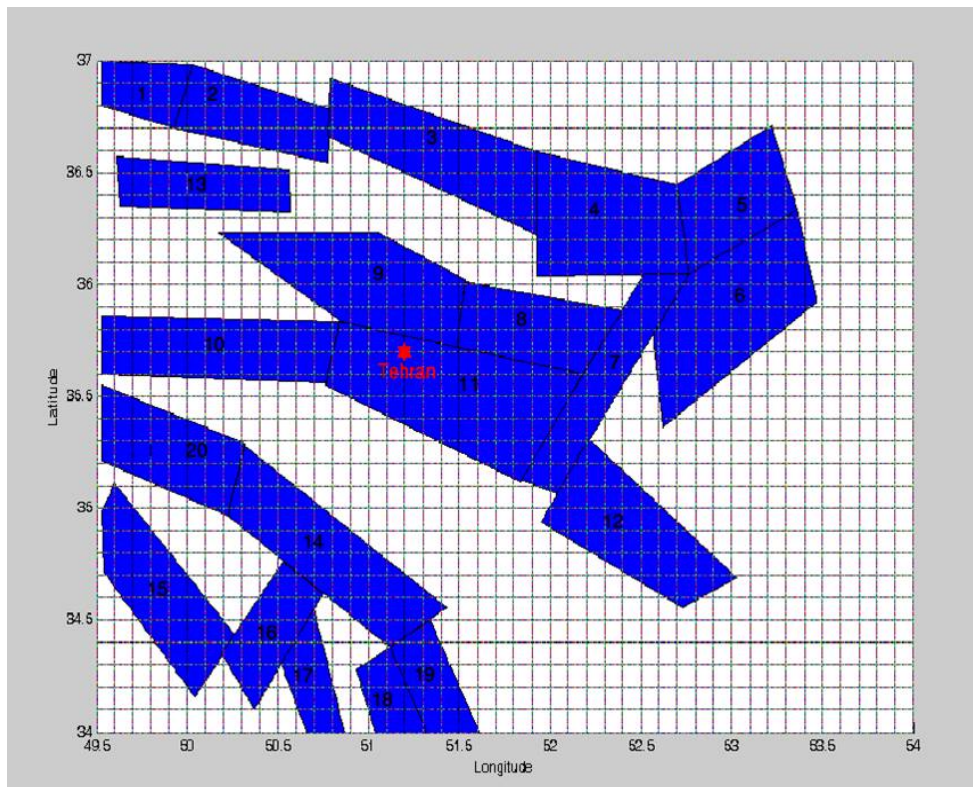
در این پژوهش، از منطق فازی برای برآورد خطر زمین لرزه به روش احتمالاتی استفاده شده است. به این ترتیب که ابتدا پارامترهای موجود در تحلیل احتمالاتی خطر زمین لرزه به صورت فازی تعیین شده اند. پس از به کارگیری پارامترهای فازی در روابط موجود با استفاده از روش بُرش α و استخراج خروجی به صورت فازی، با استفاده از روش مرکز سطح، خروجی غیر فازی شده است و در نهایت برای شبکه ای از نقاط، در منطقه تهران و نواحی پیرامون، مقادیر شتاب افقی مورد انتظار از رویداد زمین لرزه در چشمه های بالقوه زمین لرزه محاسبه شده و نقشه های پهنه بندی خطر زمین لرزه برای ۱۰٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ سال)، و ۶۳٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۵۰ سال)، تهیه و عرضه شده است. با توجه به نقشه های مطرح شده، شهر تهران در پهنه ای با شتاب جنبش زمین معادل g و $0.25g-0.3g$ برای ۱۰٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال، و

۲ تحلیل خطر زمین لرزه به روش احتمالاتی بر مبنای مجموعه های فازی

در این تحقیق، در ابتدا، فهرست نامه یکنواختی از زمین لرزه ها در منطقه مورد مطالعه ($37^{\circ}N-34^{\circ}E$ و $54^{\circ}E$ شامل تهران و نواحی پیرامون)، در بردارنده داده های تاریخی (قبل از ۱۹۰۰ میلادی) و داده های دستگاهی از ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۲، عرضه شده از سوی میرزائی و همکاران (۱۳۸۱) و از ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ برگرفته از مرکز بین المللی زلزله شناسی (ISC)، تهیه شده است. سپس، بر پایه اطلاعات زلزله شناسی، زمین شناسی و ژئوفیزیکی موجود، چشمه های بالقوه زمین لرزه به صورت پهنه ای بر اساس تحقیقات میرزائی و همکاران (۱۹۹۹) تعیین شده است (شکل ۱). برای محاسبات، گستره مورد بررسی به فاصله های ۰/۱ درجه طول و عرض جغرافیایی (مجموعاً ۱۳۵۰ نقطه) شبکه بندی شده است (شکل ۲).



شکل ۱. چشمه های بالقوه زمین لرزه در گستره تهران (میرزائی، ۱۳۸۵).



شکل ۲. شبکه‌بندی گستره مورد بررسی (همراه با چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه) برای محاسبات تحلیل خطر.

β ($\beta = b \ln(10)$) و λ ، نرخ سالانه فعالیت لرزه‌ای، استفاده شده است. براساس این جدول‌ها پارامتر λ ، با استفاده از رابطه فراوانی-بزرگی زمین‌لرزه‌ها (رابطه ۱) (گوتنبرگ و ریشتر، ۱۹۵۴)، به‌ازای بزرگی‌های بزرگ‌تر یا مساوی ۴، محاسبه شده است.

$$\text{Log}N = a - bM \quad (1)$$

که در آن، N فراوانی تجمعی یا افزایشی زمین‌لرزه‌ها، M بزرگی زمین‌لرزه‌ها و a و b پارامترهای ثابت برای داده‌های زمین‌لرزه‌های مورد استفاده است. نتایج محاسبات در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است.

براساس تقسیم‌بندی ایران‌زمین به ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی ازسوی میرزائی و همکاران (۱۹۹۸)، بخش عمده گستره مورد بررسی در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی البرزآذربایجان و بخش محدودتری در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی شرق ایران قرار می‌گیرد. پارامترهای لرزه‌خیزی در منطقه مورد تحقیقه روش کیجکو و سلفول (۱۹۹۲) را میرزائی و همکاران (۱۹۹۷) محاسبه کرده‌اند (جدول‌های ۱ و ۲). در این جدول‌ها در مدل مرز پایدار از توزیع یکنواخت و در مدل مرز ملایم از توزیع نرمال برای برآورد

جدول ۱. برآورد پارامترهای زلزله‌خیزی براساس زمین‌لرزه‌های ثبت شده در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی البرزآذربایجان (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۷).

مدل عدم قطعیت	β	$\lambda_{3.0}$	M_{\max}
مرز پایدار	1.91 ± 0.04	41.08 ± 3.35	8.02 ± 0.62
مرز ملایم	1.97 ± 0.07	37.86 ± 4.24	8.07 ± 0.67

جدول ۲. برآورد پارامترهای زلزله‌خیزی براساس زمین‌لرزه‌های ثبت شده در ایالت لرزه‌زمن‌ساختی ایران مرکزی- شرق ایران (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۷).

مدل عدم قطعیت	β	$\lambda_{3.0}$	M_{max}
مرز پایدار	1.94 ± 0.06	31.21 ± 3.26	7.80 ± 0.71
مرز ملایم	1.99 ± 0.09	27.93 ± 4.0	7.88 ± 0.81

جدول ۳. پارامترهای زلزله‌خیزی مورد استفاده در این مطالعه براساس داده‌های جدول ۱ برای ایالت لرزه‌زمن‌ساختی البرز-آذربایجان.

مدل عدم قطعیت	β	$\lambda_{4.0}$
مرز پایدار	1.91 ± 0.04	6.08
مرز ملایم	1.97 ± 0.07	5.60

جدول ۴. پارامترهای زلزله‌خیزی مورد استفاده در این تحقیق براساس داده‌های جدول ۲ برای ایالت لرزه‌زمن‌ساختی ایران مرکزی- شرق ایران.

مدل عدم قطعیت	β	$\lambda_{4.0}$
مرز پایدار	1.94 ± 0.06	4.62
مرز ملایم	1.99 ± 0.09	4.13

برای چشمه بالقوه M در آن ایالت، با استفاده از رابطه ۳ به دست می‌آید (گائو، ۱۹۸۸؛ شی و همکاران، ۱۹۹۲؛ میرزائی، ۱۳۸۵):

$$\lambda_{mj} = \frac{2\lambda[-\beta(m_j - M_{\min})]sh(0.5\beta\Delta M)}{1 - \exp[-\beta(M_{\max} - M_{\min})]} \quad (2)$$

برای $M_{\min} \leq m_j \leq M_{\max}$

$$\lambda_{l,mj} = \frac{2\lambda[-\beta(m_j - M_{\min})]sh(0.5\beta\Delta M)}{1 - \exp[-\beta(M_{\max} - M_{\min})]} f_{l,mj} \quad (3)$$

برای $M_{\min} \leq m_j \leq M_{\max}$

که در آن، m_j میان مقدار بازه بزرگی M ، تابع sh سینوسی هذلولی، ΔM گسترش بازه بزرگی، M_{\min} کمینه بزرگی اثرگذار بر سازه‌های مهندسی (معمولاً $M_{\min}=4$)، و M_{\max} بیشینه زمین‌لرزه موردانتظار در منطقه مورد بررسی است. به علاوه، $\lambda_{l,mj}$ نرخ رویداد سالانه و $f_{l,mj}$ تابع توزیع فضایی بازه بزرگی M در چشمه بالقوه M هستند. مفهوم تابع توزیع فضایی راشی و

مقادیر λ_4 از جدول‌های بالا برای منطقه مورد بررسی به نسبت مساحت واقع شده در هر ایالت لرزه‌زمن‌ساختی، برای ایالت‌های لرزه‌زمن‌ساختی البرز - آذربایجان و ایران مرکزی - شرق ایران به ترتیب ۱/۲۱ و ۰/۲۸ است. همچنین برای ایالت البرز - آذربایجان زمین‌لرزه با بزرگی $M_s = 6$ ، و در ایران مرکزی - شرق ایران، زمین‌لرزه با بزرگی $M_s = 5/5$ درحکم زمین‌لرزه زمینه تعیین شده است (میرزائی، ۱۹۹۷).

با تقسیم بزرگی از حداقل تا حداکثر به N بازه، اختلاف بزرگی در هر گام محاسباتی برابر $\Delta M = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{N}$ خواهد بود و از آن برای گام M ، اندازه بزرگی برابر $m_j = M_{\min} + \frac{2j-1}{2}\Delta M$ است. به همین ترتیب با شماره‌گذاری چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه از یک تا L می‌توان چشمه M را برای نوشتن روابط در نظر گرفت. در این صورت نرخ رویداد زمین‌لرزه برای بازه بزرگی M در ایالت لرزه‌زمن‌ساختی از رابطه ۲ و

همچنین نرخ رویداد زمین‌لرزه زمینه در بازه‌های بزرگی ۴/۲۵، ۴/۷۵، ۵/۲۵ و ۵/۷۵ برای ایالت البرز- آذربایجان به ترتیب مقادیر ۰/۷۴، ۰/۲۸، ۰/۱۱ و ۰/۰۴ به دست آمده است. برای ایالت ایران مرکزی - شرق ایران، در بازه‌های بزرگی ۴/۲۵، ۴/۷۵ و ۵/۲۵ به ترتیب مقادیر ۰/۱۷، ۰/۰۶ و ۰/۰۲ حاصل شده است. جدول ۵ مقادیر میانگین نرخ رویداد سالانه بازه بزرگی ۲۰ را برای چشمه بالقوه زمین‌لرزه در منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد.

همکاران (۱۹۹۲) برای رفع مشکلات موجود در روش مرسوم عرضه کردند. با استفاده از این مفهوم نرخ فعالیت زمین‌لرزه‌ای برای زمین‌لرزه‌های کوچک و بزرگ به‌خوبی تعیین و در محاسبات دخالت داده می‌شود. برای محاسبه تابع‌های توزیع فضایی در منطقه مورد بررسی، تابع‌های توزیع فضایی چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در منطقه مورد بررسی، از میان مقادیر تعیین شده برای ایران (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۷) مشخص و سپس نرمال شده‌اند (پیوست ۱).

جدول ۵. مقادیر میانگین نرخ رویداد سالانه بازه بزرگی ۱۳ (الف) برای چشمه بالقوه زمین‌لرزه در ایالت البرز - آذربایجان، (ب) برای ۷ چشمه بالقوه زمین‌لرزه در ایالت ایران مرکزی شرق ایران، واقع در منطقه مورد بررسی.

(الف)

m_j چشمه	$6 \leq m_j < 6.5$	$6.5 \leq m_j < 7$	$7 \leq m_j < 7.5$	$7.5 \leq m_j < 8$
1	0.0010	0.0005	0.0003	0.0006
2	0.0010	0.0004	0.0003	
3	0.0008			
4	0.0022	0.0011		
5	0.0016	0.0011		
6	0.0008	0.0011		
7	0.0007			
8	0.0016	0.0005	0.0004	
9	0.0010	0.0005	0.0003	
10	0.0016	0.0005	0.0005	
11	0.0010	0.0005	0.0005	0.0003
12	0.0022			
13	0.0010	0.0005	0.0002	

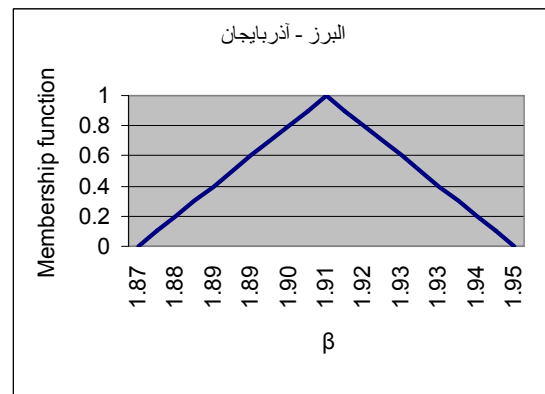
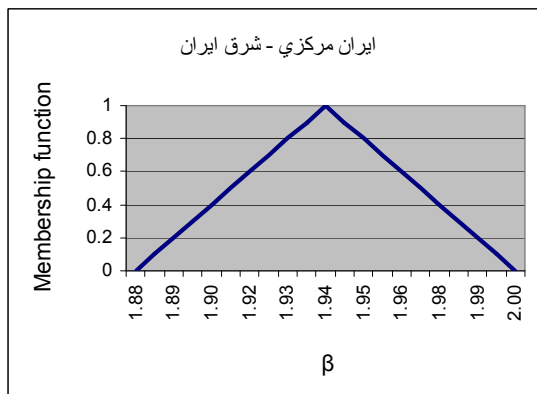
(ب)

m_j چشمه	$5.5 \leq m_j < 6$	$6 \leq m_j < 6.5$
14	0.0012	
15	0.0012	
16	0.0026	
17	0.0011	
18	0.0012	
19	0.0010	
20	0.0013	0.0037

$$N = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{\Delta M} \quad (5)$$

که در آن، N تعداد m_j ها است. جدول ۶ نمونه ای از مقادیر بازه های بزرگی را نشان می دهد. پس از به انجام رسیدن مراحل فوق، m_j به ازای همه بازه ها و برای همه چشمه ها، با در نظر گرفتن تابع عضویت مثلثی، به صورت فازی تعیین می شود. برای نمونه، شکل ۴ تابع های عضویت بازه های m_j را برای چشمه بالقوه زمین لرزه شماره ۱، (شکل ۲) نشان می دهد.

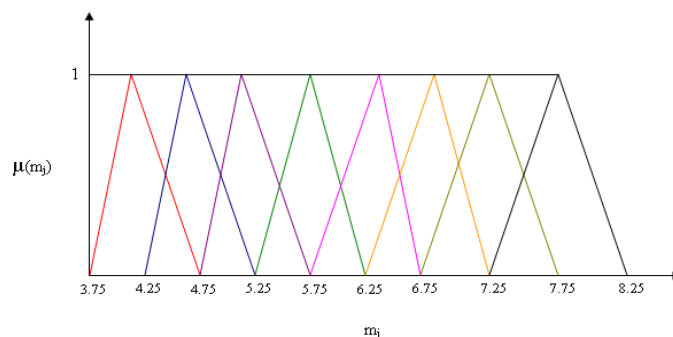
به منظور ادامه محاسبات، λ و β برای همه چشمه های واقع در منطقه و همه بازه های بزرگی با در نظر گرفتن بازه عدم قطعیت و تابع عضویت مثلثی به صورت فازی تعیین می شود. برای نمونه، شکل ۳ تابع عضویت β را برای ایالت لرزه زمین ساختی البرز- آذربایجان و ایالت لرزه زمین ساختی ایران مرکزی- شرق ایران نشان می دهد. پارامتر بزرگی نیز با استفاده از رابطه ۵ به بازه های متفاوت تقسیم شده است (گرین و هال، ۱۹۹۴):



شکل ۳. تابع عضویت β برای ایالت البرز - آذربایجان، و تابع عضویت β برای ایالت ایران مرکزی - شرق ایران.

جدول ۶. مقادیر بازه های پارامتر بزرگی به ازای $M_{\max} = 6$ ، $M_{\min} = 4$ و $\Delta M = 0.5$.

بازه های m_j	$4 \leq m_j < 4.5$	$4.5 \leq m_j < 5$	$5 \leq m_j < 5.5$	$5.5 \leq m_j < 6$
m_j	4.25	4.75	5.25	5.75



شکل ۴. تابع های عضویت بازه های m_j برای چشمه بالقوه زمین لرزه شماره ۱ (شکل ۲) در گستره مورد بررسی.

ابتدا، با در نظر گرفتن یک بازه خاص، به مثابه عدم قطعیت، برای پارامتر مورد نظر و ترسیم شکل تابع عضویت آن (در این تحقیق تابع عضویت به شکل مثلثی در نظر گرفته شده است)، بُرش α با خط افقی $\mu_A = \alpha$ به صورت زیر محاسبه شده است (کوره‌پزان دزفولی، ۱۳۸۴).

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_A - \mu_A(x_B) = \frac{\mu_A(x_C) - \mu_A(x_B)}{x_C - x_B} (x - x_B) \\ \Rightarrow x = \frac{(\alpha - \mu_A(x_B))(x_C - x_B)}{\mu_A(x_C) - \mu_A(x_B)} + x_B \\ \mu_A = \alpha \end{array} \right. \quad (6)$$

که در آن، μ_A معادله خط دارای شیب مثبت، x_B و $\mu_A(x_B)$ مختصات نقطه B و x_C و $\mu_A(x_C)$ مختصات نقطه C است (شکل ۵).

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_A - \mu_A(x_D) = \frac{\mu_A(x_C) - \mu_A(x_D)}{x_C - x_D} (x - x_D) \\ \Rightarrow x = \frac{(\alpha - \mu_A(x_D))(x_C - x_D)}{\mu_A(x_C) - \mu_A(x_D)} + x_D \\ \mu_A = \alpha \end{array} \right. \quad (7)$$

که در آن، μ_A معادله خط دارای شیب منفی، x_C و $\mu_A(x_C)$ مختصات نقطه C و x_D و $\mu_A(x_D)$ مختصات نقطه D است (شکل ۵).

از تلاقی معادله خطوط μ_A با خط $\mu_A = \alpha$ بُرش α به صورت زیر مشخص خواهد شد:

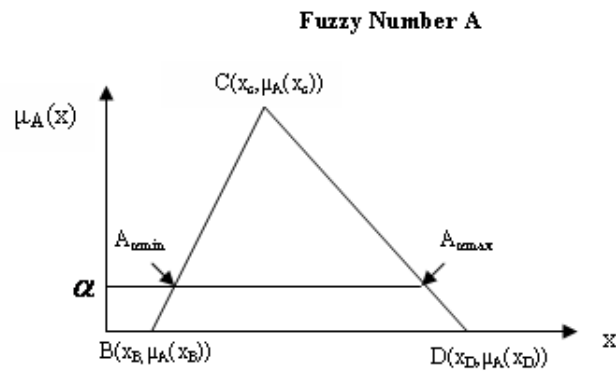
$$\begin{aligned} A_\alpha &= (A_{\alpha_{Min}}, A_{\alpha_{Max}}) \\ &= \left(\frac{(\alpha - \mu_A(x_B))(x_C - x_B)}{\mu_A(x_C) - \mu_A(x_B)}, \right. \\ &\quad \left. + x_B, \frac{(\alpha - \mu_A(x_D))(x_C - x_D)}{\mu_A(x_C) - \mu_A(x_D)} + x_D \right) \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن، A_α بُرش α است. شکل ۵ تابع عضویت مجموعه فازی A و مقادیر برش α را نشان می‌دهد.

بنابراین، با استفاده از مفهوم تابع عضویت برای مجموعه‌های فازی، همه پارامترهای اولیه مربوط به تحلیل خطر زمین‌لرزه، با در نظر گرفتن تابع عضویت مثلثی شکل، به صورت فازی تعیین شده‌اند. از جمله این پارامترها، می‌توان پارامترهای لرزه‌خیزی (β یا مقدار b ، λ و بیشینه زمین‌لرزه محتمل M_{max}) در هر ایالت لرزه‌زمین‌ساختی، بزرگی در بازه‌های متفاوت برای چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه و فاصله را نام برد. به منظور در نظر گرفتن چگونگی تضعیف پارامتر شتاب افقی ناشی از هندسه، خواص سازوکار گسلش، خواص مکانیکی مسیر عبور و مانند آن با استفاده از رابطه تضعیف آمبرسیز و همکاران (۲۰۰۵) که با توجه به دخالت داده‌های ایران و خاورمیانه در تعیین این رابطه برای استفاده در ایران مناسب است، برای شبکه‌ای از نقاط، در منطقه‌ای به مختصات $37^\circ N - 34^\circ$ و $54^\circ E - 49/5^\circ$ شامل تهران و نواحی پیرامون، مقادیر شتاب افقی موردانتظار از رویداد زمین‌لرزه در چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه محاسبه می‌شود. بدین منظور ابتدا d ، فاصله ساختگاه از مراکز همه سلول‌ها (شکل ۲)، برحسب کیلومتر تعیین می‌شود. برای نمونه برای تعدادی از سلول‌ها مقادیر d در جدول ۷ نشان داده شده است. سپس، عدم قطعیتی براساس میزان قابلیت اعتماد به چشمه، برای آن در نظر گرفته شده و براساس آن به صورت فازی تعیین می‌شود. به علاوه برش‌های α ، برای پارامترهای فاصله (d) و بزرگی (m_j) محاسبه شده که در نتیجه به‌ازای هر بُرش α دو مقدار برای هر یک از پارامترهای پیش‌گفته به‌دست خواهد آمد.

۳ بُرش α

روش‌های متعددی برای عملی ساختن محاسبات فازی و یا به عبارت دیگر استفاده از مقادیر فازی در روابط و در نتیجه استخراج خروجی به شکل فازی وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش بُرش α اشاره کرد.



شکل ۵. تابع عضویت مجموعه فازی A (کوره پزان دزفولی، ۱۳۸۴).

جدول ۷. فاصله مراکز سلول‌ها از تهران (پارامتر d).

فاصله از ساختمان (Km)	مختصات جغرافیایی سلول‌ها		فاصله از ساختمان (Km)	مختصات جغرافیایی سلول‌ها		فاصله از ساختمان (Km)	مختصات جغرافیایی سلول‌ها	
	N	E		N	E		N	E
	204.222	36.95		52.55	139.745		36.95	51.05
196.849	36.85	52.55	128.731	36.85	51.05	223.245	36.85	49.55
189.839	36.75	52.55	117.733	36.75	51.05	217.089	36.75	49.55
183.234	36.65	52.55	106.756	36.65	51.05	211.338	36.65	49.55
177.079	36.55	52.55	95.808	36.55	51.05	206.024	36.55	49.55
171.422	36.45	52.55	84.899	36.45	51.05	201.183	36.45	49.55
166.315	36.35	52.55	74.046	36.35	51.05	196.849	36.35	49.55
161.809	36.25	52.55	63.280	36.25	51.05	193.057	36.25	49.55
157.956	36.15	52.55	52.652	36.15	51.05	189.839	36.15	49.55
154.804	36.05	52.55	42.268	36.05	51.05	187.225	36.05	49.55

دیگر برابر صفر است. F_N معرف گسلش نرمال و مقدار آن برای این نوع گسل برابر واحد و برای گسل‌های دیگر برابر صفر است، F_T معرف گسلش تراستی و مقدار آن برای این نوع گسل برابر واحد و برای گسل‌های دیگر برابر صفر است و F_O معرف گسلش ترکیبی و مقدار آن برای این نوع گسل برابر واحد و برای گسل‌های دیگر برابر صفر است.

جدول ۸ مقادیر فازی بیشینه شتاب افقی جنبش زمین (PGA) را به‌ازای اولین بُرش α و اولین بازه m_j برای تعدادی از سلول‌های منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد. در جدول ۸، $PGA1$ تا $PGA4$ مقادیر فازی بیشینه شتاب افقی جنبش زمین را به‌ازای ترکیبات متفاوت مقادیر m_j و d در رابطه تضعیف نشان می‌دهد. مقادیر حاصل از بُرش α برای m_j و d عبارت‌اند از:

$$d: (d_{\alpha \min}, d_{\alpha \max})$$

$$m_j: (m_{j \alpha \min}, m_{j \alpha \max})$$

که $PGA1$ از ترکیب $d_{\alpha \max}$ و $m_{j \alpha \max}$ ، $PGA2$ از ترکیب $d_{\alpha \max}$ و $m_{j \alpha \min}$ ، $PGA3$ از ترکیب $d_{\alpha \min}$ و $m_{j \alpha \max}$ و $PGA4$ از ترکیب $d_{\alpha \min}$ و $m_{j \alpha \min}$ به‌دست می‌آید که کمترین و بیشترین آن در حکم مختصات بُرش α برای PGA در نظر گرفته می‌شود.

در هر مرحله به‌ازای $\alpha = 0.1$ تا $\alpha = 1$ همه بُرش‌های α برای پارامتر موردنظر محاسبه می‌شود. با قرار دادن ترکیبات متفاوت مقادیر m_j و d در رابطه تضعیف (آمبرسیز و همکاران، ۲۰۰۵) به‌ازای هر بُرش α ، چهار مقدار برای PGA به‌دست می‌آید که کمترین و بیشترین آن در حکم مختصات بُرش α برای PGA در نظر گرفته و به‌این ترتیب بیشینه شتاب افقی موردانتظار از رویداد زمین‌لرزه در چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه به صورت فازی برآورد می‌شود:

Log y

$$= (a_1 + a_2 M_w + (a_3 + a_4 M_w) \text{Log}(d^2 + a_5^2))^{0.5} \quad (9)$$

$$+ a_6 S_s + a_7 S_A + a_8 F_N + a_9 F_T + a_{10} F_O$$

که در آن، γ بیشینه شتاب افقی جنبش زمین، -0.665 $\sigma = 0.065 M_w$ انحراف معیار بوده و ضرایب a_1 تا a_{10} برابرند با: (آمبرسیز و همکاران، ۲۰۰۵):

$$a_1 = 2.522; \quad a_2 = -0.142; \quad a_3 = -3.184;$$

$$a_4 = 0.314; \quad a_5 = 7.6; \quad a_6 = 0.137; \quad a_7 = 0.050;$$

$$a_8 = -0.084; \quad a_9 = 0.062; \quad a_{10} = -0.044;$$

S_s معرف خاک نرم و برای خاک نرم برابر واحد و برای خاک‌های دیگر برابر صفر است و S_A معرف خاک سخت و برای خاک سخت برابر واحد و برای خاک‌های

جدول ۸. مقادیر فازی بیشینه شتاب افقی جنبش زمین (PGA) به‌ازای اولین بُرش α و اولین m_j برای ۱۰ سلول از سلول‌های منطقه مورد بررسی (N شماره سلول‌ها را نشان می‌دهد).

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$PGA1$	0.412	0.379	0.490	0.225	0.131	0.093	0.072	0.06	0.051	0.045
$PGA2$	0.210	0.190	0.258	0.102	0.054	0.036	0.026	0.021	0.017	0.015
$PGA3$	0.412	0.191	0.079	0.064	0.054	0.047	0.042	0.038	0.034	0.032
$PGA4$	0.210	0.084	0.029	0.023	0.019	0.016	0.014	0.012	0.011	0.010

$$\lambda_{a^*} = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{m_j} \sum_{k=1}^{r_k} v_i P[PGA > a^* | m, r] f(M) \quad (13)$$

$$= \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{m_j} \sum_{k=1}^{r_k} \Delta M \cdot f(R) \cdot \Delta R$$

که در آن، a^* برحسب g ، مقدار خاص برای PGA ، λ_{a^*} فراوانی شتاب‌های بیش از a^* و v_i فراوانی متوسط سالانه زمین‌لرزه‌های با بزرگی بیشتر یا مساوی بزرگی آستانه (λ_4 محاسبه شده در جدول ۵) است.

کمیت پیش‌گفته برای همه نقاطی که به فاصله ۰/۱ درجه طول و عرض جغرافیایی در منطقه مورد بررسی واقع شده‌اند، به صورت فازی محاسبه شده است. از آنجاکه در بسیاری از کاربردهای منطق فازی در مسائل مهندسی، اغلب تصمیماتی که انسان‌ها یا ماشین‌ها (مثلاً رایانه‌ها) می‌گیرند، به صورت صفر و یک است، لازم است نتایج حاصل از تحلیل‌های فازی را به عددهای کلاسیک (معمولی) تبدیل کنیم (کوره‌پزان دزفولی، ۱۳۸۴). پس از غیرفازی کردن پارامتر λ_{a^*} ، با استفاده از روش مرکز سطح، که رایج‌ترین روش تبدیل کمیت فازی به کمیت کلاسیک است (کوره‌پزان دزفولی، ۱۳۸۴)، برای ۱۰٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ سال) و ۶۳٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۵۰ سال)، که نمونه‌وار برای تعدادی از سلول‌ها در جدول ۹ نشان داده شده است، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در گستره تهران تهیه و ترسیم شده است (شکل‌های ۶ و ۷). روش مرکز سطح برای پارامتر λ_{a^*} به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\lambda_{a^*}^* = \frac{\int \mu_c(\lambda_{a^*}) \cdot \lambda_{a^*} d\lambda_{a^*}}{\int \mu_c(\lambda_{a^*}) d\lambda_{a^*}} \quad (14)$$

که در آن $\lambda_{a^*}^*$ عدد قاطع یا کلاسیک برای عدد فازی λ_{a^*} و $\mu_c(\lambda_{a^*})$ تابع عضویت است. نقشه‌های عرضه شده در شکل‌های ۶ و ۷، برای محدوده مشخص شده با دایره اعتبار دارد.

با استفاده از مقادیر به‌دست آمده از رابطه ۹ و ترکیب حالت‌های متفاوت پارامترها، به‌ازای هر بُرش α و همچنین، به‌کاربردن رابطه (۱۰) (کرامر، ۱۹۹۶)، احتمال افزایش شتاب‌های بیش از یک مقدار خاص (a^*)، به‌صورت فازی محاسبه می‌شود.

$$P(PGA > a^*) = 1 - \Phi\left(\frac{\text{Log}(a^*) - \text{Log}(PGA)}{\sigma}\right) \quad (10)$$

که در آن، Φ تابع توزیع احتمالاتی نرمال تجمعی و σ انحراف معیار آن است.

برای محاسبه تابع چگالی احتمال فاصله، تعداد سلول‌های موجود در داخل هر چشمه (N) محاسبه، و از رابطه ۱۱ (گرین و هال، ۱۹۹۴) تابع چگالی احتمال فاصله برای هر چشمه محاسبه می‌شود:

$$f(R) \Delta R = 1/N \quad (11)$$

که در آن، ΔR بازه فاصله است.

برای محاسبه تابع چگالی احتمال بزرگی، ابتدا با استفاده از رابطه ۸، بُرش‌های α برای β محاسبه شده است. سپس، با به‌کارگیری ترکیب‌های متفاوت β و m_j ، به‌ازای هر بُرش α در رابطه (۱۲) (کرامر، ۱۹۹۶)، مقادیر فازی تابع چگالی احتمال بزرگی حاصل شده است:

$$f(m) = \frac{\beta \exp[-\beta (m - M_{min})]}{1 - \exp[-\beta (M_{max} - M_{min})]} \quad (12)$$

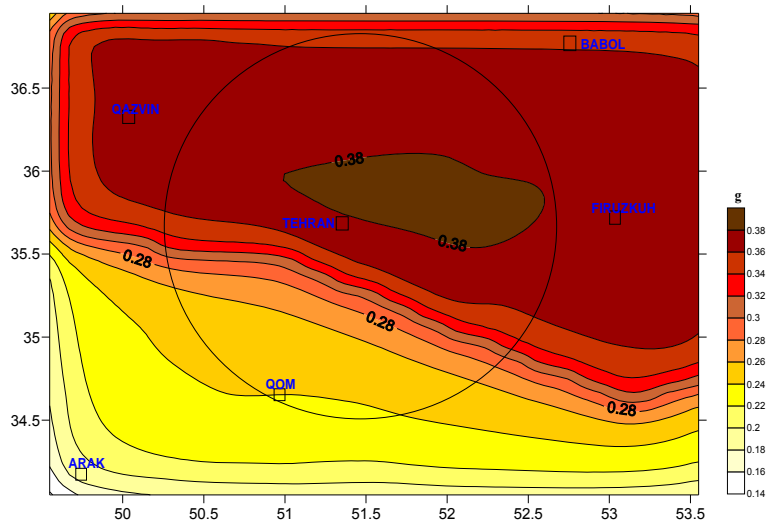
$$M_{min} \leq m \leq M_{max}$$

که در آن، M_{min} بزرگی آستانه و M_{max} بیشینه زمین‌لرزه ممکن است.

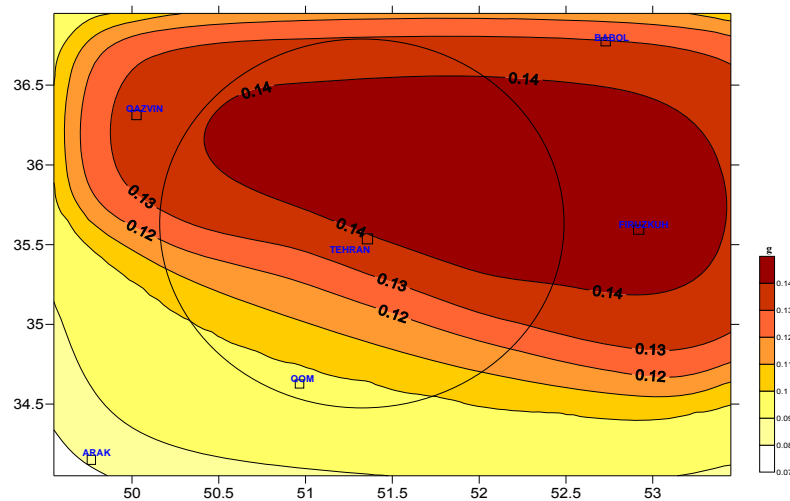
با جایگزینی ترکیبات متفاوت مقادیر به‌دست آمده از روابط (۱۰) تا (۱۲) در رابطه (۱۳)، (کرامر، ۱۹۹۶)، و انتخاب بیشترین و کمترین مقدار در هر بُرش α و به‌ازای مقادیر متفاوت a^* ، فراوانی شتاب‌های بیش از یک مقدار خاص به صورت فازی به‌دست می‌آید:

جدول ۹. مقادیر شتاب افقی برای ۱۰٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ سال) و ۶۳٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۵۰ سال) برای تعدادی از سلول‌ها (ساختمانگاه تهران).

مختصات جغرافیایی سلول‌ها		مقادیر شتاب افقی برای ۱۰٪ احتمال افزایش	مقادیر شتاب افقی برای ۶۳٪ احتمال افزایش	مختصات جغرافیایی سلول‌ها		مقادیر شتاب افقی برای ۱۰٪ احتمال افزایش	مقادیر شتاب افقی برای ۶۳٪ احتمال افزایش	مختصات جغرافیایی سلول‌ها		مقادیر شتاب افقی برای ۱۰٪ احتمال افزایش	مقادیر شتاب افقی برای ۶۳٪ احتمال افزایش
E	N			E	N			E	N		
49.55	36.95	0.24	0.09	51.05	36.95	0.30	0.11	52.55	36.95	0.30	0.11
49.55	36.85	0.27	0.09	51.05	36.85	0.34	0.12	52.55	36.85	0.34	0.12
49.55	36.75	0.28	0.09	51.05	36.75	0.35	0.13	52.55	36.75	0.35	0.13
49.55	36.65	0.29	0.09	51.05	36.65	0.36	0.13	52.55	36.65	0.36	0.13
49.55	36.55	0.29	0.09	51.05	36.55	0.37	0.13	52.55	36.55	0.37	0.13
49.55	36.45	0.29	0.09	51.05	36.45	0.37	0.14	52.55	36.45	0.37	0.14
49.55	36.35	0.29	0.10	51.05	36.35	0.37	0.14	52.55	36.35	0.37	0.14
49.55	36.25	0.29	0.10	51.05	36.25	0.37	0.14	52.55	36.25	0.37	0.14
49.55	36.15	0.29	0.10	51.05	36.15	0.37	0.14	52.55	36.15	0.37	0.14
49.55	36.05	0.29	0.10	51.05	36.05	0.33	0.14	52.55	36.05	0.37	0.14
49.55	35.95	0.29	0.09	51.05	35.95	0.38	0.14	52.55	35.95	0.37	0.14



شکل ۶. نقشه پهنه‌بندی زمین‌لرزه‌ای گستره تهران و نواحی مجاور به روش احتمالاتی - فازی برای ۱۰٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ سال).



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی زمین‌لرزه‌ای گستره تهران و نواحی مجاور به روش احتمالاتی - فازی برای ۶۳٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۵۰ سال).

زمین‌لرزه محاسبه شده و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه برای ۱۰٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ سال)، و ۶۳٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۵۰ سال)، در گستره تهران تهیه و عرضه شده است. با توجه به نقشه‌های پیش‌گفته، شهر تهران در پهنه‌ای با شتاب جنبش زمین معادل $0.38g$ - $0.35g$ برای ۱۰٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال، و $0.15g$ - $0.12g$ برای ۶۳٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال قرار دارد. از آنجا که منطق فازی را می‌توان به خوبی برای مدل‌سازی دو نوع اصلی عدم قطعیت یعنی عدم قطعیت ناشی از ضعف دانش و ابزار بشری و عدم قطعیت مربوط به نبود صراحت و فقدان شفافیت مربوط به یک پدیده یا ویژگی خاص در پدیده‌های موجود در جهان به کاربرد و از آنجا که ارزیابی خطر زمین‌لرزه، مانند بسیاری از موضوعات زلزله‌شناسی، به دلیل تنوع عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لرزه‌ها، یکی از پیچیده‌ترین مسائل است و عدم قطعیت‌های بسیاری دارد، استفاده از مجموعه‌های فازی در این محث راه نوینی است که این امکان را فراهم می‌نماید که بتوان این عدم قطعیت‌ها را در مسئله لحاظ کرد. همچنین در مجموعه‌های فازی نظر شخص خبره مستقیماً بر تعریف مجموعه فازی

مقایسه نتایج حاصل از این روش با روش احتمالاتی صورت پذیرفته در تحقیقات قبلی، از نظر بازه بیشینه شتاب تقریباً تطابق خوبی را نشان می‌دهد ولی تکمیل‌تر شدن بانک داده‌ها تا حال حاضر، دوره بازگشت‌های متفاوت، اختلاف روابط تضعیف، اختلاف محدوده در نظر گرفته شده در تعیین چشمه‌های لرزه‌ای و در نهایت استفاده از مجموعه‌های فازی در تحلیل خطر احتمالاتی موجب اختلاف از نظر مکان و روند افزایشی بیشینه شتاب در نقشه‌های نهایی این تحقیق در مقایسه با تحقیقات قبلی شده است.

۴ نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از روش احتمالاتی و به کارگیری مجموعه‌های فازی، پارامترهای موجود در محاسبات تحلیل احتمالاتی خطر زمین‌لرزه، با استفاده از یک برنامه رایانه‌ای و به کارگیری روش بُرش α به صورت فازی محاسبه شد. در نهایت برای شبکه‌ای از نقاط، در منطقه‌ای به مختصات $37^{\circ}N$ - 34° و $54^{\circ}E$ شامل تهران و نواحی پیرامون، مقادیر شتاب افقی مورد انتظار از رویداد زمین‌لرزه در چشمه‌های بالقوه

- Chen, D., Dong, W., and Shah, H. C., 1988, Earthquake recurrence relationships from fuzzy earthquake magnitudes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **7**, 136-142.
- Chongfu, H., 1996, Fuzzy risk assessment of urban natural hazards, *Fuzzy Sets and Systems*, **83**, 271-282.
- Cornell, C. A., 1968, Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **58**, 1583-1606.
- Deyi, F. and Ichikawa, M., 1989, Quantitative estimation of time-variable earthquake hazard by using fuzzy set theory, *Tectonophysics*, **169**, 175-196.
- Dong, W. M., and Shah, H. C., 1986, Vertex method for computing functions of fuzzy variables, *J. Fuzzy Sets and Systems*, **24**, 65-78.
- Frangopol, M., Ikejima, K., and Hong, K., 1988, Seismic hazard prediction using a probabilistic-fuzzy approach, *Structural Safety*, **5**, 109-117.
- Gao, M., 1988, Discussion on annual occurrence rates, *Developments in World Seismology*, **1**, 1-5 (in Chinese).
- Ghodrati Amiri, G., Motammed, R., and Rabet Eshaghi, H., 2003, Seismic hazard assessment of metropolitan Tehran, Iran, *J. Earthquake Engineering*, **7**, 347-372.
- Green, A., and Hall, J., 1994, An overview of selected seismic hazard analysis methodologies, *Civil engineering studies, Structural Research Series*, **592**.
- Gutenberg, B., and Richter, C. F., 1954, *Seismicity of the earth*. 2nd ed., Princeton University Press, Princeton, New Jersey, **310**.
- Karimi, I., and Hullermeier, E., 2007, Risk assessment system of natural hazards: a new approach based on fuzzy probability, *Fuzzy Sets and Systems*, **158**, 987-999.
- Kijko, A., and Sellevoll, M. A., 1992, Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, Part II, incorporation of magnitude heterogeneity, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 120-134.
- Mirzaei, N., Gao, M., and Chen, Y. T., 1997, Seismicity in major seismotectonic provinces of Iran, *Earthquake Research in China*, **11**, 351-361.
- Mirzaei, N., 1997, Seismic zoning of Iran, Ph.D. dissertation, Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Beijing, **139**.
- Mirzaei, N., Gao, M., and Chen, Y. T., 1998, Seismic source regionalization for seismic تأثیرگذار است درحالی که در نظریه احتمال به صورت خودکار تابع چگالی احتمال بر داده‌ها برازش داده می‌شود و این امکان وجود دارد که تابع چگالی احتمال به دست آمده معرف عدم قطعیت‌ها به صورت دقیق نباشد.
- منابع**
- بربریان، م.، قریشی، م.، ارزنگ‌روش، ب.، و مهاجرشجاعی، ا.، ۱۳۶۴، پژوهش و بررسی ژرف نوزمین‌ساخت، لرزه‌زمین‌ساخت و خطر زمین‌لرزه-گسلش در گستره تهران و پیرامون، سازمان زمین‌شناسی کشور، گزارش ۵۶، بخش دهم.
- زارع، م.، ۱۳۸۴، تحلیل خطر زمین‌لرزه در چهارگوش تهران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- کرامر، ا.، ۱۹۹۶، مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای، (ترجمه مجدالدین میر محمد حسینی و بابک عارف پور)، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- کوره‌پزان دزفولی، ا.، ۱۳۸۴، اصول تئوری مجموعه‌های فازی و کاربردهای آن در مدل‌سازی مسائل مهندسی آب، انتشارات جهاد دانشگاهی امیرکبیر.
- میرزائی، ن.، قیطانچی، م.، ناصریه، س.، رئیس، م.، ظریفی، ز. و طبائی، ق.، ۱۳۸۱، پارامترهای مبنایی زمین‌لرزه‌های ایران، انتشارات دانش‌نگار.
- میرزائی، ن.، ۱۳۸۵، برآورد خطر و پهنه‌بندی زمین‌لرزه‌ای گستره تهران، نشر تدبیر.
- Ambraseys, N. N., Douglas, J., Sarma, S. K. and 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, *Earthquake Engineering*, **3**, 1-53.
- Anoop, M., Balaji, B., Rao, K., and Gopalakrishnan, S., 2006, Conversion of probabilistic information into fuzzy sets for engineering decision analysis, *Computers & Structures*, **84**, 141-155.

پیوست

پیوست ۱. تابع توزیع فضایی، (الف) ۱۳ چشمه بالقوه زمین لرزه واقع در ایالت لرزه زمین ساختی البرز - آذربایجان، (ب) ۷ چشمه بالقوه زمین لرزه واقع در ایالت لرزه زمین ساختی ایران مرکزی - شرق ایران واقع در منطقه مورد بررسی.

zoning of Iran: major seismotectonic provinces, J. Earthq. Pred. Res., 7, 465-495.

Mirzaei, N., Gheitanchi, M. R., Naserieh, S., Raeesi, M., Zarifi, Z., and Tabaei, S. G., 2002, Basic parameters of earthquakes in Iran. Danesh Negar publ., Tehran.

Shi, Z., Yan, J., and Gao, M., 1992, Research on the principle and methodology of seismic zonation- results of the trial in North China, Acta Seismol. Sinica, 5, 305-314.

Vojoudi, M., Zare, M. and Nourzad, A., 2007, Fuzzy engine model for earthquake hazard analysis, 2nd International Conference on Integrated Natural Disaster Management, Tehran, Iran.

(الف)

چشمه \ m_j	$6 \leq m_j \leq 6.5$	$6.5 \leq m_j \leq 7$	$7 \leq m_j \leq 7.5$	$7.5 \leq m_j \leq 8$
1	0.058581	0.072162	0.104694	0.649511
2	0.058581	0.057495	0.130867	
3	0.050743			
4	0.137789	0.169845		
5	0.098185	0.169845		
6	0.04703	0.169845		
7	0.042904			
8	0.098185	0.072162	0.158771	
9	0.058581	0.072162	0.104694	
10	0.098185	0.072162	0.212849	
11	0.058581	0.072162	0.207874	0.350489
12	0.134076			
13	0.058581	0.072162	0.080251	

(ب)

چشمه \ m_j	$6 \leq m_j \leq 6.5$	$6.5 \leq m_j \leq 7$
14	0.125974	
15	0.125974	
16	0.266234	
17	0.116883	
18	0.125974	
19	0.103896	
20	0.135065	1