تهیه یک مدل پیش‌بینی ناپایداری بافت‌های کهن شهری در برابر زلزله با منطق سلسله مراتبی وارون (IHPW) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)

کیومرث حبیبی [۱*]، مصطفی بهزاد فر [۲]، ابوالفضل مشکینی [۳] و سعید نظری [۴]

[۱] استادیار، گروه شهرسازی، دانشکده فنی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
[۲] استاد، گروه طراحی شهری، دانشکده معماری، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
[۳] استادیار، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[۴] کارشناسی ارشد، گروه شهرسازی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۵/۱۸

چکیده

ایران‌زمین به دلیل موقعیت جغرافیایی و قرار گرفتن روی کمربند جهانی زلزله، در طول تاریخ همواره زمین‌لرزه‌های مخربی را تجربه کرده است و هر ساله چندین لرزه در سطح کشور ثبت می‌شود. آخرین مورد آن زلزله ۶/۸ ریشتری بم در پنجم دی‌ماه ۱۳۸۲ بوده است که سبب تلفات شدید انسانی و زیرساخت‌ها در سطح کشور شد. زلزله‌ای که با ۳۰ هزار کشته و ۱۰ هزار زخمی از بزرگ‌ترین زلزله‌های سده اخیر به شمار می‌آید. هدف این مقاله شناسایی دلایل اصلی این مقدار تلفات است. برای رسیدن به این هدف ۱۳ شاخص کالبدی- فضایی مؤثر بر آسیب‌پذیری شهرها در سطح جهانی شناسایی و سپس در قالب مدل‌های برنامه‌ریزی و تلفیقی چون فازی و تحلیل سلسله مراتبی وارون وزن‌دهی شدند. لایه‌های انتخابی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی ترکیب و درپایان نقشه میزان آسیب‌پذیری شهر پیش از زلزله اخیر مدل‌سازی شد. در مرحله دوم میزان آسیب‌پذیری شهر بر پایه برداشت‌های دقیق طرح تفصیلی شهر مشابه‌سازی و میزان ضریب همبستگی آن با مدل فرضی ارائه‌شده این پژوهش محاسبه شد که ضریبی معادل با ۰/۵۹ را نشان داد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نه تنها مدل فازی برای تعیین آسیب‌پذیری و ناپایداری شهرهایی چون بم کاربرد دارد بلکه با استفاده از این مدل ارائه‌شده می‌توان میزان تاب‌آوری شهر را در برابر زلزله و دیگر بحران‌های طبیعی محاسبه کرد و سرانجام به رابطه میان تئوری و عمل دست یافت.

کلیدواژها: زلزله، آسیب‌پذیری، بم ، سامانه اطلاعات جغرافیایی، مدل‌سازی، منطق فازی، مدل IHPW

***نویسنده مسئول:** کیومرث حبیبی
E-mail: habibi_ki@yahoo.co.uk

۱- مقدمه

امروزه حدود نیمی از جمعیت شش میلیاردی کره زمین در شهرها ساکن هستند و پیش‌بینی شده است که برای ۳۰ سال آینده، از ۲/۲ میلیارد جمعیتی که به ساکنان زمین افزوده خواهند شد، ۲/۱ میلیارد ساکن شهرها خواهند بود و انتظار می‌رود ۲ میلیارد از این جمعیت در شهرهای کشورهای در حال توسعه متولد شوند (USAID, 2001). جدا از افزایش بلایای طبیعی طی دهه‌های گذشته، افزایش قربانیان به دلیل افزایش آسیب‌پذیری جوامع شهری است. متأسفانه تعداد زیادی از این شهرها، به دلیل بی‌برنامگی با محدودیت فضا روبه‌رو هستند و این سبب می‌شود که از یک سو بافت شهری فشرده شود و در نتیجه تراکم جمعیتی ساکن در آن افزایش یابد و از سوی دیگر زمین‌های نامناسب از دید آسیب‌پذیری از بلایای طبیعی (برای نمونه مناطق نزدیک به گسل‌ها) بیشتر توسط فقیرترین طبقات جامعه تصرف شود (Van Westen, 2006). تقریباً ۵۰ درصد از شهرهای بزرگ جهان در نزدیکی گسل‌های فعال زلزله یا حوضه آبریز سیلاب‌ها قرار دارند. در کشورهای توسعه‌یافته به دلیل حساس بودن فناوری پیشرفته به کار رفته در تأسیسات زیربنایی، این تأسیسات در معرض تخریب بر اثر زلزله می‌باشند و در نتیجه جوامع صنعتی نیز در معرض خطر زلزله قرار دارند. انفجار نیروگاه فوکوشیما در پیشرفته‌ترین کشور دنیا ناشی از سونامی اخیر ژاپن شاهدی بر این ادعاست. شهرهای کشورهای درحال توسعه در معرض خطر بیشتری هستند. برآورد می‌شود که حدود ۹۵ درصد ازکل قربانیان بلایای طبیعی در جهان از کشورهای درحال توسعه باشند و تلفات ناشی از این گونه رخدادها در این کشورها ۲۰ برابر بیشتر از رخدادهای مشابه در کشورهای توسعه یافته است (Kreimer et al., 2003). در این میان گستره پهناور جغرافیایی کشور ایران از جمله مناطق حادثه‌خیز است که بسیاری از بلایای طبیعی چون زمین‌لرزه، رانش زمین، سیل، توفان، خشک‌سالی، فعالیت‌های آتش‌فشانی و بیابان‌زایی نمونه‌هایی از تاریخ حادثه‌خیز دور و نزدیک آن است (شکل ۱). در گزارش دفتر برنامه‌ریزی سازمان ملل متحد در سال ۲۰۰۳، کشور ایران در میان کشورهای مختلف جهان، رتبه نخست را در تعداد زلزله‌های با شدت بالای ۵/۵ ریشتر در سال و یکی از بالاترین رتبه‌ها را در زمینه آسیب‌پذیری ناشی از رخداد زلزله و شمار افراد کشته شده در این رویداد داشته است (شکل ۲). همچنین بر پایه این گزارش، در کشور ایران، زلزله بیشتر از دیگر رویدادهای مختلف طبیعی بوده است (UNDP, 2003). این آمار بدون درنظرگرفتن تعداد کشته‌شدگان و آمار مربوط به خسارات ناشی از رخداد زلزله بم در سال ۲۰۰۳ است.

زلزله‌های اخیر شاخصی از میزان آسیب‌پذیر بودن ایران در مناطق شهری و روستایی است. زلزله‌های بویین‌زهرا (۱۳۴۱)، رودبار (۱۳۶۹) و بم (۱۳۸۲) هر کدام بیش از ۱۰ هزار کشته برجای گذاشتند. تنها نتیجه آخرین مورد یعنی زلزله بم، بیش از ۳۰۰۰۰ کشته، بیش از ۱۰۰۰۰ زخمی، بیش از ۱۰۰۰۰۰ نفر بی‌خانمان و تخریب بیش از ۸۰ درصد از شهر به همراه از بین رفتن تمام زیرساخت‌های اجتماعی بود که چیزی بیش از ۸۰۰ میلیون دلار زیان به بار آورد (Ministry of Interior, 2005) درحالی که ۴ روز پس از زلزله بم زلزله‌ای با مقیاس مشابه در شهر San Robles ایالت کالیفرنیا رخ داد که تنها ۲ کشته برجای گذاشت (UN/ISDR, 2005). به نظر می‌رسد برای مصون‌سازی هر چه بیشتر فضاهای شهری، برنامه‌ریزی ویژه‌ای نیاز است. دانش شهرسازی با تکیه بر داده‌های جغرافیایی می‌تواند با تبیین اصول و مفاهیم خود و با استفاده از این داده‌ها، اثرات این گونه بلایا را تا حد زیادی کاهش دهد و مدیران شهری نیز می‌توانند با استفاده از این داده‌ها، اصول مدیریتی لازم برای کاهش آسیب‌پذیری شهرها در برابر این رویدادها را به اجرا در آورند (عبدالهی، ۱۳۸۳). معماران و پیمانکاران فراموش نکنند که "این زلزله نیست که انسان‌ها را می‌کشد بلکه ساختمان‌ها هستند (Richter,1976)".

۲- بیان مسئله

کشور ایران با ویژگی های خاص زمین‌ساختی، همواره در بسیاری از نقاط با خطر زلزله روبه‌رو بوده است؛ چرا که در بخشی از کمربند زلزله خیز آلپ - هیمالیا قرار گرفته است. کمتر نقطه‌ای در کشور پهناور ایران یافت می‌شود که از آسیب زلزله‌های کوچک یا بزرگ در امان باشد و به همین دلیل هیچ منطقه‌ای از آن را نمی‌توان در برابر زلزله ایمن فرض کرد (شکل ۳). بر پایه آمارهای رسمی در ۲۵ سال گذشته، ۶ درصد از تلفات انسانی کشور ناشی از زلزله بوده است و به طور میانگین هر سال یک زلزله ۶ ریشتری و هر ده سال یک زلزله به بزرگی ۷ درجه در مقیاس ریشتر در کشور رخ می‌دهد که آخرین آنها زلزله ۶/۸ ریشتری بم در دی‌ماه ۱۳۸۲ بوده است (رنجبر و همکاران، ۱۳۸۵). در ادبیات مربوط به مباحث زلزله، آسیب‌پذیری به صورت میزان تحمل، پایداری و یا نجات از اثرات یک بلای طبیعی در بلندمدت و به همان نسبت در کوتاه‌مدت تعریف شده است (Mileti, 1999). از این رو کاهش اثرات زلزله و یا به عبارت دیگر، کاهش آسیب‌پذیری جوامع بشری در برابر زلزله زمانی رخ خواهد داد که ایمنی شهر در برابر خطرات زلزله در همه سطوح برنامه‌ریزی (از آمایش سر زمین تا معماری)، مد نظر قرار گیرد. به نظر می‌رسد سطح میانی یعنی شهرسازی یکی از کارآمدترین سطوح برنامه‌ریزی برای کاهش آسیب‌پذیری شهرها در برابر زلزله است (اردلان و همکاران، ۱۳۸۵). از سال ۱۳۴۰ تاکنون زمین‌لرزه‌های مختلف و گاه ویران‌کننده، مناطق مختلف کشور را با خسارات و تلفات سنگینی روبه رو کرده‌اند. بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌ای که در سال‌های اخیر در ایران رخ‌داده مربوط به ۳۱ خرداد ۱۳۶۹ در استان‌های گیلان و زنجان با قدرت ۷/۳ در مقیاس ریشتر است. این زمین‌لرزه بیش از ۴۰ هزار کشته برجای گذاشت که خون‌بارترین زمین‌لرزه در ایران به شمار می‌آید. یکی از دردناک‌ترین این زلزله‌ها که بدون اغراق سبب از بین رفتن دو نسل و همچنین آثار تمدن کهن چندین هزار ساله شد، زلزله بم در ۵ دی ماه ۱۳۸۲ بود که می‌توان آن را اولین زلزله شهری ایران دانست. مرکز (شکل ۴) این زلزله در بخش خاوری بافت شهری بم بود. میزان تخریب آن در شهر بم ۱۰ تا ۱۰۰ درصد و میزان کشته‌شدگان حوزه شهری بم ۳۲۰۰۰ نفر برآورد شد. آسیب‌دیدگی شهر در سه حوزه زیرساخت اقتصادی، زیرساخت شهری و مسکن اتفاق افتاده است. با این که به طور متوسط ۷۰ درصد کالبد شهر، ۳۰ درصد زیرساخت اقتصادی و دست‌کم ۳۰ درصد جمعیت از بین رفته‌اند (شکل ۴)، توصیه کارشناسانه مبتنی بر ادبیات جهانی، تجربه ملی و ویژگی‌های محیطی شهر بم بر راهبرد در جاسازی تأکید می‌کند. از این رو شناسایی توان نهفته شهر در زمینه مدیریت بحران و تعیین آسیب‌پذیری بافت‌های آن ضروری است.

۳- ادبیات و پیشینه پژوهش

آسیب‌پذیری شهری در برابر رخدادهای طبیعی مانند زمین‌لرزه تابعی از رفتارهای انسانی است که نشانگر درجه تأثیرپذیری یا توانایی ایستادگی واحدهای اقتصادی- اجتماعی و دارایی‌های فیزیکی شهری در برابر خطر طبیعی است (Rashed & Weeks, 2003). امروزه تشخیص میزان آسیب‌پذیری بافت بر اثر زمین‌لرزه تا حدود زیادی با استفاده از مدل آسیب‌پذیری ممکن است. Aysan و Davis که از نظریه پردازان و کارشناسان بلایا هستند، بر این نکته تأکید و اعلام کرده‌اند که امکان استفاده از تجارب حاصل از مطالعات بلایای طبیعی به منظور کاهش خطر و دست‌یابی به مدل‌های گوناگون، کاملاً امکان‌پذیر است (Aysan & Davis, 1992). در طول دو دهه گذشته چندین مدل برای محاسبه میزان آسیب‌پذیری بافت برای جهت دادن به تصمیمات جوامع به منظور کاهش اثرات ناشی از بلایای طبیعی، ارائه‌شده است.

Cova (1999) برای تهیه یک نقشه آسیب‌پذیری، سامانه اطلاعات جغرافیایی را به کار گرفته (شکل ۵) و در مدل خود از اطلاعاتی مانند: توپوگرافی و محل گسل‌های منطقه، محل تأسیسات زیربنایی حساس مانند نیروگاه‌های هسته‌ای، شبکه معابر و پراکنش جمعیت برای مدل‌سازی آسیب‌پذیری استفاده کرده است.

Rashed & Weeks (2003) از GIS در مدل‌سازی میزان آسیب‌پذیری ناشی از زلزله کمک می‌گیرند (شکل ۶). آنها در مدل خود رویکردی فازی نسبت به جهان پیرامون دارند و با این نگاه مدلی را بر پایه تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای پیش‌بینی میزان خطر تولید می‌کنند. عواملی که آنها در مدل خود به عنوان معیار به کار می‌برند شامل: کمترین عملکرد پل‌ها، سرویس‌های فوریت پزشکی، بیمارستان‌ها، خطوط انتقال نیرو، بزرگراه‌ها و نیز بیشترین هزینه بازسازی ساختمان‌ها، نیاز به سرپناه، حجم آوار و درصد مناطق از بین رفته بر اثر آتش‌سوزی است.

فرایندی که او برای تحلیل آسیب‌پذیری استفاده می‌کند از هفت مرحله تشکیل می‌شود. اولین مرحله انتخاب معیارهای ارزیابی و شاخص‌هایی است که حدود تحلیل را مشخص می‌کنند. در مرحله دوم از راه محاسبات آماری، حرکت‌های احتمالی زمین بر اثر زلزله محاسبه می‌شود که بر این اساس شدت آسیب‌های ناشی از یک زلزله فرضی قابل محاسبه خواهد بود. در مرحله سوم، میزان آسیب‌های احتمالی از سناریوی اجرا شده فازی‌سازی می‌شود. در مرحله چهارم معیارهای فازی‌سازی شده دو به دو با استفاده از روش AHP برای تولید یک سری از وزن‌های فازی، مقایسه و رده‌بندی می‌شوند. در مرحله پنجم معیارها با هم ترکیب می‌شوند و یک آرایه تک‌بعدی از قوانین بناشده روی یک مجموعه از روش‌های وزن‌دار فازی‌شده ایجاد می‌شود. این قوانین سپس برای اندازه‌گیری درجه عضویت هر یک از مجموعه‌های فازی که معرف میزان صدمه واردشده (ریسک کم، ریسک متوسط و ریسک زیاد) هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. مراحل ۳ تا ۵ برای تمامی سناریوها تکرار می‌شود و در مرحله ششم لایه‌های فازی با ریسک زیاد که از اجرای سناریوها به دست آمده‌اند برای مکان‌یابی نقاط مهم آسیب‌پذیر استفاده می‌شوند. در مرحله پایانی در بخشی با نام تحلیل حساسیت، تأثیرات عوامل یا لایه‌های به کار رفته را به تنهایی شبیه‌سازی و میزان تأثیر هر کدام در خروجی پایانی تعیین شده است (Rashed & Weeks, 2003).

از جدیدترین پژوهش‌های آسیب‌پذیری شهر ناشی از زلزله می‌توان به پژوهش Antonioni et al. (2007) اشاره کرد (شکل ۷). در این پژوهش یک روند برای بررسی تأثیرات زلزله بر تأسیسات صنعتی ارائه شده است. نکته شروع در این پژوهش استفاده از اطلاعات زمین‌لرزه‌های پیشین برای برآورد روند زلزله‌های آینده است. به بیان دیگر با فرض ثابت بودن شدت لرزه‌های پیشین تاریخی حوزه مطالعاتی، میزان تاب‌آوری تأسیسات موجود با کیفیت ساخت فعلی را در ارتباط با میزان آسیب‌پذیری پیش‌بینی کرده است. به عبارت دیگر با بررسی تجهیزات موجود و نیز نقشه آسیب‌پذیری میزان آسیب‌های ناشی از زلزله بر روی تجهیزات پیش‌بینی شده است. مدل او شامل ۷ مرحله است. در مرحله اول جنبش نیرومند زمین (Peak Ground Acceleration) ناشی از زلزله‌های مهم مشخص و در مرحله دوم تجهیزات حساسی که ممکن است در اثر زلزله صدمه ببینند و سبب خرابی‌های مهمی شوند شناسایی می‌شوند. در مرحله سوم باید برای هرکدام از این تجهیزات سناریویی نوشته شود. در مرحله چهارم تا هفتم باید هرکدام از سناریوهای مرجع برای ایجاد یک سناریو کلی باهم ترکیب شوند، زیرا ممکن است بیش از یک واحد از تجهیزات در اثر یک زلزله آسیب ببینند. همچنین نتایج سناریوها نیز باید ترکیب شوند تا نتیجه سناریو کلی نیز مشخص شود و در پایان رویه کلی که از ترکیب رویه‌های دیگر به دست آمده است، می‌تواند ریسک ناشی از زلزله را مشخص کند (Antonioni et al., 2007).

۴- محاسبه میزان احتمال آسیب‌پذیری ناشی از زلزله

بلایای طبیعی سالیانه جان هزاران نفر را در سراسر جهان می‌گیرند. نقشه نواحی

پرخطر زلزله نقاطی را نشان می‌دهد که در اثر زلزله، بیشتر آسیب می‌بینند. وقتی از احتمالات برای نشان دادن میزان خطر استفاده می‌شود، نقشه حاصل از آن، نقشه میزان احتمال خطر نامیده می‌شود. برای تولید این نوع نقشه باید پراکنش احتمال P (x) را برآورد کرد، در این حالت x عامل آسیب‌پذیری در برابر زلزله است. بلایای طبیعی سامانه‌های پیچیده‌ای هستند که عامل‌های زیادی در آن دخالت دارند. اطلاعات در دسترس برای برآورد P (x) معمولا یا ناقص هستند و یا دخالت دادن همه آنها حتی در صورت وجود در یک مدل غیر ممکن است. از این رو برآورد P (x) به صورت کاملاً دقیق غیر ممکن به نظر می‌رسد و هیچ کس نمی‌تواند تضمین کند که P (x) را با درصد خطای مشخص به صورت دقیق برآورد کرده است. در این حالت، توابع احتمال فازی برای نشان دادن احتمال خطر به صورت فازی یکی از مهم‌ترین و مناسب‌ترین راهکارها خواهد بود. منطق فازی برای اولین بار توسط پروفسور لطفی‌زاده استاد دانشگاه برکلی مطرح شد. این نظریه می‌تواند بسیاری از مفاهیم، متغیرها و سامانه‌هایی را که نادقیق و مبهم هستند صورت ریاضی ببخشد و زمینه را برای استدلال، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط نبود اطمینان فراهم آورد. در اینجا باید این نکته را یادآورشد که برآورد توان آسیب‌پذیری توسط ابهامات و عدم قطعیت‌ها احاطه شده است چرا که معیارهای محاسبه میزان آسیب‌پذیری با دقت و صراحت برای محاسبه رفتار نمی‌کنند و دلیل استفاده از مدل فازی این است که یک مجموعه فازی برخلاف یک مجموعه بولین به عامل‌های آسیب‌پذیری اجازه عضویت به صورت یک طیف پیوسته را می‌دهد (Zadeh, 1975). در این پژوهش نقشه میزان احتمال خطر، طی سه مرحله تولید شده است. در مرحله اول نقشه‌های اصلی که در تخریب ناشی از زلزله مؤثر هستند از نظر اهمیت درجه‌بندی و امتیازدهی می‌شوند، در مرحله دوم این نقشه‌ها با استفاده از توابع فازی به نقشه‌های فازی تبدیل می‌شوند و در مرحله سوم با توجه به امتیازات هر نقشه نقشه‌های فازی بر پایه مدل IHPW با هم ترکیب می‌شوند (شکل ۱۰).

۴-۱. مرحله اول: نقشه‌های پراکنش عوامل مؤثر در تخریب ساختمان بر اثر زلزله

با مطالعات انجام شده و با توجه به اطلاعات موجود عوامل مؤثر بر میزان آسیب‌پذیری بافت که در این پژوهش بررسی شد به شرح زیر هستند:

– **تراکم ساختمانی بناها:** این عامل نقش مهمی در میزان آسیب‌پذیری بناها دارد. با افزایش تراکم، میزان نخاله ناشی از تخریب ساختمان نیز بیشتر خواهد شد که این بر میزان آسیب‌پذیری بافت تأثیر مستقیم دارد.

– **دانه‌بندی بافت:** این عامل به همراه تفکیک قطعات زمین در آسیب‌پذیری مؤثر است؛ چرا که با کوچک شدن قطعات، فضای باز میان قطعات خرد می‌شود، این فضا در مرحله گریز از بنا و پناه نقش دارد و در نتیجه آسیب‌پذیری بالا می‌رود.

– **نظم و بی‌نظمی:** نظم و بی‌نظمی، در قطعات، در میزان آسیب‌پذیری مؤثر است. نظم قطعه میزان آسیب‌پذیری را پایین می‌آورد و میزان آسیب‌پذیری با بی‌نظمی افزایش می‌یابد. هر چه شکل به مستطیل نزدیک باشد میزان آسیب‌پذیری آن کمتر و قطعاتی که نظم ندارند، چون انتقال نیرو در آنها چند راستای مختلف است، آسیب‌پذیری بیشتری دارند.

– **ترکیب توده و فضا در بافت:** نقش این عامل بسیار مهم است. با کم شدن فضای میان ساختمان‌ها و بیشتر شدن پیوستگی بافت‌ها، آسیب‌پذیری افزایش می‌یابد. اولاً هر ساختمان نیرویی به ساختمان همسایه وارد می‌کند و موجب آسیب‌رسانی به ساختمان‌های اطراف می‌شود. ثانیاً این فضاها به منظور گریز، پناه و اسکان مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نتیجه نسبت قرارگیری ساختمان درون زمین و درصد اشغال بنا اهمیت دارد.

– **تعداد طبقات:** اگر تعداد صفحات با اصول ایمنی نباشد قطعاً آسیب را بالا خواهد برد. حتی اگر افزایش بلندی با رعایت ضوابط و محاسبات مناسب انجام گیرد، به هنگام تخلیه، جستجو و نجات با سختی همراه است. بنابراین افزایش تعداد طبقات یک عامل منفی به شمار می‌آید و آسیب‌پذیری را بالا می‌برد. در شهری مانند بم که احتمال خطر در آن وجود دارد، باید از بلند مرتبه‌سازی پرهیز شود؛ چراکه به طورکلی گسترش در ارتفاع از گسترش در سطح پرخطرتر است.

– **درجه محصوریت معابر:** این متغیر نیز بسیار مهم است؛ با بالا رفتن درجه محصوریت و ریختن آوار در خیابان، تعداد بسته شدن بیشتر خواهد شد و در نتیجه در سرعت و چگونگی گریز و پناه و امدادرسانی به هنگام بحران تأثیرگذار خواهد بود.

– **عرض گذرگاه‌ها:** نقش بسیار مهمی در هنگام گریز، پناه، تخلیه و امدادرسانی دارد. چرا که حجم بیشتری از بازماندگان یا گروه‌های امدادگری می‌توانند منتقل شوند. هرچه عرض گذرگاه‌ها بیشتر باشد امکان ایجاد ترافیک عبوری کمتر خواهد شد.

– **فاصله سکونت‌گاه‌ها از فضاهای بی‌کالبد:** فضاهای بی‌کالبد می‌توانند در زمانی که احتمال وقوع زلزله وجود دارد به عنوان فضای پناه‌گیری و پس از رخداد زلزله نیز برای دایر کردن مراکز امدادی و درمانی و یا برای فرود اضطراری هلیکوپتر استفاده شوند. این فضاها باید در مکان‌های کم‌خطر زلزله قرار گیرند. نداشتن پوشش گیاهی امکان استفاده در مواقع امدادرسانی، به‌ویژه برپایی اسکان اضطراری را بالا می‌برد. نزدیکی این مکان به مراکز درمانی به دلیل انتقال سریع‌تر کمک‌های فوری بسیار مطلوب خواهد بود.

– **فاصله کم مراکز درمانی تا محل سکونت‌گاه‌ها:** این عامل موجب سرعت بخشیدن به امدادرسانی می‌شود؛ هرچه این فاصله بیشتر باشد، زمان بیشتری میان مبدأ و مرکز درمانی طی می‌شود و در نتیجه درمان به خطر می‌افتد.

– **فاصله تا آتش‌نشانی:** به عنوان یک عامل بسیار مهم در امدادرسانی می‌توان به فاصله تا آتش‌نشانی اشاره کرد. با افزایش فاصله سکونت‌گاه با مراکز آتش‌نشانی، سرعت امداد کاهش و دامنه خطر افزایش می‌یابد.

– **پمپ‌های بنزین:** پمپ‌های بنزین توان آسیب‌رسانی بالایی دارند و به هنگام بحران احتمال خطر بیشتری ایجاد می‌کنند. بنابراین همواره باید در انتخاب کاربری‌های همسایه آن دقت شود. در صورت ایجاد مشکل به نسبت فاصله، طیف آسیب‌پذیری تغییر خواهد کرد.

– **موقعیت جغرافیایی:** افزون‌بر مشخصات بافتی، موقعیت جغرافیایی نیز در میزان آسیب‌پذیری مؤثر است؛ دوری و نزدیکی به گسل یک عامل تعیین‌کننده است. در نزدیکی گسل ممکن است برش‌های عمودی ایجاد شوند و به تأسیسات لطمه بزنند. شکستگی لوله‌های آب در نواحی نزدیک به گسل در بم، گواه بر این ادعاست که با افزایش فاصله از گسل این خطرات کم می‌شود.

– **پتانسیل لرزه‌خیزی:** با استفاده از پتانسیل لرزه‌خیزی به‌صورت یک نقشه، شتاب لرزه‌خیزی شهر که پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله از تغییرات ۴۷۵ سال تهیه کرده در دسترس است. افزایش شتاب لرزه‌خیزی امکان آسیب‌پذیری را بالا می‌برد. با انطباق این نقشه با نقشه طرح تفصیلی، مشخص می‌شود که ساختمان‌ها به چه اندازه در معرض خطر هستند.

میزان اثرگذاری عوامل بالا به یک اندازه نخواهد بود و هر یک تأثیرمتفاوتی در آسیب‌پذیری بافت خواهند داشت. با مقایسه این متغیرها بر پایه تجربیات پیشین و موضوع مطالعات، می‌توان سلسله مراتبی را در نظر گرفت. هر یک از عناصر این سلسله مراتب خود دارای طبقه‌بندی هستند. در نتیجه برای زیرمجموعه‌های هر یک از عناصر می‌توان وزنی در نظر گرفت؛ این وزن درجه تأثیر را در بحرانی کردن نقاط شهری بیان می کند؛ به این ترتیب که پس از شناسایی لایه‌های مورد نیاز، میزان اهمیت هر لایه در آسیب‌پذیری یک مکان مشخص و سپس رتبه‌بندی می‌شود. مبنای این کار نیز نظرات کارشناسی است که در قالب فرایندی به نام دلفی صورت گرفته است.

در ادامه کار وارون رتبه هر لایه به عنوان وزن آن لایه در مدل IHPW در نظر گرفته می‌شود. مدل IHPW روشی برای تلفیق لایه‌های مختلف اطلاعاتی بر پایه وارون رتبه هر لایه است که در مرحله سوم به عنوان روشی برای تلفیق لایه‌ها به کاربرده شده است. بر پایه این وزن‌ها و به کمک مدل IHPW می‌توان یک مدل

طراحی کرد که این مدل مجموع نقش همه متغیرهای یک نقطه شهر را با دیگر نقاط شهری مقایسه می‌کند که نتیجه کار نقشه‌ای است که درجه بحران را در همه نقاط شهری نشان و در واقع الویت امدادرسانی به گروه‌های امدادرسانی و نجات را به هنگام بحران ارائه می‌دهد (حبیبی، ۱۳۸۵). در جدول ۱ وزن مربوط به متغیرها نشان داده شده است.

۴-۲. مرحله دوم: فازی‌سازی عوامل مؤثر در میزان خطر ناشی از زلزله

بنا بر نوع داده ورودی فازی‌سازی اطلاعات به چند روش صورت می‌گیرد.

– **داده‌های اسمی:** در این نوع داده‌ها از اعداد و علایم تنها برای رده‌بندی استفاده می‌شود، مانند کیفیت و اسکلت بنا که تنها ساختمان را توصیف می‌کنند. برای فازی‌سازی این نوع داده‌ها باید ابتدا آنها را با نظر کارشناس به مقیاس فاصله‌ای تبدیل و سپس آنها را فازی‌سازی کرد.

– **داده‌های ترتیبی:** این نوع داده‌ها افزون‌بر رده‌بندی داده ورودی، ترتیب اولویت آن را نیز آشکار می‌کنند، مانند دیرینگی بنا، در این حالت نیز با نظر کارشناس داده‌ها به مقیاس فاصله‌ای تبدیل و سپس فازی‌سازی می‌شوند.

– **داده‌های فاصله‌ای:** این نوع داده‌ها مقیاسی قوی‌تر از داده‌های ترتیبی دارند و می‌توان با آنها فواصل را مشخص کرد، البته در عواملی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند، داده‌ای با این مقیاس وجود ندارد ولی داده‌های با مقیاس اسمی و ترتیبی باید به مقیاس فاصله‌ای تبدیل شوند تا برای توابع فازی قابل استفاده باشند.

– **داده‌های نسبی یا نسبتی:** این داده‌ها در قوی‌ترین شکل خود قرار دارند و صفر آنها واقعی است؛ این نوع از داده‌ها خود به دو نوع گسسته و پیوسته تقسیم می‌شوند:

• نوع گسسته مانند نسبت ارتفاع به عرض گذرگاه همسایه، تعداد طبقات، عرض گذرگاه روبرو است. در نتیجه گسسته بودن داده‌های ورودی نتیجه خروجی توابع فازی نیز گسسته خواهد بود.

• نوع پیوسته مانند مساحت، سطح اشغال، فاصله از مراکز آتش‌نشانی، فاصله از مراکز درمانی، فاصله از زمین‌های خالی است. در نتیجه پیوسته بودن داده‌های ورودی نتیجه خروجی توابع فازی نیز پیوسته خواهد بود.

تابع فازی مورد استفاده در این پژوهش تابعی خطی است که داده‌ها را به صورت خطی و با شیب یکسان از حالت کلاسیک به حالت فازی تبدیل می‌کند.

$$f(x)=\begin{cases}0 & x<a\\ \dfrac{x-x_{\min}}{\Delta x} & a<x<b\\ 1 & b<x\end{cases}$$

که در این فرمول، $f(x)$ تابع فازی، x عامل آسیب‌پذیری، a و b کمینه و بیشینه میزان قابل قبول برای عامل آسیب‌پذیری و Δx اختلاف $x_{\min}$ و $x_{\max}$ هستند.

تکیه اصلی شاخص‌های انتخابی بر ابعاد کالبدی ساختمان استوار است. Sálvano دبیر مرکز استراتژی بین‌المللی برای کاهش بلایای طبیعی (International Strategy for Disaster Reduction (UN/ISDR)) طی مقاله‌ای در مجله National Geography با بررسی زلزله بم، عامل اصلی تلفات را آوار ناشی از تخریب ساختمان‌ها می‌داند و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها را به عنوان درس اصلی گرفته شده از این زلزله معرفی می‌کند (Sálvano, 2004). اما شاخص‌های دسترسی و فضایی نیز باید مورد توجه قرار گیرند. در میان عوامل مؤثر در میزان آسیب‌پذیری ناشی از زلزله دوری و نزدیکی به گسل، شتاب افقی زمین و تعداد طبقات بیشترین نقش را داشته و دوری و نزدیکی به مراکز امداد و نجات مانند آتش‌نشانی، دوری و نزدیکی به فضاهای بی‌کالبد شهری و رابطه توده و فضا کمترین اهمیت را داشته‌اند. به عبارتی در هر نوع آسیب‌پذیری بافت، شاخص‌هایی چون گسل و شتاب افقی نقشی دارند که دست‌کم ۸ برابر بیشتر از رابطه توده و فضاست. تجربه شهر بم هم نشان داد که با نزدیکی به گسل، تخریب بافت به شدت افزایش می‌یابد، چنانچه بافت تاریخی شهر بم تقریباً ۱۰۰ درصد تخریب شد که یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر این تخریب، فاصله تقریبی ۵۰۰ تا ۶۰۰ متری آن از گسل اصلی خاوری شهر بوده است. معیار درجه عضویت هر یک از کلاس‌ها نیز بر پایه مقایسه زوجی است که در آن یک شاخص نسبت به شاخص‌های دیگر با عناوینی چون غیر قابل مقایسه، اهمیت خیلی بیشتر، اهمیت بیشتر، یکسان و اهمیت خیلی کمتر سنجش می‌شود و طیفی از امتیازات را کسب می‌کند. به عنوان مثال در مدل تحلیل سلسله مراتبی این عامل از ۱ تا ۹ است. در میان لایه‌ها (شکل۸)، دوری و نزدیکی به/ از گسل مهمترین شاخص است و اهمیت زیادی دارد. درجه عضویت برای فاصله صفر تا ۲۰۰۰ متری گسل در نظر گرفته شده است. بدیهی است که فاصله بیش از ۲ کیلومتر به دلایلی همچون خروج از محدوده قانونی شهری و نیز فاصله زیاد از حریم درجه ۱ و ۲ گسل، تأثیری زیادی بر مدل نخواهد داشت. نقشه میزان تخریب شهر پس از زلزله نیز نشان از آن دارد که بیش از ۸۰ درصد تخریب‌ها در شعاع ۲ کیلومتری گسل اصلی شهر بوده است (شکل ۹).

۴-۳. مرحله سوم: تلفیق لایه‌ها بر پایه مدل IHPW

مدل IHPW منطقی برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مختلف بر پایه وارون رتبه و اهمیت آنها است. در این روش لایه‌ها طبق امتیازاتی که در مرحله اول بر پایه وارون درجه اهمیت هریک به آنها نسبت داده شده بود با یکدیگر تلفیق می‌شوند.

$$P(V)=\sum_{i=1}^{n} W_1\left(f\left(x_i\right)\right)$$

که در این فرمول، $P(V)$ امتیاز آسیب‌پذیری، n تعداد لایه‌های مورد استفاده در مدل IHPW، W_i وارون رتبه لایه i که به عنوان وزن آن لایه در نظر گرفته شده بود و $f(x_i)$ مقادیر فازی لایه i هستند.

طبق این فرمول بیشترین امتیاز آسیب‌پذیری یک مکان در بدترین شرایط از نظر همه عوامل امتیاز ۹۱ مجموع همه امتیازات و کمترین امتیاز یک مکان در بهترین شرایط امتیاز صفر می‌تواند باشد. اما جمع شدن، همه شرایط در یک محل، احتمال کمی دارد و این به خوبی در نتیجه مدل مشهود است؛ به این صورت که بیشترین امتیاز کسب شده عدد ۵۱/۱ و کمترین امتیاز یا به عبارت دیگر امتیاز ایمن‌ترین مکان ۱۵/۵۱ است. شکل ۱۰ مراحل نظری سه‌گانه ایجاد نقشه آسیب‌پذیری است و شکل ۱۱ کل مراحل مدل‌سازی آسیب‌پذیری ناشی از زلزله را نشان می‌دهد.

۵– تحلیل همبستگی میان آسیب ناشی از زلزله و پیش‌بینی آسیب‌پذیری توسط مدل

در میان روش‌های مختلف برنامه‌ریزی، مدل رگرسیون خطی به علت دو ویژگی، قیاسی بودن (توجیه روابط میان متغیرها و مشخصه‌ها) و آزمایش خودکار مدل (ساخت مدل= آزمایش مدل) از جمله بهترین روش‌ها است (طبیبیان، ۱۳۸۰). این روش برای حل مسائلی به کار می‌رود که هدف آنها را بتوان به روش ریاضی و به صورت یک تابع خطی بیان کرد. در این نوع مسایل به بیشینه یا به کمینه رساندن این تابع خطی که محدودیت‌هایی دارد، مورد نظر است. همچنین از این روش میان نواحی‌ای که از دید ایجاد شبکه ارتباطی محدودیت‌هایی دارند، نیز استفاده می‌شود. ضریب همبستگی بهترین معیار برای نشان دادن بود و یا نبود همبستگی و نیز میزان و جهت این همبستگی است. مقدار این ضریب میان ۱– (همبستگی وارون کامل)، صفر (عدم همبستگی) و ۱ (همبستگی مستقیم کامل) متغیر است. برای به دست آوردن ضریب همبستگی ابتدا باید کواریانس میان دو متغیر را محاسبه کرد. با روی‌هم‌گذاری نتایج حاصل از پیش‌بینی‌مدل برای آسیب‌پذیری (شکل۱۲) و آسیب ناشی از زلزله شهر بم (شکل ۱۳) کواریانس میان آن دو به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$cov\,(x\,,y)=E[(x-\bar{x})(y-\bar{y})]$$

در این فرمول x، میزان آسیب ناشی از زلزله و y، پیش‌بینی آسیب‌پذیری توسط مدل هستند. با توجه به کواریانس دو متغیر ضریب همبستگی میان آنها به صورت زیر

محاسبه می‌شود:

$$r = \frac{cov\,(x\,,\,y)}{\delta_x \,.\, \delta_y} = 0.595$$

که در این فرمول، انحراف معیار متغیر x،آسیب ناشی از زلزله؛ انحراف معیار متغیر y، پیش‌بینی میزان آسیب‌پذیری توسط مدل و r، ضریب همبستگی میان دو متغیر هستند. ضریب همبستگی به دست آمده میان دو متغیر به دلیل استفاده متغیرها برای محاسبه آن، نیازی به آزمون ندارد. این عدد به خوبی نشان می‌دهد که میزان آسیب‌پذیری نقاط شهری تا حد زیادی پیش از رخداد زلزله امکان‌پذیربوده است. ضریب همبستگی به دست آمده میان دو متغیر (۰/۵۹) به خوبی نشان می‌دهد که میزان آسیب‌پذیری نقاط شهری به ویژه بافت‌های کهن و فرسوده تا حد زیادی پیش از وقوع زلزله امکان‌پذیر است. این مسئله به چهار شاخص پایگاه داده و کامل شهری، نیروی انسانی خبره، سخت‌افزار و نرم‌افزار مناسب نیاز دارد. بدیهی است که در صورت وجود این عناصر نه تنها می‌توان مهم‌ترین پهنه‌های پرخطر شهری را شناسایی کرد بلکه می‌توان کارهای اولیه بهسازی و نوسازی شهری را نیز به شکل ضربتی از این مناطق شروع کرد.

نتایج به کارگیری این مدل برای شهر کهن بم نشان می‌دهد که محلات مرکزی و بافت کهن از آسیب‌پذیرترین بافت‌ها و نیز متراکم‌ترین فضای شهری به‌شمار می‌آیند. مهم‌ترین عامل‌های کالبدی- فضایی این محلات شامل: نبود نوسازی در واحدهای ساختمانی، بافت ارگانیک و شبکه گذرگاهی تودرتو، فقر اقتصادی ساکنین، طرح‌های نوع توسعه شهری (جامع و تفصیلی)، ضوابط ساخت‌وساز، قرارگیری در حریم آثار تاریخی مانند ارگ بم و بازار تاریخی شهر، ریزدانگی بافت، ساخت‌وسازهای غیر مجاز، توجه نکردن به آئین‌نامه ۲۸۰۰، نبود نظارت کافی بر ساخت‌وساز و ... جستجو کرد. برای نمونه شکل ۱۴ (دایره مشخص شده در شکل ۱۲ و ۱۳) بخشی از این بافت کهن بوده که در مدل پیش‌بینی از آسیب‌پذیرترین مناطق شهر شناخته شده و در صورت وجود نقشه‌های آسیب‌پذیری پیش از زلزله، می‌توانست مناطق پیشگام و یا پروژهای پرچم‌دار برای نوسازی و بهسازی شهر باشد. حتی مناطق جنوب و اطراف کمربندی شهر که از مصالح تقریبا بادوامی ساخته شده‌اند در مدل آسیب‌پذیری و نقشه تخریب پس از زلزله از جمله مناطق خطرناک شهری مشخص شده‌اند. این امر لزوم نظارت دقیق‌تر بر ساخت‌وساز و رعایت مقررات آن را الزامی ساخته و از طرف دیگر ساخت‌وساز در نزدیک گسل‌ها را با چالش مضاعف مواجه می‌سازد. تصویر میزان خطرپذیری یا آسیب‌پذیری ناشی از زلزله نشان می‌دهد هر نوع ساخت‌وساز و احداث لفاف‌های قوی ساختمانی در خاور شهر بم مردود است و لازم است افزون‌بر تعریف حریم درجه ۱ و ۲ تنها در قالب کاربری‌های ورزشی، فضای سبز، انبار، پایانه و ... که دارای سطح اشغال و زیر بنای کمی هستند استفاده شود.

۶- نتیجه‌گیری

گام اول در برنامه‌ریزی پیش از بحران شناخت مناطق شهری آسیب‌پذیر به وسیله تولید نقشه پهنه‌های آسیب‌پذیری است. در این پژوهش سعی شد مدلی بر پایه تحلیل فضایی برای بررسی میزان آسیب‌پذیری در اثر زلزله با استفاده از توابع تحلیل فضایی GIS ارائه شود تا معیاری برای میزان خطرپذیری ناشی زلزله در شهرها باشد. محدودیت‌هایی در مدل ارائه شده وجود دارد؛ ولی، هدف اصلی این پژوهش ایجاد زمینه‌ای جدید برای مدیران بحران است. نگاه فازی به مسئله آسیب‌پذیری می‌توانست و می‌تواند پاسخی به عدم قطعیت‌ها و ابهامات موجود در عوامل و مسایل مربوط به آسیب‌پذیری باشد، استفاده از این منطق کمک می‌کند که تئوری و واقعیت را هرچه بیشتر به هم نزدیک کرد.

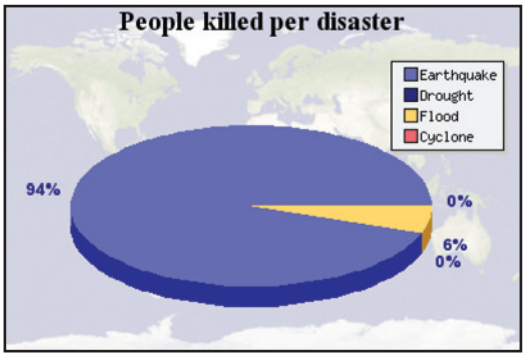
از سوی دیگر باید نقشه‌ای از نقاط آسیب‌پذیر تولید شود که امکان تطبیق‌پذیری با تغییرات را داشته و مبنایی برای تصمیم‌سازی برنامه‌ریزان و تصمیم گیرندگان باشد. به‌ویژه آنکه عامل اصلی تخریب زلزله ۱۳۸۲/۱۰/۵ بم رعایت نکردن اصول و ضوابط و دستورالعمل‌های فنی استحکام بنا، ضعف در الگوهای تفکیک، کیفیت نامناسب ساختمان‌ها و ... معرفی شد. در صورت رعایت ضوابط و دستورالعمل‌های آئین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، میزان تخریب به شدت کاهش می‌یافت. بنابراین تجدیدنظر این آئین‌نامه، به‌ویژه با استناد به تجربه بم، الزامی است.

زلزله بم باوجود رنج‌های مالی و جانی فراوان، این امکان را فراهم ساخت تا با شناخت عوامل مؤثر در ناپایداری شهری که پایداری آن را با مشکل روبه‌رو ساخته است، نقشه‌های مناطق آسیب‌پذیر تهیه و مهم‌تر از آن امکان اثبات مدل فراهم شود. نوآوری اصلی این پژوهش" آزمایش روایی و اعتبار درستی مدل پیش‌بینی" است که به نظر می‌رسد از جمله اولین پژوهش‌های تعیین آسیب‌پذیری شهری و آزمایش عینی و مکانی مدل تولیدشده در مقیاس ۱: ۲۰۰۰ است. این نوآوری با در اختیار داشتن نقشه آسیب‌پذیری شهری و درصد تخریب پس از زلزله، توان بالای (GIS) در تولید نقشه‌های رستری و وکتوری و مقایسه شبکه‌ای از اطلاعات و پیش‌بینی‌ها این مسئله محقق شد. این سامانه با امکانات ویژه‌ای چون سرعت و دقت، ورود و خروج اطلاعات و نقشه‌ها سامانه‌های دیگر، امکان تجزیه، تحلیل و تلفیق چند متغیره، امکان برنامه‌نویسی، تهیه بانک‌های اطلاعاتی داده‌های مکانی، تحلیل واحدهای همسایگی و پیوستگی، درون‌یابی، مسیریابی و ... از مهم‌ترین سامانه‌های طراحی‌شده در سال‌های اخیر است که پیاده‌سازی روش‌های پیشرفته و پیچیده برنامه‌ریزی شهر و منطقه را در کوتاه‌ترین زمان ممکن فراهم کرده است. چنان که در این مقاله با استفاده از ۱۳ متغیر موجود پیش از زلزله، نقاط بحرانی شهر شناسایی شد و پهنه‌هایی که متاسفانه پس از زلزله با بیشترین حجم تخریب روبه‌رو شد.

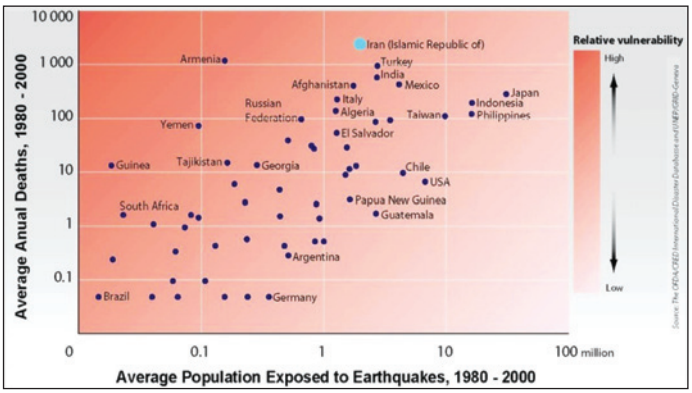
محاسبه و مقایسه ضریب همبستگی میان نقشه تخریب واحدها و فضاهای شهری پس از زلزله و نقشه تعیین آسیب‌پذیری شهری همبستگی کاملی را نشان داد. این همبستگی در واحدهای مسکونی و تجاری معنی‌دارتر است. با توجه به این واقعیت می‌توان با تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری شهری و منطقه‌ای در برابر بحران‌های طبیعی و مصنوعی، بخش مهمی از تلفات پس از بحران را کاهش داد. نکته مهم گریز از تعمیم‌یابی این شاخص‌ها به دیگر شهرها است و بومی‌سازی آن در هر شهر و منطقه‌ای باید متناسب با ساختار کالبدی- فضایی و ویژگی‌های زیست محیطی شهر باشد.

سپاسگزاری

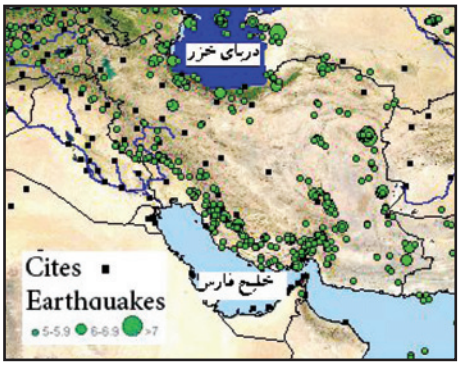
این پژوهش در دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است. بدین وسیله از مسئولان محترم این دانشگاه به ویژه در دانشکده معماری و شهرسازی سپاسگزاری می‌شود.



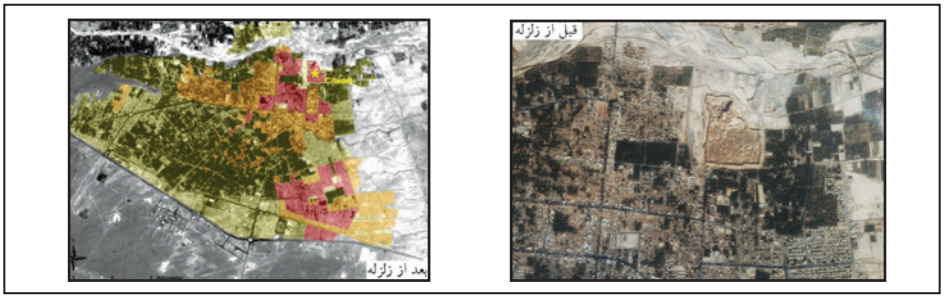
شکل ۱- سهم هریک از بلایای طبیعی در تلفات انسانی در سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ (UNEP, 2007).



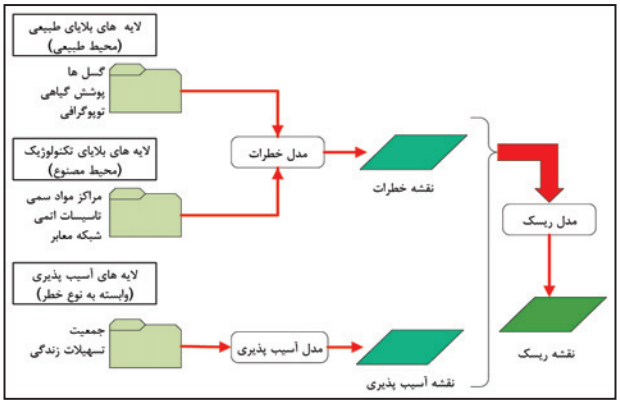
شکل ۲- آسیب‌پذیری ناشی از زلزله (UNDP, 2003)



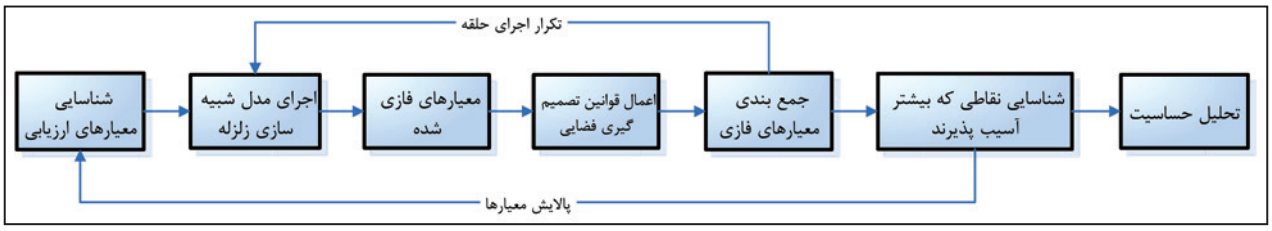
شکل ۳- پراکندگی زمین‌لرزه‌ها در ایران در سال‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۰۵ میلادی (UN/ISDR, 2007)



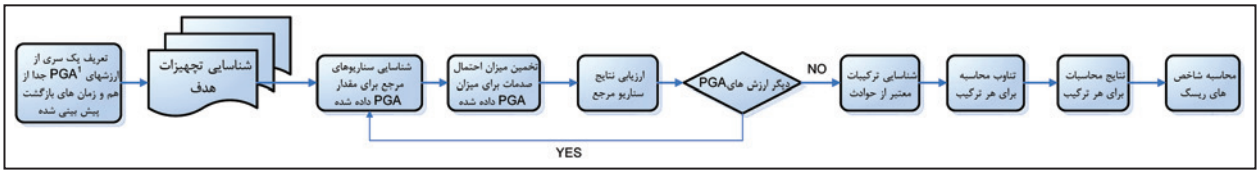
شکل ۴- تصویر ماهواره‌ای بخشی از شهر بم پیش از زلزله در مقایسه با نواحی آسیب دیده پس از زلزله (Rapid Mapping Service)



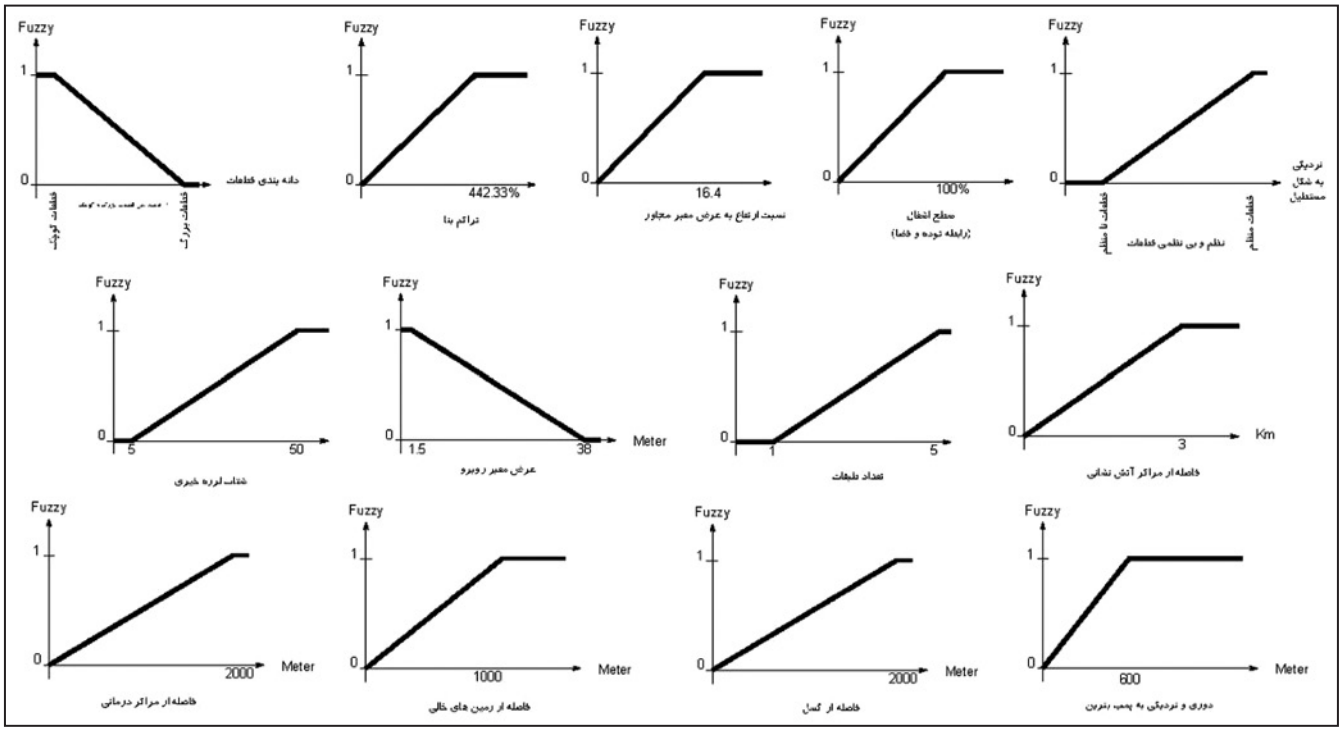
شکل ۵- مدل Cova برای برآورد میزان آسیب‌پذیری ناشی از زلزله (Cova, 1999)



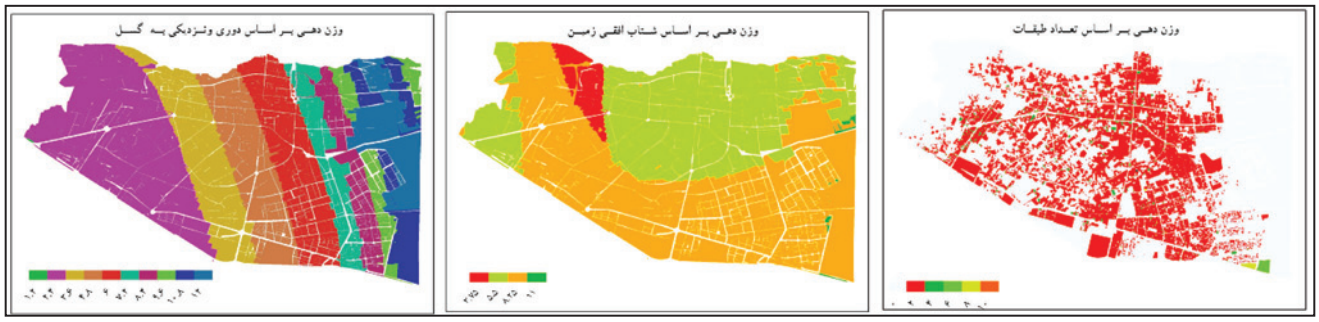
شکل۶- چارچوب نظری مطالعه راشد (Rashed & Weeks, 2003)



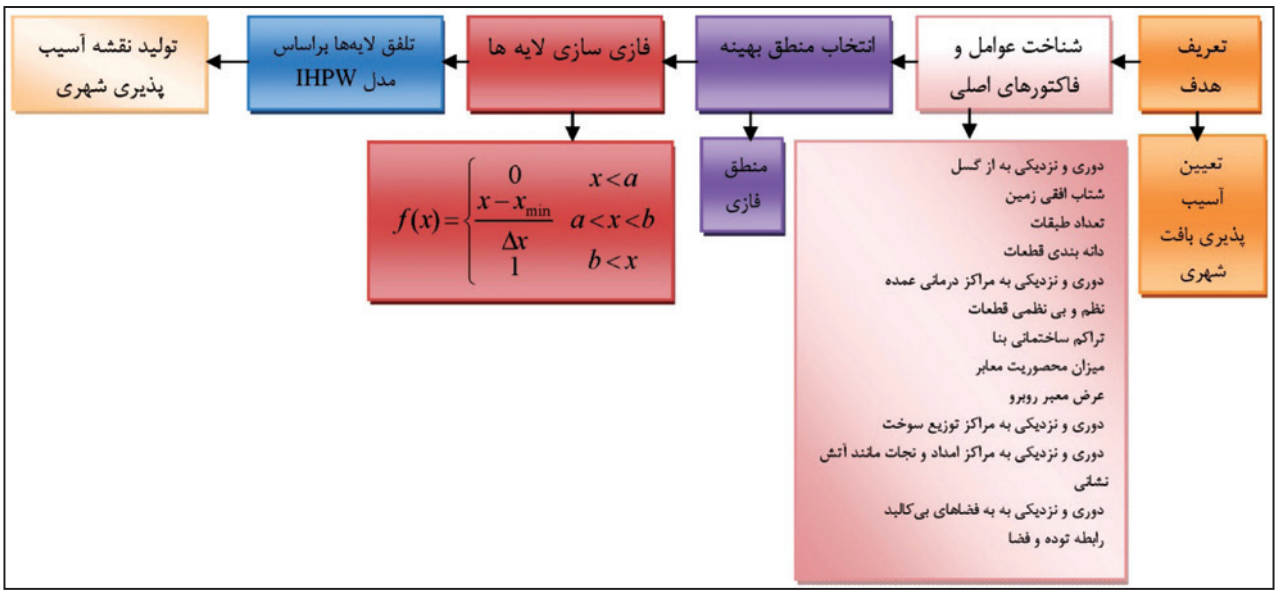
شکل ۷- روند برآورد خطر زلزله بر روی کارخانه‌های صنعتی (Antonioni et al., 2007)



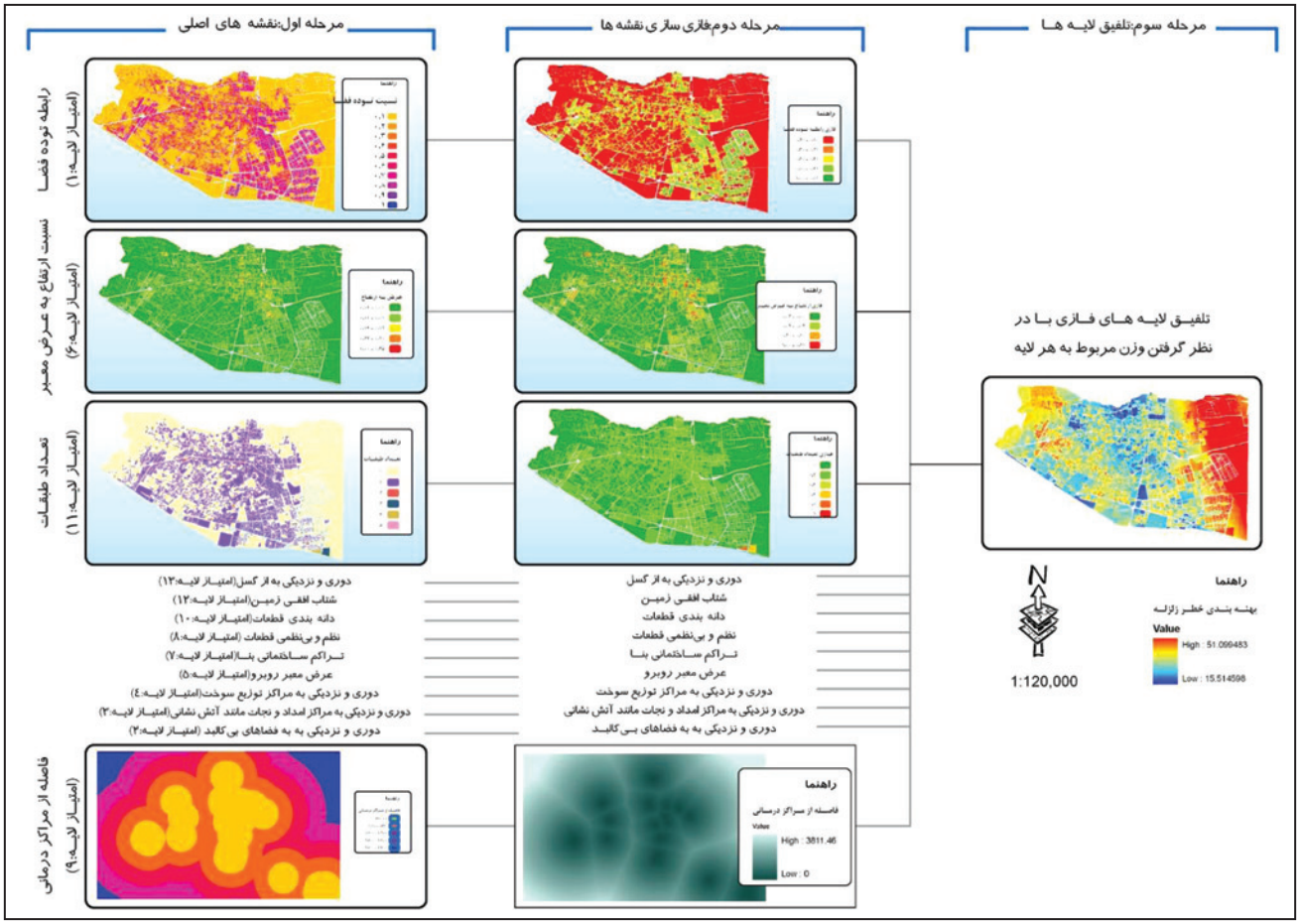
شکل ۸ - لایه‌های مورد استفاده و تعیین درجه عضویت آن بر پایه تابع فازی خطی ممدانی (www.Mamdani's Fuzzy Inference Method).



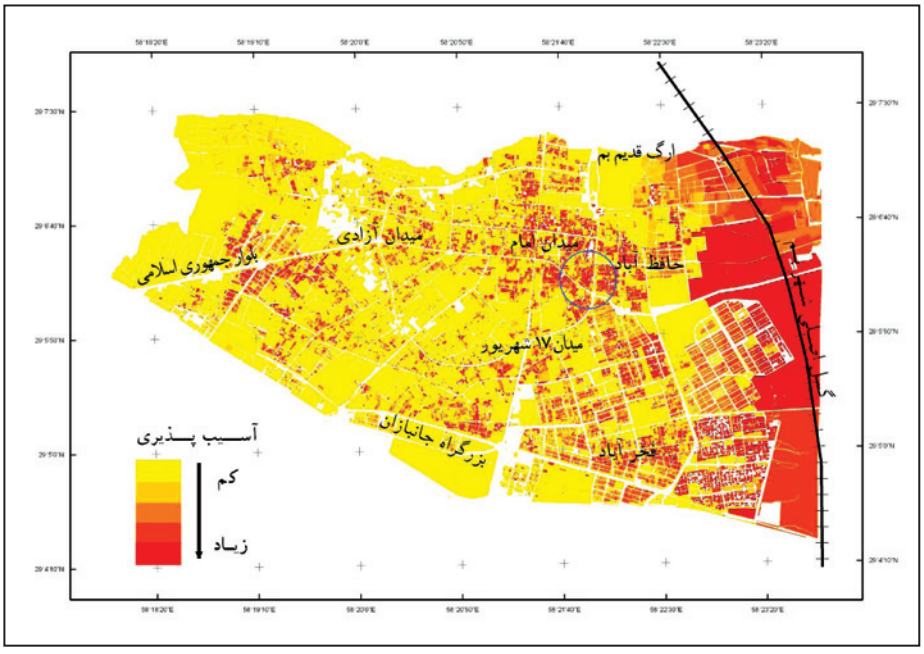
شکل ۹- وزن‌دهی به لایه‌های با اهمیت بیشتر (گسل، شتاب افقی، طبقات)



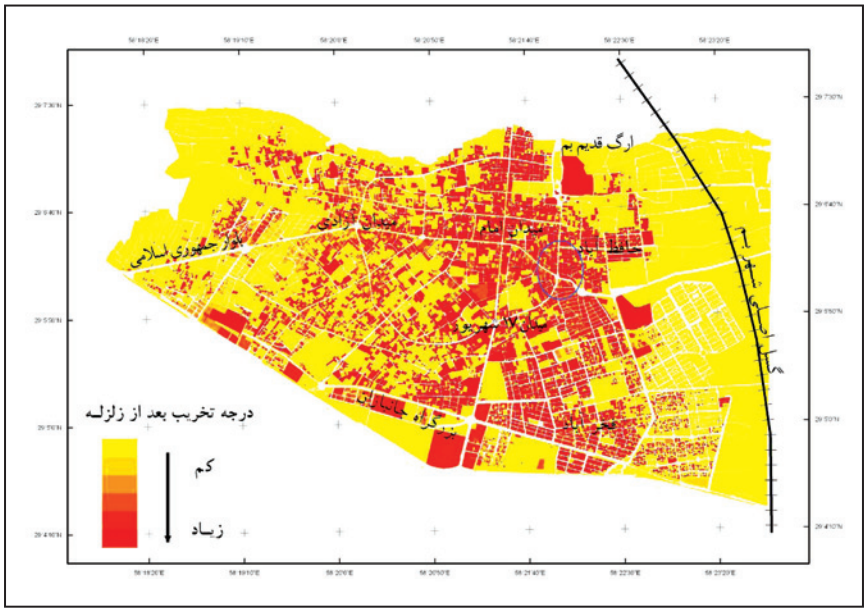
شکل ۱۰- فرایند تولید نقشه آسیب‌پذیری شهری



شکل ۱۱- مراحل مدل‌سازی آسیب‌پذیری ناشی از زلزله



شکل ۱۲- میزان خطرپذیری یا آسیب‌پذیری ناشی از زلزله با ۱۳ متغیر انتخابی



شکل ۱۳- میزان آسیب وارده حقیقی پس از زلزله سال ۱۳۸۲ بر پایه برآوردهای دقیق مشاور طرح بازسازی (مهندسین مشاور آرمانشهر، ۱۳۸۲)

شکل ۱۴- بخشی از بافت کهن و مرکز شهر بم پس از زلزله که نتایج مدل را اثبات می‌کند.

جدول ۱- عوامل مؤثر در میزان آسیب‌پذیری ناشی از زلزله و وزن آنها

رتبه	عامل مؤثر در میزان آسیب‌پذیری ناشی از زلزله	امتیاز لایه
۱	دوری و نزدیکی به گسل	۱۳
۲	شتاب افقی زمین	۱۲
۳	تعداد طبقات	۱۱
۴	دانه‌بندی قطعات	۱۰
۵	دوری و نزدیکی به مراکز درمانی اصلی	۹
۶	نظم و بی‌نظمی قطعات	۸
۷	تراکم ساختمانی بنا	۷
۸	میزان محصوریت گذرگاه‌ها	۶
۹	عرض گذرگاه روبرو	۵
۱۰	دوری و نزدیکی به مراکز توزیع سوخت	۴
۱۱	دوری و نزدیکی به مراکز امداد و نجات مانند آتش‌نشانی	۳
۱۲	دوری و نزدیکی به فضاهای بی‌کالبد	۲
۱۳	رابطه توده و فضا	۱

جدول ۲- فازی‌سازی عوامل مؤثر در میزان آسیب‌پذیری ناشی از زلزله و وزن آنها

رتبه	عامل مؤثر در میزان آسیب‌پذیری ناشی از زلزله	امتیاز لایه	فازی کامل	مقادیر فازی سازی شده	بدون فازی
۱	دوری و نزدیکی به/از گسل	۱۳	۰	مقادیر میان ۰ تا ۲۰۰۰ متر	بیش از ۲ کیلومتر
۲	شتاب افقی زمین	۱۲			
۳	تعداد طبقات	۱۱	۵ طبقه	مقادیر میان ۵ طبقه تا بدون طبقه	بدون طبقه
۴	دانه‌بندی قطعات	۱۰	کمتر از ۱۰۰متر مربع	مقادیر میان ۱۰۰ تا ۲۵۰۰ متر مربع	بیش از ۲۵۰۰ متر مربع
۵	دوری و نزدیکی به مراکز درمانی اصلی	۹	بیش از ۲ کیلومتر مربع	مقادیر میان ۰ تا ۲۰۰۰ متر	۰
۶	نظم و بی‌نظمی قطعات	۸	قطعات کاملا بی نظم	مقادیر میان قطعات کاملا بی نظم و چندضلعی تا قطعات منظم و مستطیل	قطعات منظم و مستطیل
۷	تراکم ساختمانی بنا	۷	تراکم ۴۴۲ درصد	مقادیر میان صفر تا ۴۴۲ درصد	۰ درصد
۸	میزان محصوریت گذرگاه‌ها	۶	۱۶ برابر	مقادیر میان ۱۶ برابر تا صفر	بدون محصوریت
۹	عرض گذرگاه روبرو	۵	۱/۵متری	مقادیر میان ۳۸ متری تا ۱/۵ متری	۳۸ متری
۱۰	دوری و نزدیکی به مراکز توزیع سوخت	۴	۰	مقادیر میان ۰ تا ۶۰۰ متر	بیش از ۶۰۰ متر
۱۱	دوری و نزدیکی به مراکز امداد و نجات مانند آتش‌نشانی	۳	بیش از ۳ کیلومتر	مقادیر میان ۰ تا ۳۰۰۰ متر	۰
۱۲	دوری و نزدیکی به فضاهای بی‌کالبد	۲	بیش از ۱ کیلومتر	مقادیر میان ۰ تا ۱۰۰۰ متر	۰
۱۳	رابطه توده و فضا	۱	۱۰۰درصد اشغال زمین	مقادیر میان اشغال ۱۰۰ درصد زمین و زمین‌های خالی از بنا	۰ درصد اشغال زمین

کتابنگاری

اردلان، ع. ر.، فروتن، ا. و آقامحمدی، ح.، ۱۳۸۵- مدل‌سازی برای کاهش خسارت‌های بحران زلزله. همایش مقابله با سوانح طبیعی. تهران: پردیس فنی دانشگاه تهران، ۲۹.

حبیبی، ک.، ۱۳۸۵- توسعه کالبدی، حفاظت، بهسازی و نوسازی بافت‌های کهن شهری با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، رساله دکتری، دانشگاه تهران، تهران.

رنجبر، م.، اشراقی، م. و ایرانمنش، ف.، ۱۳۸۵- تهیه الگوی پایگاه اطلاعات مکانی به منظور مکان‌یابی محل‌های استقرار موقت جمعیت‌های آسیب دیده ناشی از زلزله. اولین همایش مقابله با سوانح طبیعی. تهران: پردیس فنی دانشگاه تهران، ۸۶- ۸۸

طبیبیان، م.، ۱۳۸۰- مدل‌های کاربردی در تحلیل مسائل شهری، انتشارات دانشگاه تهران.

عبدالهی، م.، ۱۳۸۳- مقدمه کتاب مدیریت بحران در نواحی شهری، چاپ سوم. تهران: سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌های کشور.

مهندسین مشاور آرمانشهر، ۱۳۸۲- طرح تفصیلی ویژه بم، تهران، وزارت مسکن و شهرسازی.

References

Antonioni, G., Gigliola, S. & Valerio, C., 2007- A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events, Journal of Hazardous Materials, Article in press.

Aysan, Y. & Davis, I., 1994 - "Conclusions and recommendations for the international decade for natural disaster reduction (IDNDR)." Disasters and the small dwelling: Perspective for the UN IDNDR (James and James Science), 1992: 256-260.

Cova, T. J., 2009- GIS in emergency management, Geographic Information Systems: Principle Techniques, 845-858.

Kreimer, A., Arnold, A. & Carlin, A., 2003- Building safer cities. The future of disaster risk. Disaster risk management series, Vol. 3, The Worldbank.

Mileti, D., 1999- Disasters by Design: a reassessment of natural hazards in the United States. Joseph Henry Press.

Ministry of Interior, 2005- National report of the Islamic republic of Iran on disaster reduction, World Conference on Disaster Reduction, Kobe, Hyogo, Japan.

Rashed, K. & Weeks, J., 2003- Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas, International Journal of Geographic Information Science 17(6): 547-576.

Richter, C. F., 1976- "Earthquake Light in Focus". Science15 October, 194 (4262): 259

Sálvano, B., 2004- What We Learn From Deadly Quakes, National Geographic, September.

UN/ISDR, 2005- Word Conference on Disaster Reduction. 18- 22 January, Kobe, Hyogo, Japan.

UN/ISDR, 2007 - www.unisdr.org (March 2007).

UNDP, 2003- Reducing Disaster Risk: A Challenge for Development. UNDP.

UNEP, 2007- Country Profile. gridca.grid.unep.ch (accessed April 3, 2007).

USAID, 2001- Making cities work: USAID›s urban strategy, an Initiative launched by the Administrator and prepared by the Urbanization task force.

Van Westen, C., 2006- Geoinformation Science and Earth Observation for municipal risk management; The SLARIM project, International Instititute for Geoinformation Science and Earth Observation, ITC, P.O. Box 6, 7500 AA Enschede, The Netherlands.

Zadeh, L., 1975- the concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning, Information Sciences 8: 199-249.