

پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر اردبیل با استفاده از تحلیل خطر قطعی و سیستم فازی

شاهین خدادادی جید^۱، سعید پورزینلی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان

۲- استاد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان

pourzeynali@guilan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۱۸

چکیده

پهنه‌بندی و تحلیل خطر لرزه‌ای ابزاری قدرتمند و دارای اطلاعات مفید و ارزشمندی برای تصمیم‌گیری‌ها است. در این مطالعه پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر اردبیل در سطح سنگ بستر لرزه‌ای با استفاده از روش تحلیل خطر قطعی و سیستم استنتاج فازی انجام گرفته است. هدف از تحلیل خطر زمین‌لرزه، برآورد پارامترهای قدرتمند زمین در یک بازه زمانی و در محلی خاص است. در تمامی مراحل انجام تحلیل خطر لرزه‌ای، عدم قطعیت‌هایی وجود دارد که استفاده از روش‌های مناسب در بررسی خطر زمین‌لرزه را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. استفاده از منطق فازی می‌تواند شیوه‌ای مناسب برای تحلیل خطرات زمین‌لرزه باشد که با یک روند ساده و انعطاف‌پذیر نتایج خوبی را در مدت زمان کوتاه ارائه می‌دهد. ایران یکی از زلزله‌خیزترین کشورهای دنیا محسوب می‌شود و شهرهای آن در رابطه با این پدیده طبیعی آسیب‌های فراوان دیده است. شهر اردبیل با مختصات $38/25$ شمالی و $48/30$ شرقی، مرکز استان اردبیل و در شمال غرب ایران قرار دارد. به دلیل قرارگیری در میان چندین گسل مهم با سابقه ویرانگری تاریخی بسیار، شناخت و بررسی لرزه‌ای این منطقه امری لازم و ضروری است. برای این منظور، گسل‌های موجود در شعاع 150 کیلومتری از شهر به همراه تاریخچه لرزه‌خیزی آن‌ها مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و 20 چشمه بالقوه زمین‌لرزه برای انجام تحلیل خطر انتخاب شدند. تحلیل خطر لرزه‌ای ابتدا به روش قطعی مرسوم و سپس با استفاده از سیستم استنتاج فازی برای مراکز هر مش به ابعاد 1000×1000 متر که روی شهر اردبیل تعیین شده، برآورد شده است. در تحلیل خطر با استفاده از روش قطعی مرسوم از 5 رابطه کاهندگی که با بررسی و مطالعه فراوان انتخاب شدند برای تعیین مقادیر بیشینه شتاب و طیف پاسخ شتاب استفاده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده به روش قطعی مرسوم، تغییرات بیشینه شتاب افقی زمین بین $0.24g$ و $0.43g$ است. تغییرات حاصل از برآورد خطر لرزه‌ای با استفاده از سیستم استنتاج فازی نیز بین $0.25g$ و $0.43g$ است. در نتیجه بیشینه شتاب افقی زمین $0.43g$ می‌باشد که حاصل از چشمه‌ای است که گسل اصلی آن گسل بزقوش با بزرگای گشتاوری 7.21 است.

واژگان کلیدی: تحلیل خطر قطعی، منطق فازی، پهنه‌بندی لرزه‌ای، بیشینه شتاب افقی، شهر اردبیل.

۱- مقدمه

زمین‌لرزه‌ها یکی از زیان‌بارترین بلایای طبیعی هستند که ماهیتی غیرقابل پیش‌بینی دارند و گریز از آن‌ها ممکن نیست. هر ساله زلزله‌های فراوانی در سراسر جهان روی می‌دهد که با خسارات سنگین و تلفات جانی و مالی بسیاری همراه است، از همین رو بشر را وادار به پژوهش و مطالعاتی درباره این پدیده طبیعی کرده است. تحلیل خطر زمین‌لرزه روشی برای تخمین زلزله‌های آینده است که میزان پارامترهای جنبش‌های قدرتمند زمین را در اختیار پژوهشگران و مهندسان قرار می‌دهد. انجام تحلیل خطر زمین‌لرزه برای مناطق مختلف کشور، از مهم‌ترین راهکارها برای برنامه‌ریزی بهتر در توسعه‌های شهری در آینده است. بر اساس ژرفا، زمین‌لرزه‌ها را می‌توان به سه دسته کم عمق، متوسط و عمیق طبقه‌بندی کرد که زلزله‌های با ژرفای کمتر از ۶۰ کیلومتر را کم عمق، زلزله‌های با ژرفای بین ۶۰ و ۳۰۰ کیلومتر از نوع میانی یا متوسط و زلزله‌های با ژرفای بیش از ۳۰۰ کیلومتر از نوع عمیق هستند. زلزله‌های ایران از نوع کم عمق و مربوط به مناطق بین صفحه‌ای است و همچنین ایران در بین دو صفحه تکتونیکی عربستان در جنوب و اوراسیا در شمال واقع است [1].

مهم‌ترین عامل زمین‌ساختی ایجاد کننده زمین‌لرزه‌ها، گسل‌ها هستند و بر اساس این که کدام یک از دیواره‌های گسل بر دیواره دیگر بلغزد، سازوکارهای گسلش متفاوت خواهد بود. ارزیابی خطر زمین‌لرزه، مانند بسیاری از موضوعات دیگر زلزله‌شناسی، به دلیل تنوع عوامل موثر در وقوع زمین‌لرزه‌ها، مبحث پیچیده‌ای است. وجود عدم قطعیت‌ها که ناشی از مبهم بودن و ناکامل بودن داده‌های مرتبط است، استفاده از روش‌های مناسب در بررسی خطر زمین‌لرزه را اجتناب‌ناپذیر می‌کند [2]. استفاده از روش فازی در حل اینگونه مسائل می‌تواند شیوه‌ای مناسب برای برآورد نتایج خروجی باشد. از روش سیستم فازی در موضوعات مختلف زلزله‌شناسی استفاده می‌شود. از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از منطق فازی برای تخمین شدت زلزله بر اساس سوابق خسارت وارده بر ساختمان [3]، استفاده از منطق فازی روی بزرگای زمین‌لرزه برای تعیین رابطه بازگشت زمین‌لرزه [4]، پیش‌بینی خطر زمین‌لرزه [5]، ارزیابی خسارت زلزله بر اساس

منطق فازی و شبکه‌های عصبی [6]، مدل استنتاج فازی برای تحلیل خطر زلزله [7]، ارزیابی سریع خطر زلزله به صورت بصری برای ساختمان‌های موجود با استفاده از منطق فازی [8]، ارزیابی عدم قطعیت مربوط به خطر لرزه‌ای با استفاده از تحلیل فازی [9]، تحلیل ریسک زلزله با استفاده از سیستم استنتاج‌گر فازی و کاربرد آن در مطالعات بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود [10]، کنترل بهینه ساختمان‌های مجهز به میراگر MR با استفاده از شبکه عصبی فازی ANFIS [11]، ارائه یک مدل برآورد خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی بر مبنای تئوری مجموعه‌های فازی [12]، منطق فازی مبتنی بر روابط کاهندگی حاصل از سوابق جنبش قدرتمند زلزله [13] اشاره نمود. کشور ایران در کمربند آلپ-هیمالیا واقع شده است که این کمربند بعد از حاشیه اقیانوس آرام (حلقه آتش) زلزله‌خیزترین ناحیه کره زمین می‌باشد. خاورمیانه به طور کلی، و ایران به طور خاص، از نظر آسیب‌پذیری و ریسک زلزله در یکی از خطرناکترین نواحی جهان قرار دارد. با توجه به قرارگیری منطقه مورد مطالعه (شهر اردبیل) در مجاورت گسل‌های لرزه‌خیز، مطالعات و تحلیل خطر زمین‌لرزه این منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پیش از این مطالعات دیگری برای برآورد خطر زمین‌لرزه در ایران انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به پژوهش توکلی و غفوری-آشتیانی در سال ۱۹۹۹ اشاره کرد که با استفاده از روش تحلیل خطر احتمالاتی برای گستره ایران، بیشینه شتاب زمین را برای دوره‌ی بازگشت ۷۵ و ۴۷۵ ساله حساب کرده‌اند و از آنجا که نقشه پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای را برای کل ایران تهیه کرده‌اند، پس می‌توان بر اساس داده‌های آن شهر اردبیل را در منطقه‌ای با خطر بالا قرار دارد [14]. همچنین آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) نیز شهر اردبیل را در منطقه با خطر نسبی زیاد قرار داده است [15]. بفری و همکاران در سال ۱۳۹۳ نیز به منظور ارزیابی سطوح جنبش نیرومند روی سنگ بستر برای بیشینه شتاب و مقادیر طیفی در پهنه ایران، برآورد خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی اصلاح شده انجام داده‌اند، که بر اساس نتایج مطالعه آن‌ها برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال در سنگ بستر، مقدار بیشینه شتاب در شهر اردبیل بین ۰٫۲۵-۰٫۱۵ و ۰٫۳۵-۰٫۲۵ برحسب g برآورد شده است [16].

زمین‌لرزه‌های ویرانگر قبل از سده بیستم (زمین‌لرزه‌های تاریخی) نیز می‌توان به زمین‌لرزه ۱۵۹۳ میلادی سراب (۱۰۰۱ هجری قمری) با بزرگی موج سطحی $M_s=6.1$ در مختصات $37,80^\circ$ شمالی و $47,50^\circ$ شرقی؛ زمین‌لرزه ۱۸۴۴ میلادی میانه - گرمرد با بزرگی موج سطحی $M_s=6.9$ در مختصات $37,40^\circ$ شمالی و $48,00^\circ$ شرقی؛ زمین‌لرزه ۱۸۶۳ میلادی هیر - اردبیل به بزرگی موج سطحی $M_s=6.1$ در مختصات $38,20^\circ$ شمالی و $48,60^\circ$ شرقی؛ زمین‌لرزه ۱۸۷۹ میلادی بزقوش - گرمرد به بزرگی موج سطحی $M_s=6.7$ در مختصات $37,80^\circ$ شمالی و $47,90^\circ$ شرقی؛ و زمین‌لرزه ۱۸۹۶ میلادی خلخال - سنگ‌آباد به بزرگی موج سطحی $M_s=6.7$ و مختصات $37,80^\circ$ شمالی و $48,40^\circ$ شرقی اشاره نمود [18].

برای تحلیل خطر زمین‌لرزه ابتدا لازم است که مطالعه‌ای برای شناخت و موقعیت گسل‌ها در ناحیه مورد نظر انجام شود. به همین منظور با استفاده از نقشه‌های گسل‌های فعال منطقه مانند نقشه‌های گسل‌های فعال ایران که توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله [19]، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور [20]، پژوهش‌های مانوئل بربریان [21-22] ارائه شده، نقشه‌ای از گسل‌های مهم منطقه در شعاع ۱۵۰ کیلومتری از شهر استخراج شده که رو مرکز مه لرزه‌ای بسیاری از زمین‌لرزه‌های تاریخی و زمین‌لرزه‌های دستگاهی روی این گسل‌ها هماهنگ است. شکل (۱) موقعیت این گسل‌ها را در گستره مورد مطالعه نشان می‌دهد.

۳- شبکه‌بندی منطقه مورد نظر

ارزیابی خطر لرزه‌ای مانند بسیاری دیگر از مسائل در لرزه‌شناسی به دلیل تنوع پارامترهای تأثیرگذار در وقوع زلزله، مسئله پیچیده‌ای است [10]. تهیه نقشه پهنه‌بندی خطرات برای هر شهری می‌تواند ابزاری مفید و قدرتمند برای تصمیم‌گیری‌ها برای متخصصان و کارشناسان به منظور تحلیل خطرات مختلف باشد و اطلاعات لازم را در اختیار سازمان‌ها و برنامه‌ریزان برای توسعه شهری قرار دهد. در پژوهش حاضر، به منظور پهنه‌بندی و برآورد مقادیر بیشینه شتاب افقی زمین در سطح سنگ‌بستر

در مطالعه حاضر، پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر اردبیل با استفاده از تحلیل خطر قطعی و سیستم فازی انجام گرفته است. سیستم استنتاج فازی در این مطالعه دارای پارامترهای ورودی بزرگای زمین‌لرزه و فاصله چشمه از ساختگاه است و پارامتر خروجی آن بیشینه شتاب افقی زمین است. نتیجه این مطالعه تعیین بیشینه شتاب افقی زمین در نقاط مختلف از سطح شهر است که ناشی از وقوع زمین‌لرزه‌ای با بزرگی بیشینه در اثر جنبش گسلی که دارای بیشترین خطر نسبت به منطقه مورد نظر است.

۲- معرفی ساختگاه مورد مطالعه

شهر اردبیل با جمعیتی بالغ بر حدود ۵۳۰ هزار نفر، مرکز استان اردبیل و در شمال غرب ایران قرار دارد. این استان از شمال و شرق با کشور آذربایجان، از شرق با استان گیلان، از غرب با استان آذربایجان شرقی و از جنوب با استان زنجان هم مرز است و توسط گسل‌های لرزه‌ای مهم و فراوانی، مانند گسل بزقوش، گسل تالش، گسل شمال تبریز با سابقه‌های ویرانگری بسیاری احاطه شده است که بر اساس شواهد ثبت شده تحت اثر زلزله‌های تاریخی آسیب‌های فراوانی دیده است. به عنوان نمونه؛ روزنامه ایران (۸ فوریه ۱۸۹۶) گزارش داد، در اثر وقوع زلزله ۱۸۹۶، دو روستا توسط یک شکاف زمین بلعیده شده‌اند: زمین گسسته شد و دو نفری را که بین دو روستا در حرکت بودند تا گردن درون خود گرفت و با بسته شدن این گسستگی هر دو آن‌ها کشته شدند. بعد از گذشت دو روز، مردی که از منطقه عبور می‌کرد، متوجه شد که دو سر از زمین بیرون آمده است. سپس اجساد بیرون آورده شده و در مکانی دیگر دفن شدند. در این زمین‌لرزه کوهی بی آب گسسته شد و از آن آب بیرون آمد (روزنامه ایران، شماره ۸۷۴، شنبه ۸ فوریه ۱۸۹۶، تهران، بربریان، ۱۹۷۶) [17]. این منطقه از نظر تحلیل خطرات زمین‌لرزه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که از یک سو به دلیل وجود گسل‌های بنیادی و وقوع زمین‌لرزه‌های تاریخی متعدد و از سوی دیگر به دلیل وجود شهرستان‌های مهمی مانند شهر بزرگ اردبیل، ساخت و سازهای صنعتی و بناهای باستانی بسیار، که باقیمانده از ادوار گذشته هستند، است. مهم‌ترین زمین‌لرزه ویرانگر در این استان، زمین‌لرزه ۱۳۷۵ شمسی سریع بوده است. همچنین از

۴- تحلیل خطر لرزه‌ای

هدف از تحلیل خطر زمین‌لرزه، پیش‌بینی میزان دامنه جنبش‌های قدرتمند زمین در دوره مشخصی از زمان در یک سایت مشخص است [24]. تحلیل خطر زلزله به تخمین کمی خطرات لرزش زمین در یک محل خاص مربوط می‌شود و به صورت قطعی و احتمالاتی بررسی می‌شود [25]. روش قطعی مبتنی بر تشخیص موثرترین چشمه لرزه‌ها است، که فرض می‌شود بیشترین اثر و خطر زمین‌لرزه را نسبت به سایر چشمه‌ها بر ساختگاه مورد نظر اعمال می‌کند و بر اساس ویژگی‌های آن پارامترهای قدرتمند زمین محاسبه می‌شوند. همچنین روش احتمالاتی، بزرگی همه زلزله‌های ممکن را (معمولاً بیشتر از یک مقدار حداقل) روی همه چشمه‌های موجود در همه فواصل ممکن را در نظر می‌گیرد و یک احتمال کلی از ترکیب نتایج را بدست می‌دهد. در مطالعه حاضر، به منظور برآورد خطر لرزه‌ای در شهر اردبیل از روش تحلیل خطر قطعی استفاده شده است. تجزیه و تحلیل خطر زمین‌لرزه به روش قطعی برای ارزیابی و طراحی سازه‌هایی به کار برده می‌شود که شکست آن‌ها عواقب فاجعه آمیزی داشته و همان‌طور که گفته شد توسط منبع لرزه‌ای اداره می‌شود که بیشترین تهدید را برای سایت با بزرگترین حرکت تخمین زده شده بر عهده دارد. تحلیل خطر زمین‌لرزه با روش قطعی با چهار مرحله به‌صورت زیر قابل بیان است:

۱. تعیین چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه

۲. تعیین بیشینه بزرگای زلزله محتمل که می‌توان از هر چشمه انتظار داشت با نزدیک‌ترین فاصله ساختگاه از هر چشمه لرزه‌ای

۳. انتخاب مناسب‌ترین رابطه کاهندگی سازگار با ساختگاه مورد بررسی

۴. در نهایت تعیین بیشینه شتاب افقی زمین و طیف شتاب برای منطقه مورد نظر [26].

۴-۱- تعیین چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه

شناسایی چشمه‌های لرزه‌ای بخش عمده و مهم یک تحلیل خطر زمین‌لرزه را تشکیل می‌دهد و باید تمام چشمه‌های لرزه‌ها که امکان ایجاد خرابی در سایت مدنظر را دارند، شناسایی شوند. این شناسایی‌ها بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی معتبر، بازدیدهای

لرزه‌ای، شهر به ۸۶ بخش به ابعاد 1000×1000 متر تقسیم شده است. شکل (۲) محدوده و موقعیت این ۸۶ بخش را مشخص می‌کند.

شکل ۱. نقشه گسل‌های فعال واقع در شعاع ۱۵۰ کیلومتری از مرکز شهر اردبیل

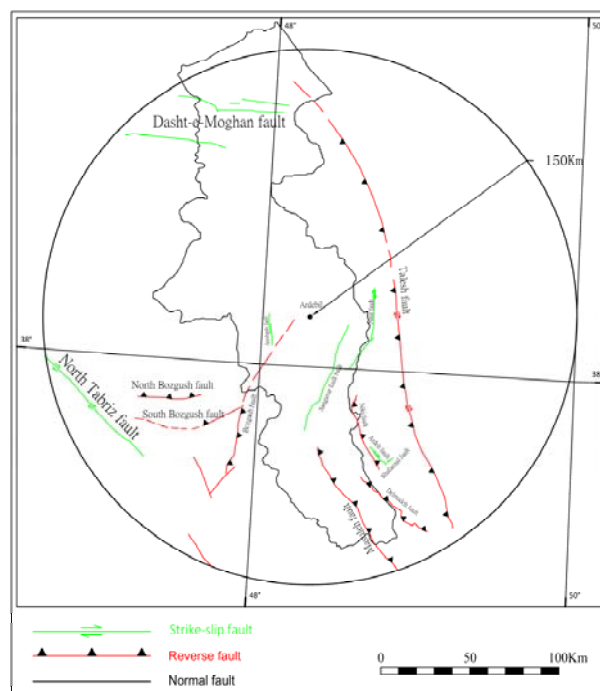


Fig. 1. Map of active faults located 150 km from the center of Ardabil city

شکل ۲. شبکه‌بندی شهر اردبیل به ابعاد $1000m \times 1000m$ و شماره شبکه‌ها

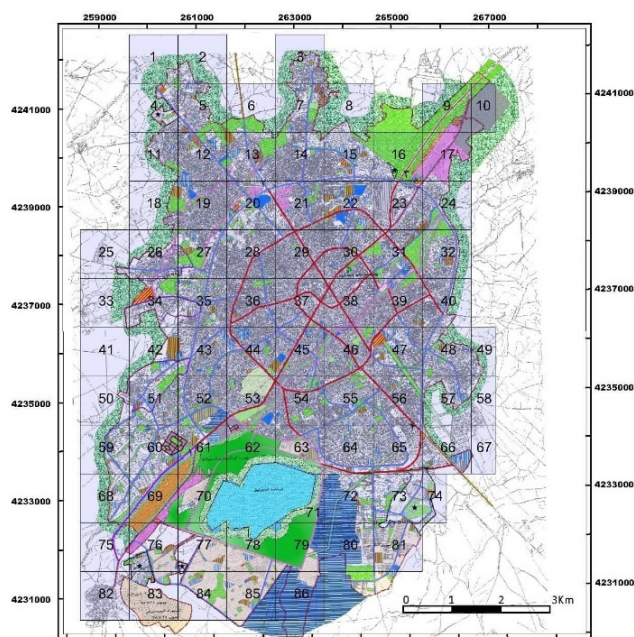


Fig. 2. Zoning of Ardabil city with dimensions of $1000m \times 1000m$ and the number of the zones

شکل ۴. موقعیت قرارگیری چشمه‌های لرزه‌زا با وضوح بهتر در گستره مورد مطالعه

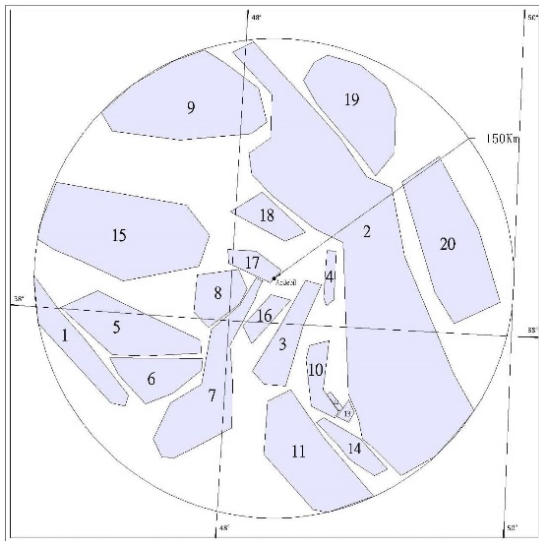


Fig. 4. Location of seismic sources in the area under study

۴-۲- برآورد بیشینه زمین‌لرزه قابل انتظار از هر چشمه لرزه‌ای و تعیین کمترین فاصله آن‌ها از ساختمان مورد نظر

مقدار بزرگای قابل انتظار برای هر یک از چشمه‌های لرزه‌زا با توجه به بیشترین مقدار بزرگای به دست آمده بین بزرگای حاصل از روابط تجربی، و کاتالوگ زمین‌لرزه‌های روی داده در منطقه مورد نظر تعیین می‌شود و بزرگترین این دو به عنوان بیشینه بزرگای زمین‌لرزه یا زمین‌لرزه کنترلی برای هر یک از این چشمه‌ها در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش به عنوان نمونه گسل شمال تبریز دارای زلزله تاریخی بیشتری نسبت به بزرگای به دست آمده از روابط تجربی است، که به همین منظور مقدار بزرگای حاصل از زلزله تاریخی این گسل به عنوان بزرگای زمین‌لرزه کنترلی در نظر گرفته شده است. جدول (۱) حداکثر بزرگای گشتاوری ایجاد شده توسط هر یک از این چشمه‌های لرزه‌زا را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که در جدول (۱) چشمه‌های شماره ۱۵ تا ۲۰ فاقد گسل شناخته شده‌ای هستند، به همین منظور برای این چشمه‌ها مقدار زمین‌لرزه کنترلی بر اساس بیشترین مقدار بزرگای حاصل از زمین‌لرزه‌های روی داده در داخل محدوده هر یک از آن‌ها با توجه به شکل (۳) تعیین شده است.

محلی و همچنین از تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی و زلزله‌شناسی به دست می‌آید. برای این منظور، ابتدا مطابق شکل (۱) گسل‌های فعال منطقه تعیین می‌شود. سپس با توجه به کاتالوگ زلزله‌های دستگاهی و تاریخی، مرکز سطحی کلیه این زلزله‌ها روی نقشه منطقه پیاده‌سازی می‌شود (شکل ۳). از آنجایی که پراکنش و تراکم این زلزله‌ها روی سطوح مختلفی قرار گرفته است، پس چشمه‌های لرزه‌زا در مطالعه حاضر به صورت سطحی انتخاب می‌شوند. آنگاه با یک قضاوت علمی، محدوده هر چشمه را می‌توان به صورت تقریبی، مطابق آنچه در شکل (۳) آمده است، تعیین کرد. بدیهی است که چگونگی انتخاب این چشمه‌ها به لحاظ شکل و تعداد بر روی نتایج حاصل تاثیر خواهد گذاشت که از این تاثیر در تحقیق حاضر صرف نظر شده است. البته بیشتر این چشمه‌ها در اطراف گسل‌های فعال قرار دارند ولی در محل بعضی از چشمه‌ها گسل شناخته شده‌ای وجود ندارد. به این ترتیب در تحقیق حاضر، تعداد ۲۰ چشمه سطحی برای محدوده شهر اردبیل، تعیین شده است که در شعاع ۱۵۰ کیلومتری از مرکز شهر (مرکز شهر نقطه‌ای با مختصات $38^{\circ}25'$ درجه شمالی و $48^{\circ}30'$ درجه شرقی در نظر گرفته شده است) قرار گرفته‌اند.

شکل ۳. موقعیت زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی به همراه گسل‌های مهم لرزه‌ای در شعاع ۱۵۰ کیلومتری مرکز شهر اردبیل

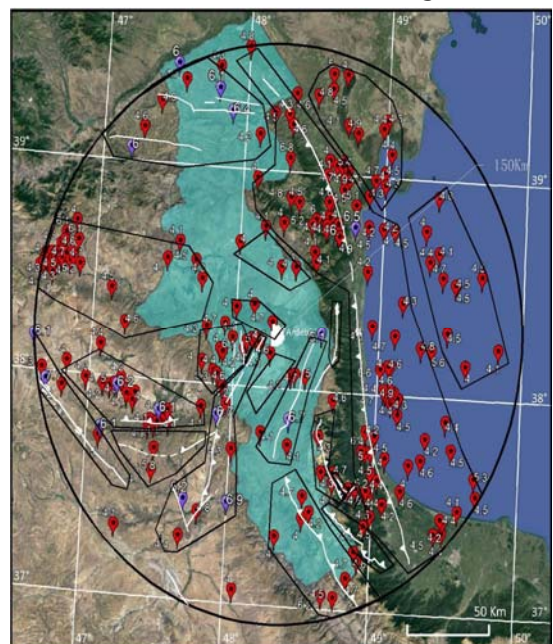


Fig. 3. Location of historical and instrumental earthquakes along with important seismic faults within a radius of 150 km from the center of Ardabil city

جدول ۱. بیشینه بزرگای گشتاوری محتمل هر چشمه

Source Number	Fault name	Fault Type	length (Km)	M _{Max}
1	North Tabriz fault	Strike Slip	155	7.61
2	Talesh fault	Reverse	282	7.59
3	Sangavar fault	Strike Slip	65	6.7
4	Neor fault	Strike Slip	30	6.25
5	North Bozgush fault	Reverse	61	6.72
6	South Bozgush fault	Reverse	70	6.80
7	Bozgush fault	Reverse	145	7.21
8	Atashgah fault	Strike Slip	20.3	6.1
9	Dasht-e-Moghan fault	Strike Slip	100	6.93
10	Niki Fault	Reverse	44	6.53
11	Masuleh fault	Reverse	92	6.95
12	Ardeh fault	Strike Slip	15	5.89
13	Shafaroud fault	Strike Slip	14	5.86
14	Delmadeh Fault	Reverse	53.7	6.64
15	-	-	-	6.1
16	-	-	-	4.3
17	-	-	-	4.7
18	-	-	-	4.1
19	-	-	-	5
20	-	-	-	4.8

Table 1. Probable Maximum moment magnitude of each source

کمترین فاصله نیز براساس کمترین فاصله ممکن میان ساختگاه مورد نظر (در اینجا شبکه مورد نظر) از محدوده سطحی هر یک از چشمه‌ها تعیین می‌شود.

۴-۳- تعیین روابط کاهندگی

یکی از عناصر کلیدی در برآورد خطر زمین‌لرزه در یک ساختگاه، انتخاب روابط کاهندگی است. براساس یافته‌های تحقیقاتی، انتخاب روابط کاهندگی بیشترین عدم قطعیت نهایی در برآورد خطر در ساختگاه را رقم می‌زند. بنابراین، برخورد مناسب با این عدم قطعیت که جنس آن از نوع عدم قطعیت ذاتی است، کاملاً ضروری است [34]. با استفاده از روابط کاهندگی موردنظر، پارامتر حرکتی چشمه لرزه‌زا در محل سایت تعیین می‌شود، که حداقل سه رابطه کاهندگی باید برای بکارگیری در تحلیل خطر

در این مطالعه از ۶ رابطه تجربی ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴)، زارع (۱۹۹۹)، مهاجر- اشجعی و نوروزی (۱۹۷۸)، نوروزی (۱۹۸۵)، سلمونز (۱۹۸۶)، آمبرسز و ملویل (۱۹۸۲) که بر اساس طول گسیختگی گسل (L_r) ارائه شده‌اند، برای محاسبه بزرگای استفاده شده است [18, 27-31]. طول گسیختگی گسل خود درصدی از طول کلی گسل است، و معمولاً در حدود ۳۰ تا ۱۰۰ درصد طول کل گسل در نظر گرفته می‌شود. زارع با بررسی روی ۲۳ زمین‌لرزه ایران، عدد ۳۷ درصد [28] و اشجعی حدود ۵۰ درصد را برای طول گسیختگی گسل پیشنهاد کرده‌اند [29]. در این مطالعه، برای رابطه زارع (۱۹۹۹) [28] از ضریب طول گسیختگی ۳۷ درصد، برای رابطه مهاجر- اشجعی و نوروزی (۱۹۷۸) [29] ضریب ۵۰ درصد، برای رابطه نوروزی (۱۹۸۵) [30]، ۳۰ درصد برای گسل‌های با طول بیش‌تر از ۳۰۰ کیلومتر و ۵۰ درصد برای گسل‌های با طول کمتر از ۳۰۰ کیلومتر استفاده شده است [32]. همچنین برای سایر رابطه‌ها طول گسیختگی گسل ۳۷ درصد طول کلی گسل در نظر گرفته شده است. از رابطه اردیک و همکاران (۲۰۱۲)، ۸ نیز در صورت نیاز برای تبدیل بزرگای امواج سطحی به بزرگای گشتاوری استفاده شده است [33]. بعد از این مرحله، برای میانگین‌گیری از ۶ رابطه تجربی بالا از روش درخت‌منطقی ۹ استفاده شد. برای این منظور، با درنظر گرفتن شرایط بومی و همخوانی بیشتر، به‌ترتیب از ضرایب وزنی ۰٫۱۵، ۰٫۱۹، ۰٫۱۷، ۰٫۱۹، ۰٫۱۵، ۰٫۱۵ و ۰٫۱۵ برای این روابط تجربی استفاده شد. سرانجام با مقایسه مقدار بزرگای به دست آمده بین بزرگای حاصل از روابط تجربی (در صورتی که چشمه لرزه‌زا دارای گسل فعال باشد)، و کاتالوگ زمین‌لرزه‌های روی داده در منطقه موردنظر (برای همه چشمه‌ها)، مقدار بیشینه بزرگای قابل انتظار تعیین شد. جدول (۱) نتایج نهایی برای هر چشمه را نشان می‌دهد (که بر اساس گسل فعال مربوط به هر چشمه و یا کاتالوگ زلزله‌ها به‌دست آمده است).

6. Ambraseys & Melville (1982)

7. Rupture Length

8. Erdik et al, 2012

9. Logic Tree

1. Wells & Coppersmith (1994)

2. Zare (1999)

3. Mohajer Ashjai and Norouzi (1978)

4. Norouzi (1985)

5. Slemmons (1986)

به دست دهد. رابطه کاهندگی کاله و همکاران در سال ۲۰۱۵ برای زلزله‌های ایران و ترکیه بدست آمده و این رابطه با همکاری دو تن از پژوهشگران ترکیه با دو پژوهشگر از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ایران تهیه شده است. رابطه کاهندگی فرج‌پور و همکاران و همچنین رابطه کاهندگی درزی و همکاران در سال ۲۰۱۹، براساس سوابق جنبش نیرومند برای ایران ارائه شده‌اند که با توجه به بومی بودن این روابط و در نتیجه استفاده از داده‌های زمین‌لرزه‌ای مربوط به ایران در برآورد آن، این روابط می‌توانند پاسخ‌های مناسبی برای کاهندگی جنبش شدید زمین به دست دهند [35-39].

همچنین به دلیل اینکه روابط کاهندگی نسل جدید NGA دارای پیچیدگی و پارامترهای بیشتری نسبت به سایر روابط کاهندگی هستند و کاربران به‌طور معمول با موقعیت‌هایی روبرو می‌شوند که در آن برخی از پارامترهای ورودی مورد نیاز ناشناخته هستند، برای تعیین بعضی از این پارامترهای مجهول از روابط کمکی پیشنهاد شده توسط کاکلامانوس و همکاران (۲۰۱۱) استفاده شده است [40].

۴-۴- محاسبه بیشینه شتاب افقی زمین و طیف پاسخ شتاب در سنگ بستر

همانگونه که پیشتر نیز در بخش ۴-۱ تشریح شد در این پژوهش تعداد ۲۰ چشمه لرزه‌ای سطحی در شعاع ۱۵۰ کیلومتری از مرکز شهر اردبیل (نقطه‌ای با مختصات ۳۸/۲۵ درجه شمالی و ۴۸/۳۰ درجه شرقی) تعیین شده است. از آنجایی که، هدف از این پژوهش پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر اردبیل با استفاده از تحلیل خطر قطعی است و در روش قطعی چنانچه تحلیل خطر برای نقاط مختلف انجام شود لازم است که چشمه‌های لرزه‌زا هر بار براساس شعاع خاصی (در این پژوهش شعاع ۱۵۰ کیلومتری انتخاب شده است) از مرکز شبکه مورد نظر تعیین شوند و این عمل بسیار وقت‌گیر، و پرهزینه خواهد بود و دقت چندان هم به نتایج حاصل اضافه نخواهد کرد. پس با توجه به اینکه در تحلیل خطر قطعی تنها یک چشمه لرزه‌زا به‌عنوان پرخاطرترین

استفاده شود. برای منظور کردن عدم قطعیت انتخاب روابط، استفاده از درخت منطقی راهکار مناسبی است [34]. با توجه به تعداد بسیار زیاد این روابط که گستره زیادی رو شامل می‌شوند، پس از بررسی‌های انجام شده و سازگاری آن‌ها با منطقه موردنظر، تعدادی از این روابط که شامل روابط بومی ایران، روابط منطقه‌ای و روابط کاهندگی نسل جدید (NGA) هستند، برای این پژوهش انتخاب شده‌اند که از این روابط کاهندگی برای تعیین بیشینه شتاب افقی زمین (PGA) و همچنین برای تعیین طیف پاسخ شتاب استفاده شده است. شکل (۵) روابط کاهندگی استفاده شده در این مطالعه را به همراه ضرایب مشارکت درخت منطقی نشان می‌دهد.

شکل ۵. روابط کاهندگی استفاده شده برای برآورد بیشینه شتاب زمین

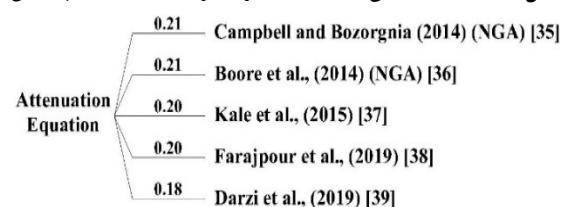


Fig. 5. Attenuation relationships used in this study to estimate the peak ground acceleration (PGA)

برای تعیین جواب نهایی از ۵ رابطه بالا، از روش درخت منطقی با ضرایب مشارکت به ترتیب ۰٫۲۱ ، ۰٫۲۱ ، ۰٫۲ ، ۰٫۲ ، ۰٫۱۸ و استفاده شده است. دلیل اختصاص این وزن‌ها در درخت منطقی بخاطر درنظر گرفتن پارامترها و شرایط بیشتر این روابط کاهندگی برای برآورد پارامترهای جنبش قدرتمند زمین است که عوامل موثر بیشتری در روابط میرایی درنظر گرفته‌اند. روابط کاهندگی کمپل و بزرگنیا و همچنین بور و همکاران در سال ۲۰۱۴، روابط کاهندگی نسل جدید (NGA) و ارائه شده برای جهان هستند. زلزله‌های مورد استفاده در این روابط، از نوع کم عمق بوده و اینکه بیشتر زلزله‌های ثبت شده در پهنه ایران نیز در رزفای کمی از زمین رخ داده‌اند و همچنین با توجه به استفاده از چند داده زمین لرزه مربوط به ایران در برآورد آن، این روابط می‌تواند پاسخ‌های مناسبی برای جنبش‌های شدید زمین در ایران

شکل ۶. پهنه‌بندی بیشینه شتاب افقی زمین در مرکز هر کدام از شبکه‌های مربوط به شهر اردبیل در سنگ بستر با استفاده از روابط کاهندگی

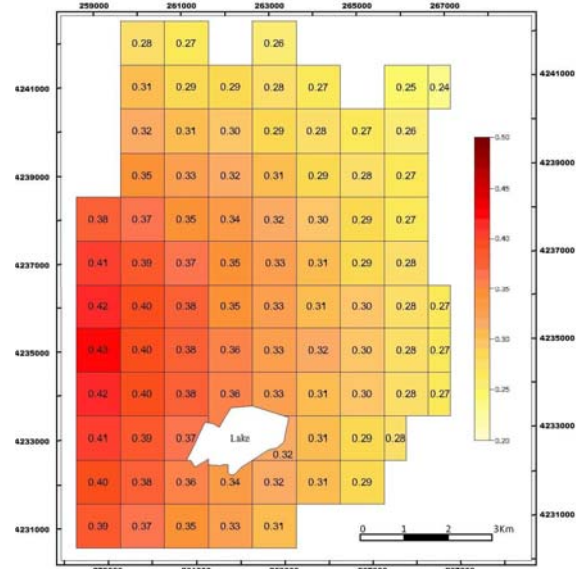


Fig. 6. Horizontal peak ground acceleration zoning in the center of each mesh for Ardabil city in bedrock level using Attenuation relationships

همچنین برای نمونه طیف‌های شتاب در سطح زمین با استفاده از روابط کاهندگی برای نقاطی از شهر که سرعت موج برشی آن‌ها مشخص بود، تعیین شد. موقعیت و مختصات این نقاط در شهر اردبیل شامل اراضی شهرک سینا؛ و نقاط با مختصات ۳۸،۲۵ درجه شمالی - ۴۸،۳۰ درجه شرقی؛ ۳۸،۲۳ درجه شمالی - ۴۸،۲۶ درجه شرقی با سرعت موج برشی به ترتیب ۲۳۸، ۳۲۸، ۳۳۱ و ۳۱۲ متر بر ثانیه هستند. شکل (۷) نمودار این طیف‌های پاسخ شتاب را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، بیشترین مقادیر شتاب طیفی برای این نقاط معمولاً در پریودهای بین ۰.۲-۰.۴ ثانیه روی می‌دهد.

شکل ۷. طیف‌های پاسخ شتاب به دست آمده برای نقاط با سرعت موج برشی مشخص در سطح شهر اردبیل (شبکه‌های به شماره ۳، ۱۰، ۴۵، ۵۰، و ۸۶ در شکل ۲)

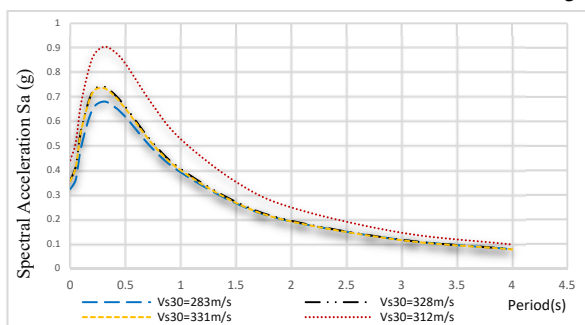


Fig. 7. Acceleration response spectra obtained for different zones of the city (Zone numbers 3, 10, 45, 50 and 86 in Fig. 2)

چشمه انتخاب می‌شود و بیشتر این چشمه لرزه‌ها نیز در فاصله نزدیکی از سایت نسبت به سایر چشمه‌ها قرار دارد، و همچنین با توجه به بحث پهنه‌بندی و فاصله خیلی کم نقاط در سطح شهر اردبیل و موقعیت گسل‌های منطقه، این چشمه‌ها فقط برای شعاع ۱۵۰ کیلومتری از مرکز شهر اردبیل تعیین شده است و در بحث پهنه‌بندی لرزه‌ای نیز از موقعیت همین چشمه‌های لرزه‌ها برای کلیه شبکه‌ها استفاده خواهد شد.

در نهایت شتاب افقی زمین و طیف پاسخ شتاب با استفاده از روابط کاهندگی به دست می‌آیند. با توجه به نتایج به دست آمده از روابط کاهندگی نسبت به نقطه مرکز شهر، چشمه شماره ۷ با بزرگای گشتاوری کترلی ۷،۲۱ به عنوان موثرترین چشمه لرزه‌ها نسبت به سایر چشمه‌های موجود برای شهر اردبیل تعیین شد که اصلی‌ترین گسل آن گسل بزقوش است [41]. در اینجا لازم به یادآوری است که در جدول (۱) قدرت زلزله‌خیزی هر گسل یا چشمه تعیین شده است، و اینکه کدام یک از این چشمه‌ها برای مرکز شهر اردبیل پرخطرتر است، جداگانه پس از انجام تحلیل خطر برای این نقطه چشمه شماره ۷ تعیین شد که جزئیات آن در مرجع [41] آمده است. در ادامه پس از تعیین پرخطرترین چشمه لرزه‌ها اقدام به محاسبه بیشینه شتاب افقی زمین نسبت به مرکز تمام شبکه‌هایی که روی شهر اردبیل تعیین شده بود (شکل ۲)، براساس چشمه شماره ۷ اقدام شد. کمترین فاصله نیز از مرکز هر یک از شبکه‌ها تا نزدیک‌ترین نقطه به محدوده مشخص شده توسط چشمه شماره ۷ در نظر گرفته شده است. تغییرات بیشینه شتاب افقی زمین برای نقاط مختلف شهر بین ۰.۲۴g و ۰.۴۳g به دست آمده است که کمینه شتاب در نواحی شمال شرقی شهر و بیشینه شتاب مورد انتظار در نواحی غربی شهر است. شکل (۶) پهنه‌بندی بیشینه شتاب افقی زمین در سطح سنگ بستر لرزه‌ای برحسب g (شتاب ثقل) برای نقاط مختلف شهر اردبیل را نشان می‌دهد.

۵- منطق فازی

به ازای هر فاصله و بزرگای مشخص چه میزان بیشینه شتاب ایجاد می‌شود و در کدام فواصل نیاز به تعریف توابع فازی است و با تغییرات توابع عضویت نتایج مورد نظر در خروجی ایجاد می‌شوند.

شکل ۸، نتایج میانگین ۵ رابطه کاهندگی مربوط به بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب فاصله و بزرگای مشخص

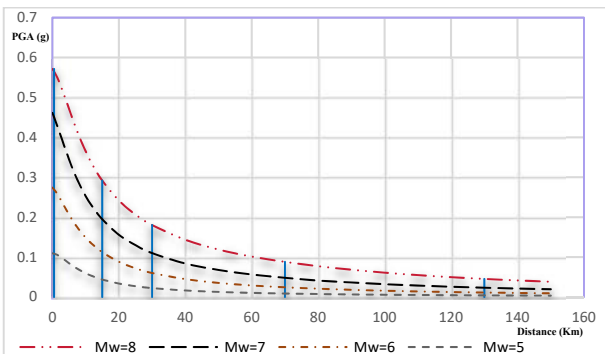


Fig. 8. Average results of 5 attenuation relationships for the horizontal peak ground acceleration response versus distance and specific magnitudes

۵-۱- تعریف قواعد و قوانین استنتاج فازی

هسته یک سیستم استنتاج فازی مجموعه‌ای از قوانین و دستورات "اگر- آنگاه" است که توسط دانش و تجربیات افراد خبره و متخصص در هر زمینه تعریف می‌شود. در این مطالعه فاصله و بزرگا به عنوان پارامترهای ورودی و PGA به عنوان پارامتر خروجی انتخاب شده‌اند. برای ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی در استنتاج فازی، ۲۵ قانون "اگر-آنگاه" مطابق جدول (۲) تعریف شده است.

جدول ۲. قوانین فازی استفاده شده در استنتاج فازی

No.	Distance	M _{Max}	PGA
1	Near	Short	Low
2	Near	Medium	Medium
3	Near	Large	Much
4	Near	Very-Large	Very-Much
5	Near	Very-Very -Large	Very-Very-Much
6	Medium	Short	Very-Low
7	Medium	Medium	Low
8	Medium	Large	Low
9	Medium	Very-Large	Medium
10	Medium	Very-Very -Large	Much
11	Far	Short	Very-Low
12	Far	Medium	Very-Low
13	Far	Large	Low
14	Far	Very-Large	Low
15	Far	Very-Very -Large	Medium
16	Very-Far	Short	Very-Low
17	Very-Far	Medium	Very-Low

در ادامه این مطالعه از منطق فازی برای استفاده در تحلیل خطر قطعی استفاده شده است. نظریه فازی برای اولین بار توسط پروفیسور لطفی‌زاده در مقاله‌ای به نام مجموعه‌های فازی در سال ۱۹۶۵ در صحنه محاسبات نو ظاهر شد [42]. توانایی منطق فازی در مواجهه با عدم قطعیت‌ها، باعث برتری این تئوری در مدل کردن پدیده‌های طبیعی شده است. از آنجا که تحلیل خطر زمین‌لرزه، پایه و اساس بسیاری از برنامه ریزی‌های مهندسی و اقتصادی است، پس استفاده از روش موتور استنتاج فازی که بتواند با سرعت و دقت مناسبی تحلیل خطر را انجام داده و نتایج قابل اعتمادی ارائه نماید، می‌تواند بسیاری از مشکلات پیش روی برنامه ریزان اقتصادی، بیمه ای و... را کاهش دهد [7]. یکی از نوآوری‌های اصلی منطق فازی، فراهم آوردن زمینه‌ای برای پیشرفت از دوتایی گرای به کثرت گرایی، از سیاه و سفید به سایه‌های خاکستری است [43]. با ارائه مبنایی برای استدلال تقریبی، یعنی شیوه‌ای از استدلال نه دقیق و نه خیلی نادرست، منجر به منطقی می‌شود که ممکن است چارچوبی واقع بینانه‌تر از منطق سنتی دو ارزشی ("بله" و "خیر")، برای استدلال انسان ارائه دهد [44]. در مطالعه حاضر، برای برآورد قطعی خطر زمین‌لرزه با استفاده از سیستم استنتاج از رابط گرافیکی جعبه ابزار منطق فازی در نرم افزار متلب استفاده شده است. بطور کلی برای استخراج خروجی در منطق فازی از چهار مرحله اصلی استفاده می‌شود که عبارت‌اند از: تعریف قواعد و قوانین فازی؛ طراحی توابع عضویت؛ استنتاج فازی؛ و در نهایت فازی سازی مقادیر خروجی.

روش منطق فازی مبتنی بر تجربه و دانش افراد خبره است که در تعریف قوانین و توابع عضویت، وجود این اطلاعات ضروری و مهم می‌باشد. در این مطالعه برای اطمینان از قوانین و توابع تعریف شده از میانگین نتایج ۵ رابطه کاهندگی که در روش مرسوم استفاده شده بود با همان ضرایب وزنی درخت منطقی، کمک گرفته شده است و این نتایج به صورت نمودار و در شکل (۸) ارائه شده است. با استفاده از شکل (۸)، قوانین و توابع فازی تعریف شده‌اند، به شکلی که می‌توان مشاهده نمود

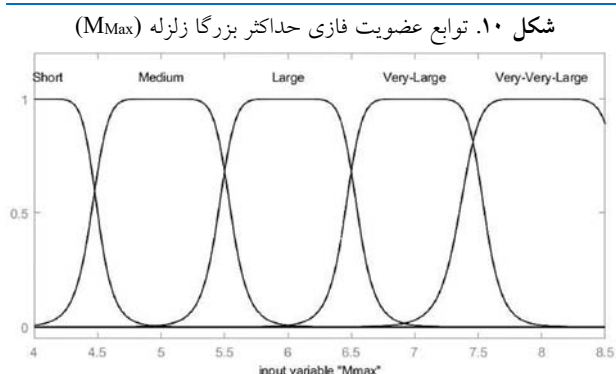


Fig. 10. Fuzzy membership functions of earthquake Maximum magnitude parameter

پارامتر خروجی سیستم نیز، بیشینه شتاب افقی زمین (PGA) است، که دامنه تغییرات آن از مقدار صفر تا $6.5g$ در نظر گرفته شده و مطابق شکل (۱۱) از ۶ تابع عضویت گوسی-زنگوله‌ای متناظر با متغیرهای زبانی خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، خیلی زیاد و خیلی خیلی زیاد استفاده شده است.

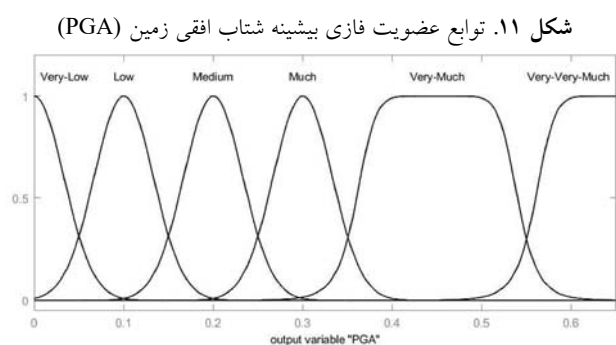


Fig. 11. Fuzzy membership functions for horizontal peak ground acceleration (PGA) parameter

۳-۵- استنتاج فازی

در این مرحله موتور استنتاج فازی براساس توابع عضویت و قوانین "اگر- آنگاه" تعریف شده در مرحله اول، شروع به ارزیابی و استنتاج می‌کند. در این مطالعه از سیستم استنتاج فازی مددانی استفاده شده است.

۴-۵- غیرفازی سازی مقادیر فازی خروجی

در آخرین مرحله از استنتاج فازی مقدار پارامتر خروجی فازی (PGA) که توسط موتور استنتاج به دست آمده است، به یک مقدار صریح یا عددی تبدیل می‌شود. روش‌های مختلفی برای غیرفازی سازی وجود دارد. در این مطالعه از غیرفازی سازی به روش مرکز سطح استفاده شده است. این روش کاربردی وسیع‌تر

18	Very-Far	Large	Very-Low
19	Very-Far	Very-Large	Very-Low
20	Very-Far	Very-Very-Large	Low
21	Very-Very-Far	Short	Very-Low
22	Very-Very-Far	Medium	Very-Low
23	Very-Very-Far	Large	Very-Low
24	Very-Very-Far	Very-Large	Very-Low
25	Very-Very-Far	Very-Very-Large	Very-Low

Table 2. Fuzzy rules used in fuzzy inference

۲-۵- انتخاب توابع عضویت

همانگونه که پیشتر نیز ذکر شد پارامترهای ورودی منطق فازی فاصله و بزرگای گشتاوری هستند. برای فازی سازی این پارامترهای ورودی، لازم است از توابع عضویت استفاده شود. در این مطالعه، انتخاب توابع عضویت مطابق با گستره پارامترهای ورودی و خروجی انجام شده است. همچنین از توابع گوسی-زنگوله‌ای شکل به دلیل هماهنگی و برآورد نتایج مقبول‌تر با روش قطعی مرسوم (با استفاده از روابط کاهندگی) استفاده شده است [45]. برای پارامتر ورودی فاصله که دارای مقادیری بین صفر تا 150 کیلومتر است از ۵ تابع عضویت زنگوله‌ای متناظر با متغیرهای زبانی نزدیک، متوسط، دور، خیلی دور و خیلی خیلی دور استفاده شده است. شکل (۹) توابع عضویت فازی فاصله را نشان می‌دهد.

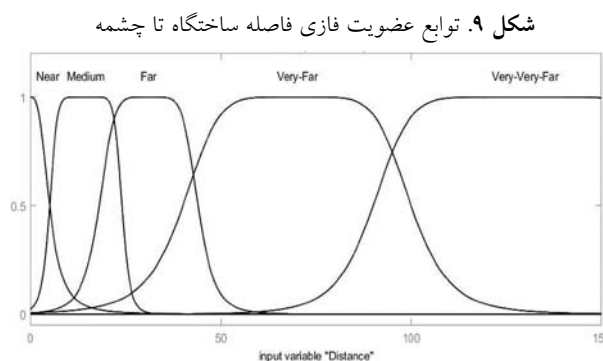


Fig. 9. Fuzzy membership functions of Site-to-source distance

برای پارامتر ورودی بیشینه بزرگای (M_{Max})، نیز مقادیری بین ۴ تا 8.5 در نظر گرفته شده است. برای این پارامتر نیز مطابق شکل ۱۰ از ۵ تابع عضویت زنگوله‌ای متناظر با متغیرهای زبانی کوچک، متوسط، بزرگ، خیلی بزرگ و خیلی خیلی بزرگ استفاده شده است.

شکل ۱۲. پهنه‌بندی بیشینه شتاب افقی زمین (PGA) در نقاط مختلف شهر اردبیل در سنگ‌بستر با استفاده از سیستم استنتاج فازی

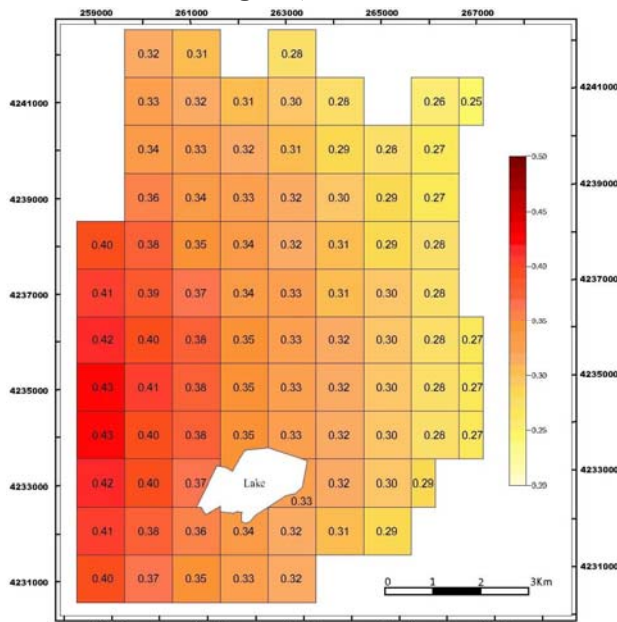


Fig. 12. Horizontal peak ground acceleration zoning of the Ardabil city in bedrock level using Fuzzy Inference System

تاثیر هم زمان بزرگای زلزله و فاصله از چشمه بر بیشینه شتاب منطقه، به صورت سه بعدی در شکل (۱۳) ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات بیشینه شتاب افقی زمین با تغییرات فاصله و بیشینه بزرگا نسبت به هم با آنچه انتظار می‌رود هم خوانی دارد. در این شکل پارامتر فاصله برحسب کیلومتر و پارامتر M_{max} برحسب بزرگای گشتاوری (M_w) است.

شکل ۱۳. سطوح سه‌بعدی پارامترهای ورودی-خروجی سیستم‌های فازی

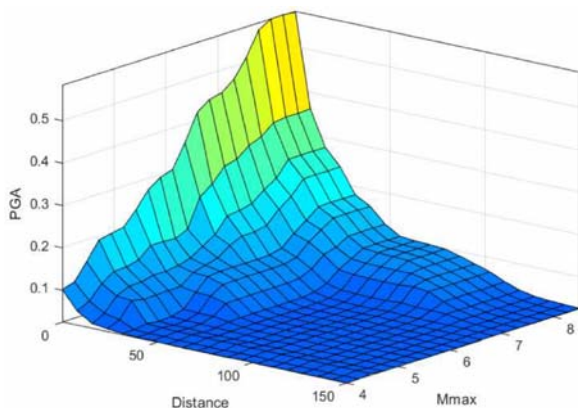


Fig. 13. Three-dimensional surface of input-output parameters of the fuzzy systems

و نتایج خروجی هموارتری فراهم می‌آورد که انتقالی تدریجی بین قوانین با تغییر کردن به عنوان ورودی بوجود می‌آید. با توجه به نتایج حاصل از سیستم استنتاج فازی، چشمه شماره ۷ نیز دوباره به عنوان پرخطرترین چشمه لرزه‌ای انتخاب شد. شکل (۱۲) نتایج حاصل از سیستم استنتاج فازی را برای بیشینه شتاب افقی زمین (PGA) نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، مشاهده می‌شود کمینه شتاب مورد انتظار $0.25g$ و در نواحی شمال شرقی شهر و بیشینه شتاب مورد انتظار $0.43g$ و در نواحی غربی شهر است که با نتایج تحلیل خطر قطعی حاصل از روابط کاهندگی شباهت بسیاری دارد و منطق فازی می‌تواند برآورد خوبی در زمینه تحلیل خطر زلزله داشته باشد. از مزیت‌های منطق فازی می‌توان به روند ساده، سریع همراه با انعطاف‌پذیری بالا نسبت به روش قطعی مرسوم اشاره نمود که براساس دانش و تجربه افراد خبره، به حل مسائل می‌پردازد. اما از سوی دیگر باید توجه داشت که به دلیل وابستگی بسیار زیاد منطق فازی به دانش فرد خبره در حل مسائل می‌تواند انحراف زیادی را در نتایج ایجاد نماید.

پهنه‌بندی لرزه‌ای شهرهایی که از خطر لرزه‌خیزی بالایی برخوردار هستند اطلاعات مفید و ارزشمندی را در اختیار سازمان‌ها و افراد متخصص قرار می‌دهد. با کمک نقشه پهنه‌بندی می‌توان نقاط مختلف شهر را از نظر بیشینه شتاب و خطر بیشتر زمین‌لرزه تشخیص داد. با توجه به نتایج حاصل از نقشه‌های پهنه‌بندی با هر دو روش، می‌توان نتیجه گرفت که نواحی غربی شهر اردبیل دارای بیشترین شتاب نسبت به سایر نواحی آن هستند و بهتر است در حد امکان مراکز و ساختمان‌های مهم در قسمت‌هایی با بیشینه شتاب کمتر احداث شود تا از آسیب بیشتر در امان باشند.

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، پهنه‌بندی و برآورد قطعی خطر لرزه‌ای در شهر اردبیل با استفاده از روابط کاهندگی و منطق فازی انجام گرفته است. برای این منظور، تعداد ۲۰ چشمه بالقوه زمین‌لرزه از نوع سطحی در شعاع ۱۵۰ کیلومتری از شهر مشخص شده و مقادیر بیشینه شتاب افقی زمین در سطح سنگ بستر لرزه‌ای برای مرکز شبکه‌هایی به ابعاد 1000×1000 متر روی سطح شهر اردبیل با استفاده از روش قطعی مرسوم و سیستم استنتاج فازی بدست آمده است. با توجه به نتایج بدست‌آمده از هر دو روش، می‌توان چشمه شماره ۷ را اصلی-ترین عامل در ایجاد زمین‌لرزه‌ای ویرانگر در آینده نسبت به سایر چشمه‌ها دانست، که گسل اصلی آن گسل بزقوش است و در فاصله‌ای خیلی نزدیک از شهر اردبیل قرار دارد. تغییرات بیشینه شتاب افقی زمین در سطح سنگ‌بستر با استفاده از روابط کاهندگی $0.24g$ تا $0.43g$ به‌دست آمده است. تغییرات بیشینه شتاب افقی زمین در سطح سنگ‌بستر با استفاده از منطق فازی نیز $0.25g$ تا $0.43g$ است. در نتیجه می‌توان گفت بیشینه شتاب افقی زمین $0.43g$ است. با توجه به نزدیکی جواب این دو روش می‌توان به برآورد خوب سیستم استنتاج فازی برای تعیین بیشینه شتاب افقی زمین با آنچه انتظار می‌رفت اشاره نمود که دارای مزیت‌هایی مانند سادگی، انعطاف‌پذیری بسیار بالا و تسریع در روند انجام تحلیل خطر زمین‌لرزه است که براساس دانش و تجربه افراد خبره، به حل مسائل می‌پردازد و می‌تواند باعث صرفه‌جویی زیادی در وقت شود. همچنین به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که نقاط غربی شهر دارای خطر بیشتری نسبت به سایر نقاط هستند که بهتر است مراکز و ساختمان‌های مهم در قسمت‌هایی با بیشینه شتاب کمتر احداث شود که از لحاظ توسعه شهری در آینده نیز بهتر خواهد بود. این مطالعه به وضوح تأیید می‌کند که می‌توان از تکنیک‌های جدیدی مانند روش‌های فازی برای بهبود و توسعه در تحلیل خطرات زمین‌لرزه استفاده کرد.

مراجع

- [2] Boostan E., Mirzaei N., Eskandari Ghadi M. & Shafiee A. 2011 Seismic zoning of Tehran Region using fuzzy sets. *Journal of the Earth and Space Physics*, 38(2), 29-44 (In Persian).
- [3] Juang C. H. & Elton D. J. 1986 Fuzzy logic for estimation of earthquake intensity based on building damage records. *Civil Engineering Systems*, 3(4), 187-191.
- [4] Chen D., Dong W. & Shah HC. 1988 Earthquake recurrence relationships from fuzzy earthquake magnitudes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 7(3), 136-142.
- [5] Frangopol M., Ikejima K. & Hong K. 1988 Seismic Hazard Prediction Using A Probabilistic-Fuzzy Approach. *Structural Safety*, 5(2), 109-117.
- [6] Sánchez-Silva M. & García L. 2001 Earthquake Damage Assessment Based on Fuzzy Logic and Neural Networks. *Earthquake Spectra*, 17(1), 89-112.
- [7] Vojoudi M., Zare M. & Nourzad A. 2007 Fuzzy inference model for earthquake hazard analysis. *02nd International Conference on Integrated Natural Disaster Management*, Tehran, (In Persian).
- [8] Sen Z. 2010 Rapid visual earthquake hazard evaluation of existing buildings by fuzzy logic modeling. *Expert Systems with Applications*, 37(8), 5653-5660.
- [9] Jorjashvili N., Yokoi T. & Javakhishvili Z. 2011 Assessment of uncertainties related to seismic hazard using fuzzy analysis. *Natural Hazards*, 60, 501-515.
- [10] Ghodrati Amiri G., Asmari Saad Abad S. & Zare Hossein Zadeh A. 2013 Earthquake Risk Assessment Using Fuzzy Inference Systems and its Application in Seismic Rehabilitation Studies. *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)*, 13(4), 71-84 (In Persian).
- [11] Fayezi A. & Moharrami H. 2014 Optimal Control of Structures Equipped with MR Dampers Using ANFIS. *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)*, 14(20), 101-113 (In Persian).
- [12] Boostan E., Tahernia N. & Shafiee A. 2015 Fuzzy-probabilistic seismic hazard assessment case study: Tehran region, Iran. *Natural Hazards*, 77(2), 525-541.
- [13] Ahumada A., Altunkaynak A. & Ayoub A. 2015 Fuzzy logic-based attenuation relationships of strong motion earthquake records. *Expert Systems with Applications*, 42(3) 1287-1297.
- [14] Tavakoli B. & Ghafory-Ashtiany M. 1999 Seismic hazard assessment of Iran. *J Annali DiGeofisica*, 42(6), 1013-1022.
- [1] Website, International Institute of Earthquake Engineering and seismology. Available at: www.iiees.ac.ir.

- [30] Nowroozi A. 1985 Empirical Relations Between Magnitude and Fault Parameters for Earthquakes in Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(5), 1327-1338.
- [31] Slemmos D. B. 1986 Determination of earthquake size from surface faulting events. *Proceeding of international seminar on seismic zonation*.
- [32] Tavakoli B. 1994 *The Basics of Seismic Hazard Analysis*. Tehran: International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), 1-43.
- [33] Erdik A., Sesetyan K., Demircioğlu M. B., Tüzün C., Giardini D., Gülen L., Akkar D. S. & Zare M. 2012 Assessment of Seismic Hazard in the Middle East and Caucasus: EMME (Earthquake Model of Middle East) Project. In *Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering*, Lisbon, Portugal.
- [34] 2014 *Guideline for Seismic Hazard Analysis*, No. 626. Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, 48 Pages (In Persian).
- [35] Campbell K. W. & Bozorgnia Y. 2014 NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5% Damped Linear Acceleration Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1087-1115.
- [36] Boore D. M., Stewart J. P., Seyhan E. & Atkinson G. A. 2014 NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1057-1085.
- [37] Kale Ö., Akka S., Ansari A. & Hamzehloo H. 2015 A ground-motion predictive model for Iran and Turkey for horizontal PGA, PGV, and 5% damped response spectrum: Investigation of possible regional effects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(2A), 963-980.
- [38] Farajpour Z., Zare M. & Pezeshk SH. 2019 A New Empirical Ground-Motion Model for Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(2), 732-744.
- [39] Darzi A., Zolfaghari M. R., Cauzzi C. & Fäh D. 2019 An Empirical Ground-Motion Model for Horizontal PGV, PGA, and 5% Damped Elastic Response Spectra (0.01-10 s) in Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(3), 1041-1057.
- [40] Kaklamanos J., Baise L. G. & Boore D. M. 2011 Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction
- [15] 2015 *Iranian Code of Practice for Seismic Resistance Design of Buildings: Standard No. 2800. 4th Edition*. Building and Housing Research Center (In Persian).
- [16] Mousavi Bafrouei S. H., Mirzaei N., Shabani E. & Eskandari-Ghadi M. 2014 Seismic hazard zoning in Iran and estimating peak ground acceleration in provincial capitals. *Journal of the Earth and Space Physics*, 40(4), 15-38 (In Persian).
- [17] Berberian M. 1976 Documented earthquake faults in Iran. *Geological Survey of Iran*, 39, 143-186.
- [18] Ambraseys N. N. & Melville C. P. 1982 *A History of Persian Earthquakes*. Cambridge: Cambridge University Press, 240 Pages.
- [19] Hessami Kh., Jamali F. & Tabassi H. 2003 *Major Active Faults of Iran*. Tehran: International Institute of Earthquake Engineering and seismology (IIEES). 1 Page.
- [20] Website, Geological Survey & Mineral Explorations of Iran. Available at: www.gsi.ir.
- [21] Berberian M. 2014 Chapter 13 - 1964-1997 Coseismic Surface Faulting. *Developments in Earth Surface Processes*, 17, 293-371.
- [22] Berberian M. 1976 *Geological Survey of Iran Generalized Fault Map of Iran*. 1 Page.
- [23] Su S. S. 1988 Seismic Hazard Analysis for The Philippines. *Natural Hazards*. 27-44.
- [24] Alizadeh A., Afsari N. & Taghizadeh F. Farahmand. 2019 Evaluation of Deterministic seismic hazard in Nowshahr Port by using the fuzzy system. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8(19), 175-194 (In Persian).
- [25] Kramer S. L. 1996 *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- [26] Green A. & Hell J. 1994 *An Overview of Selected Seismic Hazard Analysis Methodologies*. Civil Engineering studies, Urbana-Champaign: Structural Research Series, No. 592, 91 Pages.
- [27] 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.
- [28] Zare M. 1999 *Contribution a 1 etude des mouvements forts en Iran, du catalogue aux lois d'attention*. These pour obtenir le litre de docteur de L'universite Joseph Fourier -Grenoble 1-France.
- [29] Mohajer Ashjai A. & Nowroozi A. 1978 Observed and probable intensity zoning of Iran. *Tectonophysics*, 49(3), 149-160.

- equations in engineering practice. *Earthquake Spectra*, 27(4), 1219–1235.
- [41] Khodadadi, Sh. 2021 *Ardabil Earthquake Hazard Zoning in Bedrock Using Deterministic Seismic Hazard Analysis and Fuzzy Logic*. Master Thesis. University of Guilan.
- [42] L. A. Zadeh. (1965). Fuzzy sets. *Inf. Control*. 8, pp. 338-353.
- [43] Lotfi A. Z. 2015 Fuzzy logic—a personal perspective, *Fuzzy Sets and Systems*, 281, 4-20.
- [44] Lotfi A. Z. 1975 The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, Part I. *Inf. Sci*, 8(3), 199–249.
- [45] Chavoshi A. S., Lajevardi S. M. R. & Tahernia N. 2016 Influence of shape of membership functions on fuzzy inference system. *Third National Conference on Electrical and Computer Engineering Distributed Systems and Smart Grids*, Kashan (In Persian).

Seismic zoning of Ardabil city using deterministic hazard analysis and fuzzy system

Shahin Khodadadi Jeyd¹, Saeid Pourzeynali^{2*}

1. MSc. Student, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

2. Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

pourzeynali@guilan.ac.ir

Abstract

Zoning and seismic hazard analysis is a powerful tool with useful and valuable information for decision-making. In this study, seismic zoning of Ardabil city on the seismic bedrock level was studied using deterministic hazard analysis method, and fuzzy inference system. The purpose of earthquake hazard analysis is to estimate the strong ground motion parameters in a time period and in a specific site. In all steps of seismic hazard analysis, there are uncertainties that make inevitable use of appropriate methods in seismic hazard assessment. Fuzzy logic is known as a reliable method to evaluate seismic hazards with reliable results in a short time with a simple and flexible process. Iran is one of the most earthquake-prone countries in the world where cities severely suffered during this natural phenomenon. The city of Ardabil with the coordinates of 38.25 North and 48.30 East, is the center of Ardabil province and is located in the northwestern part of Iran. Due to its location among several important active faults with a background of numerous historical destructive earthquakes, its seismicity and hazard analysis seems to be necessary. For this purpose, all the active faults located within a radius of 150 km from the city center along with their seismic history were studied and 20 potential seismic sources were selected for seismic hazard analysis. In the present study, seismic hazard zoning analysis of the Ardabil city is first performed by the conventional deterministic method by meshing the whole area under study with dimensions of 1000 × 1000 meters; then it is performed using the fuzzy inference system for the centers of each mesh, and the results are compared. In deterministic seismic hazard analysis (DSHA), 5 attenuation relationships were used to determine the peak ground acceleration (PGA) and the site-specific response spectrum for the center of each mesh. According to the results obtained by DSHA method, the value of horizontal PGA varies between 0.24g and 0.43g, while using the fuzzy inference system it varies between 0.25g and 0.43g. As a result, the maximum horizontal PGA in this area can be suggested about 0.43g. According to the results obtained from both methods, source No. 7, for which the Bozqoush fault is its main active fault, can be considered the main source potentially causing destructive earthquakes in the future compared to the other sources. Moreover, this source is located at a very close distance to Ardabil city. As well, in general, it can be concluded that the western parts of the city are more prone of sever earthquakes compared to the other parts of the city, and therefore, it is better to build important buildings and infrastructures in areas with lower PGA (eastern parts of the city) and encourage the politicians to urban development to this direction in the future. This study clearly confirms that new techniques such as fuzzy methods can be used to improve and develop the seismic hazards analysis.

Keywords: Deterministic seismic hazard analysis, Fuzzy Logic, Seismic zoning, PGA, Ardabil city.