

برآورد تعیینی خطر لرزه‌ای شهر بردسیر در استان کرمان با استفاده از سیستم فازی

محدثه غفاری: دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران
فتانه تقی‌زاده فرهمند*: دانشیار، گروه فیزیک، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران f.farahmand@qom-iau.ac.ir
طیب جمالی: پژوهشگر و محقق پسادکتری، گروه فیزیک، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۵/۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۲۵

چکیده

هدف از تحلیل خطر زمین‌لرزه، پیش‌بینی میزان دامنه‌ی جنبش‌های قوی زمین در یک ساختگاه مشخص است و تحلیل خطر لرزه‌ای برای کاهش مخاطرات زمین‌لرزه در نواحی لرزه‌خیز الزامی است. برآورد خطر لرزه‌ای مانند دیگر تحقیقات زلزله‌شناسی با عدم قطعیت‌ها همراه است که از منطق فازی، بنا شده بر اساس عدم قطعیت، می‌توان استفاده کرد. گستره‌ی جغرافیایی مورد مطالعه چارچوب استان کرمان در محدوده‌ی ۲۶/۵ تا ۳۲ درجه‌ی عرض شمالی و ۵۴/۵ تا ۵۹/۵ درجه‌ی طول شرقی است که یکی از مناطق لرزه‌خیز است که از گذشته تا کنون زمین‌لرزه‌های مخربی را تجربه کرده است. در این مطالعه شهر بردسیر به عنوان ساختگاه انتخاب شد. از ۲۷ چشمه‌ی بالقوه‌ی زمین‌لرزه در گستره‌ی مورد مطالعه استفاده شده است. در این پژوهش برآورد خطر لرزه‌ای ابتدا به صورت تعیینی مرسوم صورت گرفت و سپس برآورد خطر لرزه‌ای تعیینی با استفاده از منطق فازی انجام شد. با توجه به نتایج به دست آمده به روش تعیینی مرسوم، تغییرات بیشینه شتاب افقی بین $0.07g$ تا $0.41g$ است درحالی‌که نتایج حاصل از برآورد خطر لرزه‌ای تعیینی با استفاده از منطق فازی نشان دادند که تغییرات بیشینه شتاب افقی بین $0.1g$ تا $0.54g$ است. مقایسه‌ی دو روش به کار گرفته شده نشان داد که بیشینه شتاب افقی حاصل از برآورد خطر تعیینی $0.54g$ است که حاصل از چشمه‌ی شماره‌ی ۱۴ با بزرگای $7/0$ با سازوکار گسلش معکوس در فاصله‌ی $28/5$ کیلومتری از ساختگاه (شهر بردسیر) است. نتایج نشان می‌دهد که در بیشتر مناطق استان سطح نسبی خطر زلزله بیش از $0.30g$ است.

واژه‌های کلیدی: خطر لرزه‌ای، برآورد تعیینی، سیستم فازی، کرمان

Evaluation of Deterministic seismic hazard in Bardsir city in Kerman province by using fuzzy system

Mohadeseh Ghafari¹, Fataneh Taghizadeh-Farahmand²*, Tayeb Jamali³

Abstract

The Iranian plateau is part of the Alpine-Himalayan orogenic belt. The region in this study includes the area located between 54.5° - 59.5° longitude and 26.5° - 32° latitude. This region is among the seismologically active regions in the Middle-East, and has experienced many destructive earthquakes. Seismic hazard assessment like many other issues in seismology is a complicated problem, which is due to the variety of parameters affecting the occurrence of an earthquake. Uncertainty, which is a result of vagueness and incompleteness of the data, should be considered in a rational way. The fuzzy method in this study makes it possible to allow uncertainties to be considered in this study. In this study, using fuzzy inference system, as the practice is based on uncertainty estimation of seismic hazard for the Bardsir region in Kerman province, is done. Using the results of the seismic hazard assessment to improve building design and construction is an effective way to reduce the seismic risk. Peak ground Acceleration values estimated to be for conventional deterministic method $0.41g$ and $0.54g$ application fuzzy logic system in the deterministic method, respectively.

Keywords: Seismic hazard, Deterministic, Fuzzy System, Kerman

1. MSc. Student of Geophysics, Department of Physics, Qom Branch, Islamic Azad University, Qom, Iran

2. Associate Professor, Department of Physics, Qom Branch, Islamic Azad University, Qom, Iran, f.farahmand@Qom-iau.ac.ir

3. PostDoctoral Associate, School of Physics, Institute for Research in Fundamental Sciences (IPM), Tehran, Iran

مقدمه

بشر در طول زمان با بلایای طبیعی متعددی مواجه بوده است که پدیده‌ی زلزله یکی از زیان‌بارترین آن‌ها است و ماهیتی بسیار پیچیده دارد. یکی از راه‌های مقابله با تکان‌های زمین ناشی از رخداد زمین‌لرزه‌ها مقاوم‌سازی ساختمان‌ها متناسب با نتایج حاصل از برآورد خطر لرزه‌ای در هر منطقه است. تحلیل‌های انجام شده بر زمین‌لرزه‌ها با پارامترهای مختلفی انجام می‌شود که اغلب شناخت کاملی نسبت به آن‌ها وجود ندارد و همراه با عدم قطعیت‌های زیادی هستند. در برآورد خطر لرزه‌ای نیز با عدم قطعیت پارامترهای لرزه‌خیزی مواجه هستیم، لذا ابزار منطق فازی به عنوان تحلیل ریاضیاتی که براساس عدم قطعیت بنا شده می‌تواند بسیاری از مشکلات پیش‌رو را کاهش دهد [۱]. در این مطالعه با استفاده از سیستم‌های فازی روشی را ارائه می‌کنیم به طوری که بتوان پارامترهای لرزه‌خیزی را در برآورد خطر لرزه‌ای با قطعیت بهتری مورد استفاده قرار داد. منطق فازی را می‌توان برای مدل‌سازی عدم قطعیت ناشی از ضعف دانش و ابزار بشری و یا نبود صراحت و فقدان شفافیت مربوط به یک پدیده استفاده نمود. استفاده از منطق فازی در برآورد خطر زمین‌لرزه این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان عدم قطعیت‌ها را در مسئله لحاظ کرد [۲]. روش سیستم فازی در موضوعات مختلف زلزله‌شناسی استفاده می‌شود. از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از سیستم فازی برای طبقه‌بندی خسارات ناشی از زلزله [۳]، ارائه‌ی روشی برای محاسبه‌ی خطرپذیری فازی زلزله برای ارزیابی شدت در ساختگاه و تلفات شهری [۴]، مدل استنتاج فازی برای برآورد خطر زلزله [۵]، استفاده از منطق فازی روی بزرگای زمین‌لرزه برای تعیین رابطه‌ی بازگشت زمین‌لرزه [۶] و پیش‌بینی خطر زمین‌لرزه [۷] اشاره نمود. همچنین اخیراً مطالعاتی در خصوص ارائه‌ی یک مدل برآورد خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی بر مبنای تئوری مجموعه‌های فازی [۸]، بهبود کنترل ارتعاشات لرزه‌ای بناهای کوچک [۹] و طبقه‌بندی خسارات لرزه‌ای در ساختمان‌ها [۱۰] انجام شده است. کشور ایران که بر روی کمر بند لرزه‌خیز آلپ-همیالیا واقع شده است، یکی از مناطق زلزله‌خیز جهان به شمار می‌رود که به کرات متحمل خسارات جانی و مالی جبران‌ناپذیر زمین‌لرزه شده است. در چنین شرایطی است که انجام تحقیقات وسیع علمی و پژوهشی بر روی زلزله در نواحی مختلف کشور اهمیت فراوانی می‌یابد. استان کرمان یکی از پهناورترین استان‌های کشور است که خطر زلزله در آن به دلیل وجود گسل‌های متعدد مسبب زمین‌لرزه بالا است و خاطره‌ی تلخ زمین‌لرزه‌ی سال ۱۳۸۲ در شهر بم که موجب نابودی بنای تاریخی عظیم ارگ بم شد (بیش از ۲۵۰۰۰ نفر کشته و حدود ۵۰ هزار نفر مجروح و صدها هزار نفر بی‌خانمان، به نقل از <http://www.iiies.ac.ir>) هنوز در یادها زنده است، لذا برآورد خطر لرزه‌ای در مناطق مختلف این استان به روش‌های متعدد مفید خواهد بود. هدف از این پژوهش ارزیابی تعیین خطر لرزه‌ای در شهر بردسیر با استفاده از سیستم استنتاج فازی است. محاسبات احتمالاتی در این روش وجود نداشته و با توجه به قابل درک بودن آن توسط کاربران مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش با

به کارگیری سیستم استنتاج فازی و به کمک نرم‌افزار متلب برآورد خطر لرزه‌ای به صورت تعیینی انجام می‌گیرد. سیستم استنتاج فازی در این مطالعه دارای پارامترهای ورودی بزرگای زمین‌لرزه، فاصله‌ی چشمه از ساختگاه و نوع گسل است و پارامتر خروجی آن بیشینه شتاب افقی زمین (Peak Ground Acceleration, PGA) است. نتیجه‌ی مطالعه‌ی انجام شده تعیین بیشینه شتاب افقی زمین (PGA) ناشی از رخداد حادثه‌ای با بزرگی بیشینه در اثر جنبش گسلی در فاصله‌ای از ساختگاه است.

لرزه‌زمین ساخت منطقه‌ی کرمان

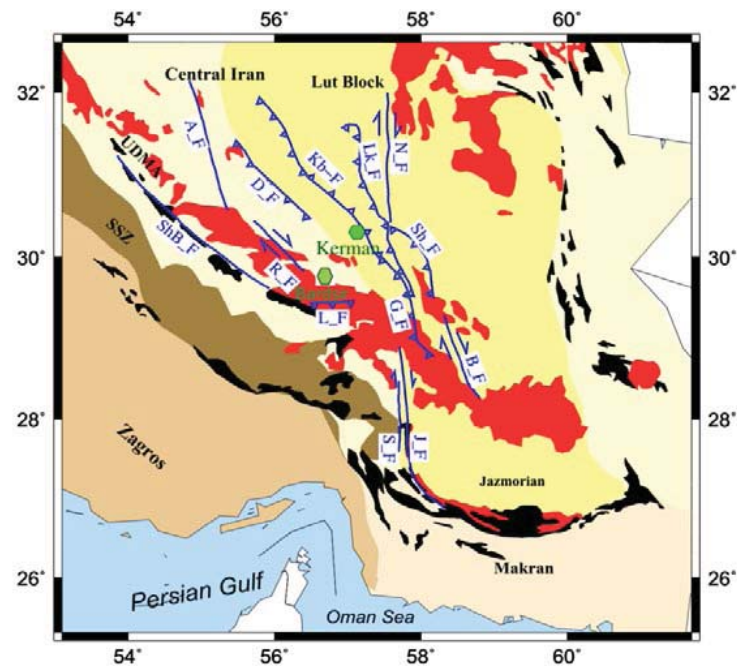
گستره‌ی مورد مطالعه در مختصات جغرافیایی ۲۶/۵ تا ۳۲ درجه‌ی عرض شمالی و ۵۴/۵ تا ۵۹/۵ درجه طول شرقی قرار گرفته است (تصویر ۱). از دیدگاه تقسیم‌بندی ایالت لرزه‌زمین‌ساختی در ایران [۱۱] بخش اعظم استان کرمان در ایران مرکزی و بخش جنوبی در شمال ایالت مکران و جنوب غرب استان، بخشی از ایالت زاگرس به حساب می‌آید.

گسل‌های متعددی در استان کرمان واقع است که مسبب زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی متعدد بوده‌اند. طبق مطالعات و تقسیم‌بندی‌های آقائباتی [۱۲]، روندهای ساختاری کنونی این منطقه را گسل‌های آن مشخص می‌نماید. گسل‌های ناحیه‌ی کرمان، بیشتر دارای روندی شمال غربی- جنوب شرقی و تا حدی شمالی- جنوبی است و گسل‌های طولی را تشکیل می‌دهد که در نهایت به سمت غرب خمیدگی دارد. حرکت این گسل‌ها از نوع امتداد لغز راستگرد و معکوس است که در تصویر ۱ نقشه‌ی گسل‌های مهم منطقه نشان داده شده است. استان کرمان عموماً منطقه‌ای لرزه‌خیز است و در طول تاریخ بارها زمین‌لرزه‌های شدید و مخرب را تجربه نموده است.

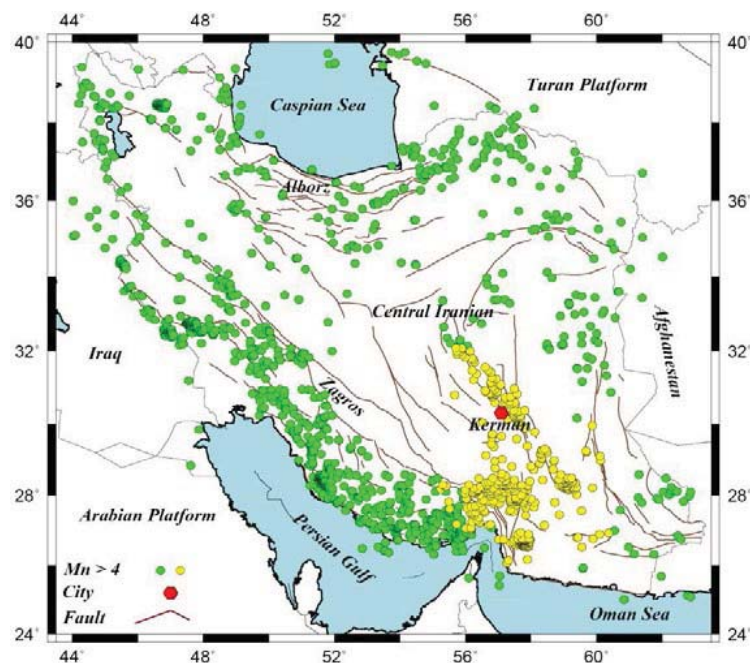
در تصویر ۲ لرزه‌خیزی منطقه‌ی کرمان برای زلزله‌های بزرگای بیش از ۴ در مقیاس ناتلی توسط دوایر تو پر زرد رنگ در مقایسه با دیگر مناطق ایران که با دوایر تو پر سبز رنگ نشان داده شده است، قابل ملاحظه است. از جمله زلزله‌های مهم استان کرمان می‌توان به زمین‌لرزه‌ی ۲۸ دی ۱۲۴۲ قمری (۱۷/۱/۱۸۶۴ میلادی) با بزرگای $M_s=6$ ، زمین‌لرزه‌ی سال ۱۹۱۱ میلادی در راور با بزرگای $M_s=6/2$ ، زلزله‌ی ۶ مرداد ۱۳۶۰ سیرچ با بزرگای ۷/۱ ریشتر و زمین‌لرزه‌ی ۵ دی ۱۳۸۲ بم با بزرگای ۶/۵ ریشتر اشاره نمود [۱۳]. از این رو تخمین خطر زلزله در استان کرمان حیاتی است.

در تصویر ۱ گسل جیرفت: J_F، گسل بم: B_F، گسل نایبند: N_F، گسل شهداد: Sh_F، گسل سبزواران: S_F، گسل گوک: G_F، گسل لک‌کوه: Lk_F، گسل کوه‌بنان: Kb_F، گسل داروان: D_F، گسل انار: A_F، گسل رفسنجان: R_F، گسل لاله‌زار: L_F، گسل شهر بابک: ShB_F [۱۴].

در تصویر ۲ نقشه‌ی لرزه‌خیزی در چارچوب استان کرمان در مقایسه با نقاط دیگر در ایران از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ میلادی ثبت شده توسط شبکه‌های لرزه‌نگاری وابسته به مؤسسه‌ی ژئوفیزیک دانشگاه تهران نشان داده شده است. لرزه‌خیزی منطقه‌ی کرمان



تصویر ۱: موقعیت جغرافیایی و نقشه‌ی گسل‌های مهم در چارچوب استان کرمان



تصویر ۲: نقشه‌ی لرزه‌خیزی در چارچوب استان کرمان

بحران و شبیه‌سازی آن، نرخ‌های بیمه‌ای و ... است [۱۵]. به عقیده‌ی گرین و هال [۱۶] هدف اصلی ارزیابی خطر لرزه‌ای، برآورد پارامترهای جنبش نیرومند زمین (بیشینه‌ی جابه‌جایی زمین، بیشینه‌ی سرعت زمین و بیشینه‌ی شتاب زمین و ...) است. به منظور ارزیابی خطر لرزه‌ای سه روش وجود دارد. روش آماری - تجربی که روشی ساده و اولیه برای برآورد خطر لرزه‌ای در هر منطقه است که بدون استفاده از مدارک زمین‌شناسی و زمین‌ساختی در هر منطقه تنها براساس آمار زمین‌لرزه‌های رخ داده صورت می‌گیرد، روش تعینی که در آن شتاب حاصل از زمین‌لرزه

با دوایر توپر زرد رنگ و دیگر مناطق ایران با دوایر توپر سبز رنگ نشان داده شده است.

روش مطالعه و داده

- ارزیابی تعینی خطر لرزه‌ای

برآورد خطر لرزه‌ای یکی از مطالعات پایه‌ای برای پژوهش‌های بعدی در بخش‌های سازه‌ای، ژئوتکنیک، مدیریتی، اقتصادی کلان و ... است. هدف از تحلیل خطر زمین‌لرزه، به دست آوردن معیاری برای طراحی سازه‌ها، برنامه‌ریزی برای مدیریت

ایجاد شده در هر یک از چشمه‌های لرزه‌زا در ساختگاه مورد نظر تعیین شده و بزرگ‌ترین آن‌ها به عنوان شتاب طراحی ارائه می‌شود و در نهایت روش احتمالاتی که در آن احتمال وقوع بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌ی قابل رخداد تعیین می‌گردد.

در این پژوهش به منظور ارزیابی خطر لرزه‌ای شهر بردسیر واقع در استان کرمان به منزله‌ی ساختگاه در نظر گرفته شد و برای تحلیل خطر لرزه‌ای از روش تعینی یا قطعی (Deterministic Seismic Hazard, DSH) استفاده شده است.

مراحل تحلیل خطر لرزه‌ای تعینی به شرح زیر است:

۱. مشخص نمودن چشمه‌های لرزه‌ای؛
۲. تعیین بیشینه‌ی زمین‌لرزه (M_{max}) و فاصله‌ی ساختگاه تا چشمه‌ی لرزه‌ای (R)، برای تمامی چشمه‌ها؛
۳. انتخاب رابطه‌ی کاهندگی مناسب؛
۴. محاسبه‌ی بیشینه شتاب افقی زمین (PGA).

-تعیین چشمه‌های بالقوه‌ی زمین‌لرزه

برای تعیین چشمه‌های بالقوه‌ی لرزه‌ای نیاز به اطلاعات مختلفی مانند اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی و همچنین داده‌های زمین‌لرزه است. چشمه‌های لرزه‌ای را به سه صورت نقطه‌ای، خطی و پهنه‌ای مدل می‌کنند که با توجه به اطلاعات مورد نیاز و قطعیت استفاده از اطلاعات، مدل پهنه‌ای مناسب‌ترین مدل است. تعداد ۲۳۲ چشمه‌ی لرزه‌ای توسط میرزایی و همکاران [۱۱] در ایران تعریف شده است که در مطالعات اخیر موسوی -بفرویی و همکاران [۱۷] به ۲۳۸ چشمه بهبود و توسعه یافته است. در میان ۲۳۸ چشمه تعریف شده برای ایران از ۲۷ چشمه‌ی لرزه‌ای پهنه‌ای واقع در چارچوب منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده شده است که در تصویر ۳ نمایش داده شده‌اند.

-تعیین بیشینه‌ی بزرگ M_{max} و R برای هر چشمه

در تعیین بیشینه‌ی زمین‌لرزه یک چشمه‌ی بالقوه‌ی زمین‌لرزه استنباط پژوهشگر و قضاوت علمی نقش قابل ملاحظه‌ای خواهد

داشت. در شرایطی که چشمه‌ی زمین‌لرزه‌ای دارای تاریخچه‌ی زلزله‌خیزی مستندی باشد، از آن به منزله‌ی راهنمایی ارزشمند برای تخمین بیشینه‌ی زمین‌لرزه استفاده می‌شود [۱۶]. بیشینه‌ی زمین‌لرزه برای هر چشمه توسط فرد خبره تعیین می‌شود. مقادیر استفاده شده برای M_{max} مطابق مطالعات موسوی بفرویی و همکاران [۱۷] برای هر چشمه در نظر گرفته شد که در جدول ۱ آورده شده است.

به کمک کدنویسی در متلب (Matlab) کوتاه‌ترین فاصله‌ی هر چشمه تا ساختگاه (شهر بردسیر) برحسب کیلومتر محاسبه گردید. مقادیر به دست آمده برحسب کیلومتر در جدول ۱ تنظیم شده است.

تصویر ۳ چشمه‌های بالقوه‌ی زمین‌لرزه در چارچوب استان کرمان را نشان می‌دهد. شماره‌ی هر چشمه و مقدار M_{max} مربوطه روی هر چشمه مشخص است. ستاره‌ی سیاه رنگ نشانگر شهر بردسیر به منزله‌ی ساختگاه است.

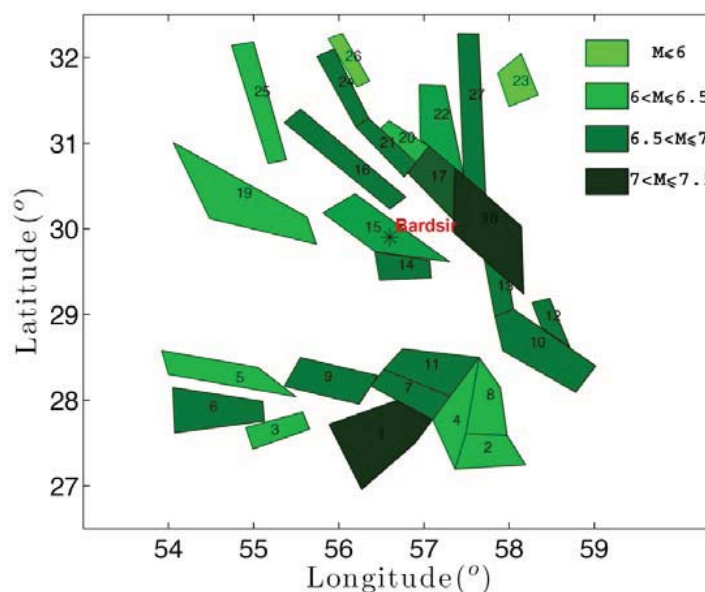
-انتخاب رابطه‌ی کاهندگی

رابطه‌ی کاهندگی تابعی است که خواص زلزله و پارامترهای زلزله مانند بزرگ، فاصله‌ی ساختگاه تا چشمه، نوع گسل و ... را به هم مربوط می‌سازد و در هر منطقه با توجه به تکنیک و ساختار پوسته رابطه‌ی کاهندگی خاصی صادق است [۱۶]. انتخاب رابطه‌ی کاهندگی تأثیر بسیار زیادی در نتایج برآورد خطر لرزه‌ای خواهد داشت. در این مطالعه از رابطه‌ی کاهندگی آمبرسیز و همکاران [۱۸] مطابق رابطه‌ی ۱ برای برآورد خطر لرزه‌ای استفاده شد:

رابطه‌ی ۱:

$$\begin{aligned} \log Y &= [a_1 + a_2 M_{Max} + (a_3 + a_4 M_{Max}) \log \sqrt{R^2 + a_5^2} \\ &+ a_6 S_s + a_7 S_a + a_8 F_N + a_9 F_T + a_{10} F_O] \end{aligned}$$

این رابطه دارای پارامترهای بیشینه‌ی بزرگی زمین‌لرزه، فاصله، نوع سازوکار گسلش، نوع خاک و ... است. S_s معرف خاک



تصویر ۳: چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در استان کرمان

نرم است و برای خاک نرم برابر واحد و برای خاک‌های دیگر برابر صفر است و S_a معرف خاک سخت است و برای خاک سخت برابر واحد و برای خاک‌های دیگر برابر صفر است. F_N معرف گسلش نرمال است و مقدار آن برای این نوع گسلش برابر واحد و برای گسلش‌های دیگر برابر صفر است، F_T معرف گسلش معکوس است و مقدار آن برای این نوع گسلش برابر واحد و برای گسلش‌های دیگر برابر صفر است و F_0 معرف گسلش ترکیبی است و مقدار آن برای این نوع گسلش برابر واحد و برای گسلش‌های دیگر برابر صفر است.

پارامتر نوع گسلش، در رابطه کاهندگی برای مقادیر F_N ، F_T و F_0 با توجه به مطالعات انجام شده روی گسل‌های ایران [۱۴] در نظر گرفته شده‌اند. در این رابطه کاهندگی مقادیر ضرایب a_1 تا a_{10} برابرند با:

$$a_1 = 2.522, a_2 = -0.142, a_3 = -3.184, a_4 = 0.314, a_5 = 7.6, \\ a_6 = 0.137, a_7 = 0.050, a_8 = -0.084, a_9 = 0.062, a_{10} = -0.044$$

- محاسبه‌ی بیشینه‌ی شتاب افقی زمین (PGA)

زمین‌لرزه با بیشینه‌ی شتاب افقی به‌عنوان زمین‌لرزه‌ی مبنای طرح مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار PGA برای هرچشمه با استفاده از رابطه‌ی کاهندگی و مقادیر M_{max} و کوتاه‌ترین فاصله‌ی ساختمان تا چشمه، R تعیین می‌شود و بیشترین مقدار PGA به‌منزله‌ی خروجی برآورد خطر معرفی می‌گردد. نتایج به دست آمده برای هر چشمه در جدول ۱ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد بیشینه‌ی شتاب افقی در ارزیابی قطعی خطر لرزه‌ای $g/0.41$ است که حاصل از چشمه‌ی شماره‌ی ۱۸ با بزرگای $7/5$ در فاصله‌ی $85/9$ کیلومتری از بردسیر است.

- سیستم منطق فازی

توانایی منطق فازی در کار با عدم قطعیت‌ها باعث برتری این تئوری در مدل کردن پدیده‌های طبیعی مانند زمین‌لرزه شده است. استفاده از روش فازی توسط محققان در مباحث مختلف زلزله‌شناسی متداول است. عدم قطعیت که ناشی از ناکامل بودن داده‌های مرتبط است، لزوم استفاده از روش‌های مناسب را در بررسی خطر زمین‌لرزه اجتناب‌ناپذیر می‌کند. شکی نیست که هر کدام از گام‌های برآورد خطر زمین‌لرزه با عدم قطعیت‌هایی روبه‌رو است. به عبارت دیگر، ذات مسئله به‌گونه‌ای است که نمی‌توان یک عدد را به یک متغیر نسبت داد. استفاده از روش فازی در این مبحث این امکان را فراهم می‌نماید که بتوان این عدم قطعیت‌ها را در مسئله لحاظ نمود [۱۹]. از آنجا که برآورد خطر زمین‌لرزه، پایه و اساس تمام برنامه‌ریزی‌های مهندسی و اقتصادی است، لذا استفاده از سیستم استنتاج فازی که بتواند با دقت مناسبی برآورد خطر را انجام داده و نتایج قابل اعتمادی ارائه نماید، می‌تواند بسیاری از مشکلات پیش‌روی برنامه‌ریزان اقتصادی، بیمه‌ای و ... را کاهش دهد که مسلماً مدل استنتاج فازی، با سرعت و انعطاف‌پذیری بالا چنین نتیجه‌ای را خواهد داشت [۵].

استفاده از روش فازی توسط محققان در مباحث مختلف زلزله‌شناسی متداول است، از جمله مفاهیم پیش‌بینی خطر

زمین‌لرزه [۷]، کمی کردن برآورد خطر زمین‌لرزه متغیر با زمان [۲۰]، همچنین ارائه‌ی روشی برای محاسبه‌ی خطرپذیری فازی زلزله برای ارزیابی شدت در ساختمان و تلفات شهری [۴]. اخیراً آناساگورسا و همکاران [۱۰] یک سیستم فازی را برای طبقه‌بندی خسارات ناشی از زمین‌لرزه ارائه کرده‌اند که سیستم پیشنهاد شده روی یک سازه‌ی بتنی و مستحکم هجده طبقه مورد آزمایش قرار گرفته است. همچنین می‌توان به برآورد ریسک زلزله و بهسازی لرزه‌ای با استفاده از سیستم استنتاج فازی [۱]، اشاره نمود. در این مطالعه روشی برای برآورد ریسک و ارزیابی سریع خطرپذیری لرزه‌ای سازه‌ها، براساس سیستم‌های استنتاج‌گر فازی ارائه شده است. در مطالعات بوستان و همکاران [۸] یک مدل برآورد خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی بر مبنای تئوری مجموعه‌های فازی ارائه کرده‌اند.

با توجه به کاستی‌هایی که روش تعیینی تحلیل خطر زلزله در ارتباط با مدل‌سازی برخی عدم قطعیت‌ها دارد، به کارگیری روش دیگری برای مدل‌سازی این دسته از عدم قطعیت‌ها لازم به نظر می‌رسد. تئوری منطق فازی یکی از روش‌هایی است که به کمک آن می‌توان این کمبودها را جبران کرد.

به طور کلی برای استخراج خروجی در منطق فازی مراحل زیر صورت می‌گیرد:

- تعیین مجموعه قوانین فازی توسط فرد خبره؛
- فازی کردن پارامترهای ورودی به کمک توابع عضویت (در این مطالعه مطابق با گستره‌ی پارامترهای ورودی و خروجی و نظر فرد خبره از تابع عضویت زنگوله‌ای استفاده شد)؛
- تجميع خروجی‌ها
- نافازی‌سازی توزیع خروجی (از نافازی‌سازی مرکز سطح استفاده شد).

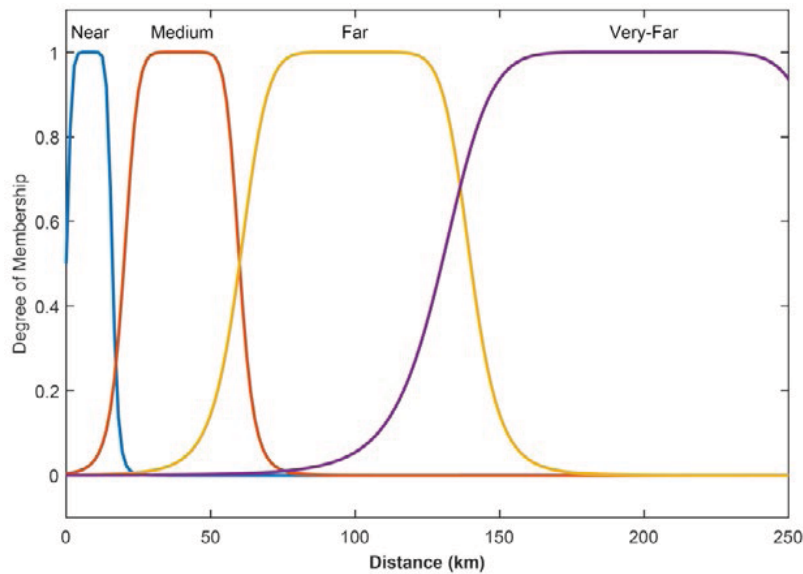
به‌منظور برآورد خطر زمین‌لرزه به روش تعیینی با به‌کارگیری منطق فازی از شش مرحله‌ی زیر استفاده شده است:

۱. تعیین چشمه‌های بالقوه‌ی لرزه‌ای (گسله‌ی Y)؛
۲. برآورد بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌ی قابل انتظار در چشمه‌ی لرزه‌ای (M_{max}) و فاصله‌ی چشمه تا ساختمان (R)؛
۳. تعیین متغیرهای زبانی برای موتور استنتاج فازی؛
۴. طراحی توابع عضویت برای ورودی‌ها و خروجی‌ها؛
۵. طراحی قوانین پایگاه قوانین؛
۶. انجام مکانیسم استنتاج فازی در متلب (Matlab) و برآورد خطر زمین‌لرزه به روش فازی.

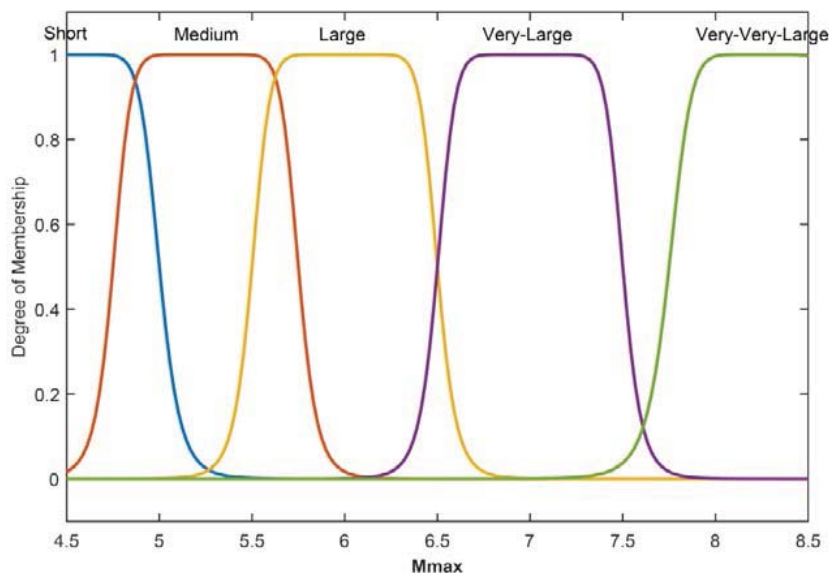
که مرحله‌ی ۱ و ۲ مانند محاسبه‌ی برآورد خطر لرزه‌ای به روش تعیینی مرسوم که در بخش‌های قبل بیان شد، تعیین می‌شود.

- متغیرهای زبانی

در متغیرهای زبانی پارامترهای ورودی و خروجی برای تشکیل موتور استنتاج فازی مشخص می‌شوند. سه پارامتر ورودی شامل بیشینه بزرگ M_{max} ، کوتاه‌ترین فاصله‌ی ساختمان تا چشمه‌ی R و نوع گسلش، S و بیشینه‌ی شتاب افقی زمین PGA به‌منزله‌ی پارامتر خروجی استفاده شد.



تصویر ۴: توابع عضویت فاصله‌ی ساختگاه تا چشمه



تصویر ۵: توابع عضویت Mmax

- پارامترهای ورودی

برای پارامتر ورودی، فاصله از ساختگاه (R)، مقادیر بین صفر تا ۲۵۰ کیلومتر در نظر گرفته شد. از ۴ تابع عضویت زنگوله‌ای با مقادیر نزدیک، متوسط، دور و خیلی دور استفاده شد. در تصویر ۴ نمایی از توابع عضویت فاصله از ساختگاه نشان داده شده است. برای پارامتر ورودی، M_{max} ، مقادیر بین ۴/۵ تا ۸/۵ در نظر گرفته شد. از ۵ تابع عضویت زنگوله‌ای با مقادیر کم، متوسط، بزرگ، خیلی بزرگ و خیلی خیلی بزرگ استفاده شد. در تصویر ۵ نمایی از توابع عضویت M_{max} نشان داده شده است. سه نوع گسلس اصلی (نرمال، معکوس و ترکیبی) وجود دارد. برای پارامتر ورودی نوع گسلس S ، سه مقدار در نظر گرفته شد. از

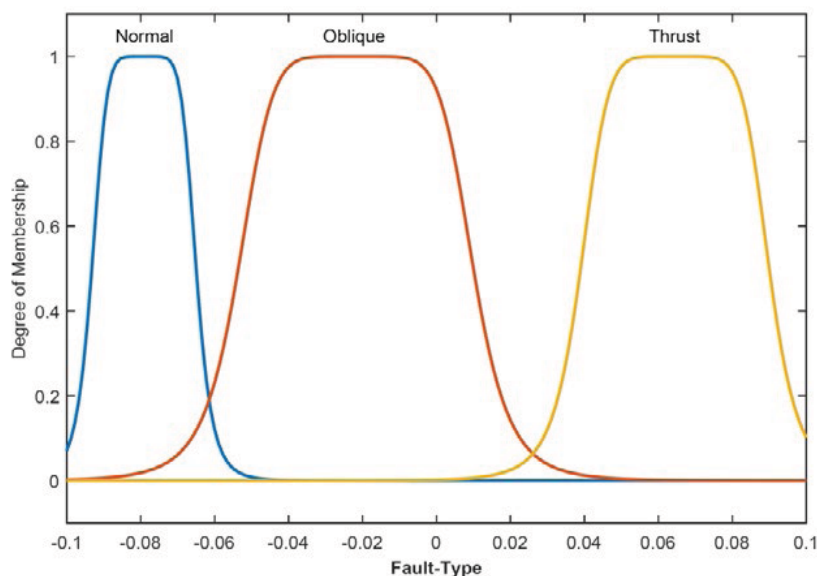
۳ تابع عضویت زنگوله‌ای در گستره‌ی گسلس نرمال، معکوس و ترکیبی استفاده شد (تصویر ۶).

- پارامتر خروجی

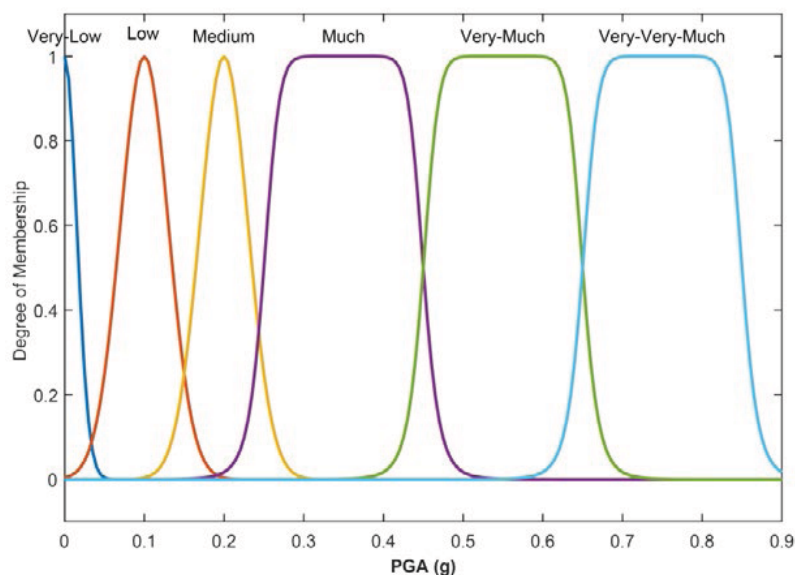
برای تک خروجی سیستم که پارامتر بیشینه شتاب افقی زمین (PGA) است، مقادیر صفر تا $g/9$ (برابر شتاب گرانش زمین معادل $9/8 m/s^2$ است) در نظر گرفته شده است. از ۶ تابع عضویت زنگوله‌ای با مقادیر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، خیلی زیاد و خیلی خیلی زیاد استفاده شده است. در تصویر ۷ نمایی از توابع عضویت بیشینه شتاب افقی زمین نشان داده شده است.

- طراحی قوانین استنتاج فازی

سیستم‌های استنتاج فازی (Fuzzy Inference Systems, FIS)، سیستم‌های مبتنی بر دانش یا قواعد هستند. هسته‌ی یک



تصویر ۶: توابع عضویت نوع گسلش S



تصویر ۷: توابع عضویت بیشینه شتاب افقی زمین (PGA)

برای ایجاد یک سیستم استنتاج فازی از رابط گرافیکی جعبه ابزار منطق فازی در نرم افزار متلب و از سیستم استنتاج فازی ممدانی [۲۲] استفاده شد. ورودی فرایند غیرفازی سازی، یک مجموعه ی فازی است (حاصل عملیات تجمیع) و خروجی آن، یک عدد است. در این مطالعه از غیرفازی ساز مرکز سطح استفاده شد.

پس از محاسبه ی پارامترهای برآورد خطر به روش تعیینی به سیستم استنتاج فازی متصل گردیدند و با استفاده از سیستم فازی بیشینه شتاب افقی مربوط به هر چشمه به دست آمد. در نهایت از بین بیشترین شتاب به دست آمده برای هر چشمه، بیشینه شتاب بین چشمه ها به عنوان شتاب ساختگاه در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از برآورد خطر تعیینی با استفاده از سیستم استنتاج فازی در جدول ۱ آورده شده است.

سیستم فازی یک پایگاه دانش است که از قواعد اگر - آنگاه فازی تشکیل شده است [۲۱]. مطابق با پارامترهای ورودی و خروجی ۶۰ قانون تعریف شد. برای نمونه، چند مورد از قوانینی که مورد استفاده قرار گرفته است در زیر آورده شده است:

- اگر «فاصله نزدیک» و «بیشینه زمین لرزه کم» باشد آنگاه «شتاب کم» خواهد بود.
- اگر «فاصله متوسط» و «بیشینه زمین لرزه زیاد» باشد آنگاه «شتاب متوسط» خواهد بود.
- اگر «فاصله دور» و «بیشینه زمین لرزه خیلی زیاد» باشد آنگاه «شتاب زیاد» خواهد بود.
- اگر «فاصله خیلی دور» و «بیشینه زمین لرزه خیلی خیلی زیاد» باشد آنگاه «شتاب خیلی خیلی زیاد» خواهد بود.

جدول ۱: شماره‌ی چشمه‌ی لرزه‌ای، مقدار پارامترهای ورودی (M_{max} و R برحسب کیلومتر) و پارامتر خروجی (PGA (g))

Source Number	R (Km)	M_{max}	Fault-type	PGA (g) as DSH	PGA (g) as FIS
1	215.6	7.5	0.062	0.32	0.38
2	250.0	6.5	-0.044	0.11	0.16
3	249.5	6.5	0.062	0.12	0.27
4	199.8	6.5	0.062	0.13	0.27
5	239.6	6.5	0.062	0.13	0.27
6	250.5	7.0	0.062	0.19	0.35
7	175.3	7.0	0.062	0.22	0.35
8	199.8	6.5	-0.044	0.12	0.16
9	182.6	7.0	0.062	0.21	0.35
10	176.3	7.0	-0.044	0.19	0.20
11	150.1	7.0	0.062	0.23	0.35
12	208.3	7.0	-0.044	0.18	0.20
13	130.8	7.0	-0.044	0.21	0.20
14	28.5	7.0	0.062	0.41	0.54
15	21.4	6.7	0.062	0.36	0.53
16	32.4	7.0	0.062	0.38	0.53
17	74.4	7.2	0.062	0.33	0.35
18	85.9	7.5	0.062	0.41	0.38
19	93.1	6.5	-0.084	0.15	0.08
20	99.6	6.5	0.062	0.17	0.30
21	76.9	7.0	0.062	0.28	0.35
22	122.6	6.7	0.062	0.19	0.34
23	228.6	6.0	-0.044	0.07	0.01
24	144.8	7.0	0.062	0.23	0.35
25	162.7	6.5	-0.084	0.12	0.08
26	194.3	6.0	0.062	0.09	0.10
27	125.5	7.0	-0.044	0.22	0.20

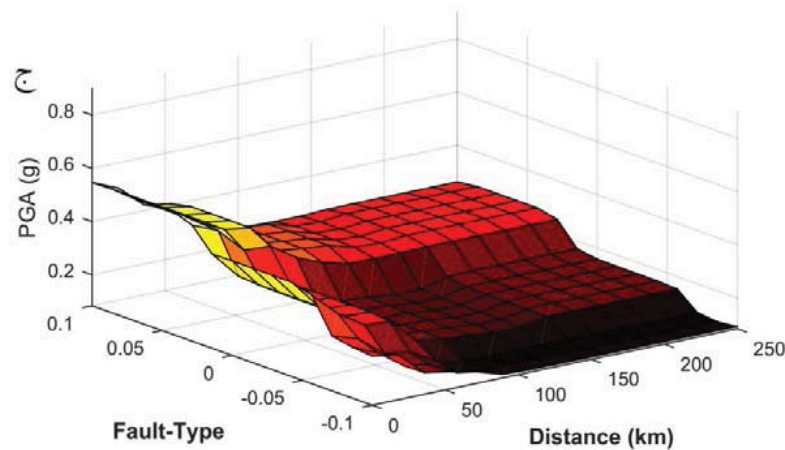
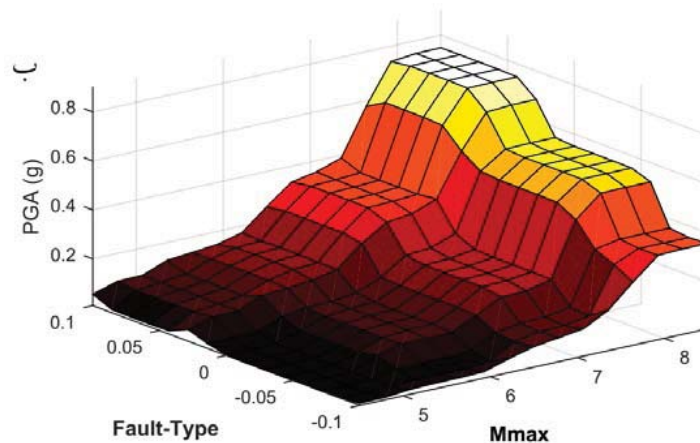
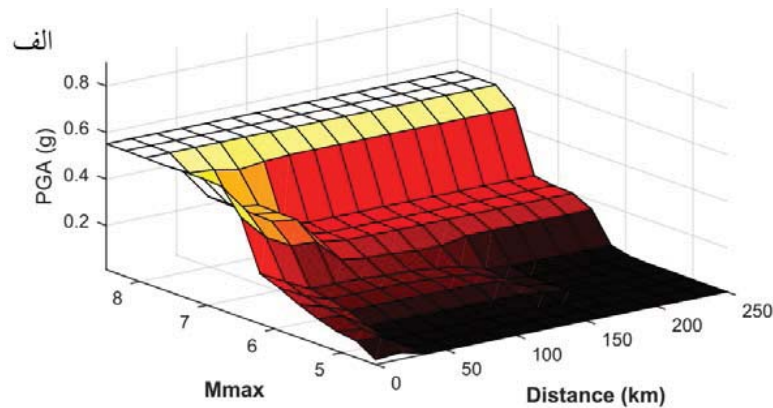
بحث و نتیجه‌گیری

الف و ب و ج محورهای افقی نمایش بزرگا و فاصله‌ی ساختگاه از چشمه و نوع گسل است و در تمام نمودارها محور قائم بیشینه‌ی شتاب افقی زمین (پارامتر خروجی) است. تغییرات پارامترها نسبت به هم با آنچه قابل انتظار است هم‌خوانی دارد. محورهای افقی بیانگر الف. M_{max} و فاصله‌ی چشمه تا ساختگاه؛ ب. M_{max} و نوع گسلش و ج. نوع گسلش و فاصله‌ی چشمه تا ساختگاه هستند. در تمامی اشکال محور قائم نمایش PGA است.

مطابق با نتایج به دست آمده از برآورد تعیین خطر لرزه‌ای در شهر بردسیر به کمک منطق فازی، نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر

با استفاده از رابطه‌ی کاهندگی آمبرسیز و همکاران [۱۸]، بیشینه‌ی بزرگا و کوتاه‌ترین فاصله‌ی هر چشمه تا ساختگاه بردسیر برآورد تعیین خطر لرزه‌ای در استان کرمان صورت گرفت. همچنین به کمک پارامترهای ورودی (بزرگا و فاصله‌ی ساختگاه تا هر چشمه و نوع گسلش) و پارامتر خروجی (بیشینه شتاب افقی)، به کمک استنتاج فازی ممدانی [۲۲]، برآورد تعیین خطر لرزه‌ای صورت گرفت.

رفتار پارامترهای ورودی و پارامتر خروجی نسبت به یکدیگر در نمودار سه بعدی تصویر ۸ نشان داده شده است. در تصویر ۸،



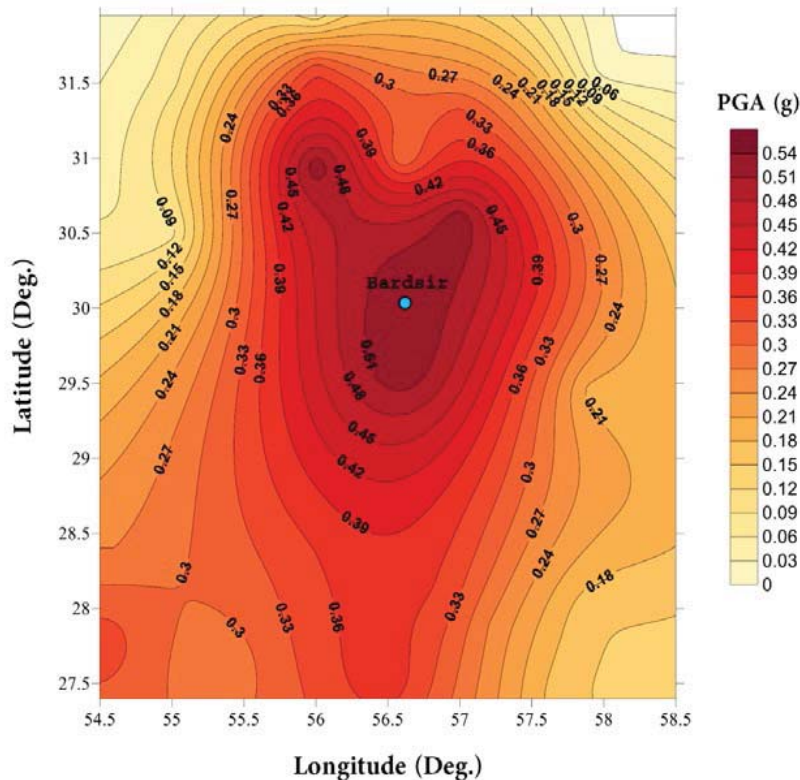
تصویر ۸: سطوح سه بعدی سیستم ورودی خروجی سیستم های فازی

است. همچنین مطابق تصویر ۹ بخش های زیادی از منطقه ی مورد مطالعه در خطر بالای $0.30g$ قرار دارند.

مطابق با نقشه ی پهنه بندی خطر لرزه ای در ایران، محدوده ی مورد مطالعه در منطقه ی خطر لرزه ای بالا و نسبتاً بالا واقع شده است [۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶]، نتایج به دست آمده در این مطالعه هم خوانی خوبی با نقشه ی خطر لرزه ای در ایران را نشان می دهد. همچنین زارع [۲۷] نقشه ی پهنه بندی خطر لرزه ای در ایران را بر پایه ی چشمه های جدید لرزه ای، توپوگرافی، داده های شدت مغناطیسی و کاتالوگ زمین لرزه ها ارائه نمود که نتایج مطالعه ی

زمین لرزه به روش تعیینی با استفاده از منطق فازی ترسیم گردید (تصویر ۹). در این تصویر میزان خطر در شهر بردسیر به صورت پربندهای هم شتاب نشان داده شده است.

نتایج نشان می دهد تغییرات بیشینه شتاب افقی زمین در شهر بردسیر حاصل از فعالیت چشمه های بالقوه ی زمین لرزه در چارچوب منطقه ی مورد مطالعه در بازه ی $0.1g$ تا $0.54g$ قرار دارد که بیشینه شتاب افقی در ارزیابی تعیینی خطر لرزه ای $0.54g$ است که حاصل از چشمه ی شماره ی ۱۴ با بزرگای $7/0$ و سازوکار گسلش معکوس در فاصله ی $28/5$ کیلومتری از ساختگاه بردسیر



تصویر ۹: نقشه پربندهای هم شتاب در شهر بردسیر براساس راهکار برآورد خطر لرزه‌ای به روش تعینی با استفاده از منطق فازی (دایره‌ی آبی رنگ شهر بردسیر است.)

جنبش نیرومند زمین در شهر کرمان و مناطق اطراف را تهیه کردند و نشان دادند که خطر گسیختگی دامنه‌ای ناشی از زمین‌لرزه در محدوده‌ی شهر کرمان کم و بیش منتفی است، اما خطر ایجاد روان‌گرایی در محدوده‌ی کوچکی از مرکز شهر مطرح است. در عین حال، به علت بالا بودن سستبرای رسوبات سست جوان در زیر شهر که با افزایش دوره‌ی تناوب چیره امواج میکروتروموری تأیید می‌شود و نیز به علت ریزدانه و سست بودن این رسوبات، خطر تشدید جنبش زمین (به‌ویژه در محدوده‌ای از جنوب و مرکز تا باختر شهر) مطرح است که در اثر آن شدت زمین‌لرزه تا به $X+MMI$ هم خواهد رسید.

قدرتی امیری و همکاران [۳۰] مطالعه‌ای تحت عنوان تحلیل خطر لرزه‌ای و تهیه‌ی طیف خطر یکسان برای مناطق مختلف شهر کرمان انجام داده‌اند. نتیجه‌ی مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که PGA با احتمال رویداد ۱۰٪ در ۵۰ سال در شهر کرمان $0.27g$ تا $0.285g$ متغیر است. همچنین نشان دادند PGA با احتمال رویداد ۲٪ در ۵۰ سال در شهر کرمان از $0.51g$ تا $0.57g$ متغیر است. مطالعات انجام شده در توافق خوبی با مطالعه‌ی حاضر است که نشان می‌دهد استان کرمان در پهنه‌ی خطر لرزه‌ای نسبتاً بالا و بالا واقع است.

در روش تعینی چشمه‌ها به‌صورت مجزا در نظر گرفته می‌شوند، بنابراین زمانی که بیشینه‌ی شتاب یک چشمه به‌عنوان شتاب ساختمانی در نظر گرفته شد دیگر شتاب سایر چشمه‌ها در برآورد خطر در نظر گرفته نمی‌شوند. سیستم فازی پیشنهادی با توجه به اینکه عدم قطعیت‌ها را برای پارامترها در نظر می‌گیرد،

وی نشان می‌دهد بیشینه شتاب افقی در چارچوب استان کرمان بیش از $0.3g$ تا حدود $0.53g$ است. مطالعه‌ی انجام شده در این پژوهش نتایج ارائه شده توسط وی را تأیید می‌کند.

در مطالعات اخیر [۱۷] پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در ایران و برآورد مقادیر بیشینه شتاب برای مراکز استان‌ها صورت گرفته است. آن‌ها بیشینه شتاب در استان کرمان را بین $0.4-0.6g$ تخمین زده‌اند که مطالعه‌ی حاضر نتایج آن‌ها را تأیید می‌کند.

مطالعه‌های موردی متعدد از برآورد خطر لرزه‌ای نیز در شهر کرمان با روش‌های مختلف صورت گرفته است. در ۱۳۸۵، ریزپهنه‌بندی درجه‌ی ۲ و ارزیابی اثرات زلزله بر شهر کرمان با استفاده از GIS ارائه گردید [۲۸] و پژوهشگران نشان دادند که میزان خطر در بخش‌های مرکزی، باختری و همچنین بخش‌هایی از جنوب شهر به شدت افزایش می‌یابد که سازه‌های موجود در این بخش‌ها در اثر زلزله‌ی احتمالی به شدت ویران خواهند شد. مرکز مطالعات مدیریت بحران شهرداری کرمان در ۱۳۸۷ با استفاده از نرم‌افزار کارمانیا خطر و به کمک اطلاعات مربوط به ضخامت رسوبات، امواج میکروتروموری، جنس خاک و عمق آب زیرزمینی را برای ارزیابی و مدیریت خطر زلزله نقشه‌ی خطر زلزله‌ی شهر کرمان تهیه کرده‌اند. نتیجه‌ی مطالعات نشان می‌دهد میزان خطر لرزه‌ای در بخش‌های مرکزی، غربی و جنوب به شدت افزایش می‌یابد.

حسن‌زاده و همکاران [۲۹] تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای شهر کرمان را با تأکید بر کاربرد GIS در ریزپهنه‌بندی مقدماتی درجه‌ی ۲ انجام دادند. آن‌ها از تلفیق نقشه‌های دوره چیره میکروترومور و نوع رسوبات در سیستم GIS نقشه‌ی ریزپهنه‌بندی میزان تشدید

10. Anaxagoras N.N., Douglas J., Sarma S.K., Smit P.M. (2005). Equations for 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*, 1-53.
11. Mirzaei N., Gao M., and Chen Y. T. (1998). Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic provinces, *J. Earthq. Pred. Res.*, 7, 465-495.

۱۲. آقائانی س. ع. (۱۳۸۳). زمین شناسی ایران. انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی کشور، ایران.

۱۳. زارع م.؛ جوان دولوی غ. (۱۳۸۳). گزارش زلزله و مقدماتی زمین لرزه ۴ اسفند ۱۳۸۳ شرق - جنوب شرق زرنند کرمان (حتکن-داهوئیه)، پژوهشگاه زلزله شناسی، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

۱۴. حسامی خ.؛ جمالی، ف.؛ طبعی، ه. (۱۳۸۲). نقشه های گسل های فعال ایران، پژوهشگاه بین المللی زلزله و مهندسی زلزله، گروه لرزه زمین ساخت، پژوهشگاه زلزله شناسی. پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

۱۵. وجودی م.؛ زارع م. (۱۳۸۵). مدل استنتاج فازی برای برآورد خطر زلزله، دومین کنفرانس بین المللی مدیریت جامع بحران در حوادث غیرمترقبه طبیعی، تهران.

16. Green A., Hell J., (1994). In An Overview of Selected Seismic Hazard Analysis Methodologies, Civil Engineering studies, *Structural Research Series*, P:592.

۱۷. موسوی - بفرویی ح.؛ میرزائی ن.؛ شعبانی ا.؛ اسکندری قادى م. (۱۳۹۳). پهنه بندی خطر زمین لرزه در ایران و برآورد مقادیر بیشینه شتاب برای مراکز استان ها. مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۰، ۳۸-۱۵.

18. 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, *Bull. Earthq. Eng.*, 3, 1-53.

۱۹. بوستان ا.؛ میرزائی ن.؛ اسکندری قادى م.، شفيعى ع.، ۱۳۹۱، پهنه بندی زمین لرزه های گستره تهران و نواحی مجاور با استفاده از مجموعه های فازی، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۸ (۲)، ۲۹-۴۴.

20. Deyi F., Ichikawa M. (1989). Quantitative estimation of time-variable earthquake hazard by using fuzzy set theory. *Tectonophysics*, 169, 175-196.

۲۱. تشنه لب م.؛ صفاریپور ن.؛ افیونی د. (۱۳۹۳). سیستم های فازی و کنترل فازی. انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

22. Ross T. (2010). Fuzzy logic with Engineering applications, *University of New Mexico, USA*, 607 p.

23. Building research center housing, (2008). Regulations designed buildings against standard earthquake.

24. Tavakoli B., Ghafory-Ashtiany M. (1999). Seismic hazard assessment of Iran. *J Annali DiGeofisica*, 42,

دقیق تر است و اینکه در سیستم استنتاج فازی محاسبات ریاضی برآورد خطر کمتر شده و سیستم فازی باعث ساده سازی فرایند برآورد خطر می شود.

به علاوه انعطاف پذیری سیستم استنتاج فازی براساس دانش فرد خبره برای حل مسائل پیچیده ای چون برآورد خطر لرزه ای و ساده سازی پردازش تحلیل خطر تعیینی با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها، با بهبود قطعیت می تواند به زلزله شناسان کمک کند. لذا نتایج ما از اعتبار خوبی برخوردار است و سیستم فازی طراحی شده با قوانین فرد خبره یک رفتار صحیح برای برآورد خطر زمین لرزه را دارا است.

سپاس گزاری

برخود لازم می دانیم که از آقای دکتر نوربخش میرزایی عضو هیئت علمی مؤسسه ی ژئوفیزیک دانشگاه تهران و همچنین دکتر موسوی بفرویی برای در اختیار قرار دادن مشخصات چشمه های لرزه ای قدردانی به عمل آوریم.

منابع

۱. قدرتی امیری، غ.؛ اثمري سعدآباد، س.؛ زارع حسین زاده، ع. (۱۳۹۲). تحلیل ریسک زلزله با استفاده از سیستم استنتاج گر فازی و کاربرد آن در مطالعات به سازی لرزه ای ساختمان های موجود. مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، ۱۳ (۳)، ۷۱-۸۴.

۲. بوستان، ا.؛ شفيعی، ع. (۱۳۹۰). برآورد خطر زمین لرزه به روش احتمالاتی - فازی برای منطقه ی تهران. فصلنامه ی زمین، ۶ (۲۰)، ۴۵-۵۲.

3. Lamarre M., Dong W. (1986). Evaluation of seismic hazard with fuzzy algorithm, In: *3rd U.S. national Conference on earthquake engineering*, Charleston, South Carolina, 221-231.

4. Chongfu, H. (1996). Fuzzy risk assessment of urban natural hazards. *Fuzzy Sets and Systems*. 83, 271-282.

۵. وجودی م.؛ زارع م.؛ نورزاد ا. (۱۳۸۵). مدل استنتاج فازی برای تحلیل خطر زلزله، دومین کنفرانس بین المللی مدیریت جامع بحران در حوادث غیرمترقبه طبیعی، تهران.

6. Chen D., Dong W., Shah H.C. (1988). Earthquake recurrence relationships from fuzzy earthquake magnitudes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 7, 136-142.

7. Frangpol M., Ikejima K., Hong K. (1988). Seismic Hazard Prediction Using A Probabilistic-Fuzzy Approach. *Structural Safety*, 5, 109-117.

8. Boostan E., Tahernia N., Shafiee A. (2015). Fuzzy-probabilistic seismic hazard assessment case study: Tehran region, Iran, *Springer Science+Business Media Dordrecht*, 77, 525-541.

9. Kim Y., Hurlebus S., Langari R. (2010). Model-Based Multi-input, Multi-output Supervisory Semi-active Nonlinear Fuzzy Controller. *J Computer-Aided Civil*

25. Hamzehloo H., Alikhanzadeh A., Rahmani M., Ansari A. (2012). Seismic hazard maps of Iran, *In: Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering*, Lisbon, Portugal.
26. Moinfar A., Naderzadeh A., Nabavi, M. H. (2012). New Iranian Seismic Hazard Zoning Map for New Edition of Seismic Code and Its Comparison with Neighbor Countries, *15th WCEE, LISBOA*.
27. Zare M. (2012). Development of Seismic Hazard Zoning Map for Iran, Base Based on New Seismic Source Determination, *15th WCEE, LISBOA*.
۲۸. عباس‌نژاد ا.؛ حسن‌زاده ر.؛ (۱۳۸۵). ریزپهنه‌بندی درجه ۲ و ارزیابی اثرات زلزله بر شهر کرمان با استفاده از GIS، *دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران*، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۲۸.
۲۹. حسن‌زاده ر.؛ عباس‌نژاد ا.؛ علوی ا.؛ شریفی تشیزی ا. (۱۳۸۱). تحلیل خطر لرزه‌ای شهر کرمان با تأکید بر کاربرد GIS در ریزپهنه‌بندی مقدماتی درجه‌ی ۲. *فصلنامه علوم زمین*، ۲۱ (۸۱)، ۲۳-۳۰.
۳۰. قدرتی‌امیری غ. ر.؛ رضویان امرئی س. ع.؛ طهماسبی بروجنی م. ع. (۱۳۹۴). تحلیل خطر لرزه‌ای و تهیه طیف خطر یکسان برای مناطق مختلف شهر کرمان. *نشریه علمی- پژوهشی مهندسی سازه و ساخت*، ۲ (۲)، ۴۳-۵۱.