مقایسه‌ی مدل بهینه‌سازی تصادفی و سایر روش‌های احتمالی برای اختصاص منابع اقتصادی جهت کاهش ریسک لرزه‌ای منطقه‌ای

الناز پیغاله* – دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی؛ peyghaleh@dena.kntu.ac.ir
محمدرضا ذوالفقاری – دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۲۹
تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۲۴

چکیده

این پژوهش با هدف ارائه‌ی روشی برای ارزیابی و تعیین اولویت اقدامات کاهش ریسک لرزه‌ای در کشورهای لرزه‌خیز در حال توسعه و اختصاص بودجه‌ی لازم به این اقدامات و یاری دادن مدیران و تصمیم‌گیرندگان در این امر، انجام شده است. در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی بهینه‌سازی تصادفی (احتمالی) دو مرحله‌ای توسعه داده شده که منابع اقتصادی اختصاص یافته به راهکارهای کاهش ریسک لرزه‌ای (مقاوم‌سازی) و بازسازی پس از زلزله‌های احتمالی آینده را در سطح منطقه‌ای بهینه سازد. مدل بهینه‌سازی پیشنهاد شده، راهکارهای کاهش ریسک‌های موجود را با هدف کمینه کردن هزینه‌های مقاوم‌سازی، بازسازی و ریسک خسارت اقتصادی بیش از حد مجاز مورد جستجو قرار می‌دهد، تا راهکار بهینه را با توجه به محدودیت‌های موجود پیدا کند. همچنین در پژوهش حاضر برای بررسی مدل تصادفی پیشنهاد شده از دیدگاه عدم قطعیت وقوع زلزله‌ها و نشان دادن برتری مدل تصادفی نسبت به سایر روش‌های احتمالی که بحث عدم قطعیت زلزله‌ها را خارج از فرایند بهینه‌سازی در نظر می‌گیرند، مدل‌های احتمالی دیگر نیز ارائه شده است و با انجام مطالعه‌ی موردی برای شهر تهران، اولاً کاربردهای عملی مدل تصادفی و سایر روش‌های احتمالی بهینه‌سازی پیشنهاد شده ارائه شده است، ثانیاً با محاسبه‌ی مقادیر کلیدی نشانگر برتری مدل‌های تصادفی با نام‌های «ارزش مورد انتظار اطلاعات صحیح» و «ارزش حل تصادفی»، مدل تصادفی با سایر مدل‌های احتمالی مورد مقایسه قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: *کاهش ریسک لرزه‌ای، بهینه‌سازی، اختصاص منابع، مقاوم‌سازی، مدل تصادفی، ارزش حل تصادفی*

Comparing Two-Stage Stochastic Programming and Other Probabilistic methods For Resource allocation for Regional Earthquake risk Mitigation

Elnaz Peyghaleh[1*], **Mohammad Reza Zolfaghari**[2]

Abstract

This paper is presented with the aim of finding optimum methodology to prioritize the seismic risk mitigation strategies in earthquake hazard prone areas and financing them, which could help decision makers in earthquake risk mitigation process. Therefore, a two-stage stochastic model is developed to optimize funds allocation for risk reduction measures (retrofitting of buildings) and reconstruction measures after potential earthquakes in a regional level. The proposed stochastic model seeks optimized strategy towards risk reduction based on minimizing various criteria such as mitigation expenditures, reconstruction costs, and excess reconstruction expenditures induced by probable earthquakes. This paper is presenting the methodology, main components of proposed model and practical application through a pilot study, taking into account, regional seismic hazard, building stocks and building vulnerability functions for Tehran. In order to investigate the consideration of uncertainty related to probable earthquakes in proposed model and illustrate the advantages and excellence capabilities of stochastic programming compared to other approaches, which consider the probability in the process of finding optimum earthquake risk mitigation measures and strategies, such approaches are discussed here and some pilot studies are designed and performed based on these approaches, as well. All model parameters related to these approaches are similar to the proposed stochastic programming model. The results of these pilot studies are compared with the pilot analyses done based on proposed stochastic programing. Furthermore, the key values: "the expected value of perfect information" and "the value of stochastic solution" which are used to demonstrate the advantages of considering stochastic programing are presented.

Keywords: *Seismic Risk Mitigation, Optimization, Resource Allocation, Retrofitting, Stochastic Model, Value of Stochastic Solution*

1 PH.D Candidate, Department of Civil Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran; Email:epeyghaleh@dena.kntu.ac.ir
2 Associate Professor, Department of Civil Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

مقدمه

بلایای طبیعی همواره جان انسان‌ها و اموال و دارایی‌های آن‌ها را مورد تهدید قرار می‌دهد و منجر به خسارات اقتصادی و اجتماعی شدید و گسترده‌ای می‌گردد. به گواه رویدادهای پیشین در کشورهایی مانند هائیتی، ایران و ترکیه، آثار و خسارات اجتماعی بلایای طبیعی در کشورهای در حال توسعه بسیار شدیدتر است. به علاوه اگرچه خسارات اقتصادی ناشی از بلایای طبیعی در کشورهای در حال توسعه کمتر از کشورهای توسعه یافته است، مقدار این خسارات در مقایسه با مقدار تولید ناخالص ملی[1] (GDP) بسیار حائز اهمیت است. این خسارات شامل خسارت به اموال و دارایی‌ها، خرابی ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها، اختلال در عملکرد تجاری و اثرگذاری منفی بر اقتصاد کلان به دنبال یک بلای طبیعی بزرگ است.

مدیریت ریسک بلایای طبیعی که در سال‌های اخیر به کار گرفته شده است، شامل راهکارهای فراوانی است که برای کاهش آثار نامطلوب و مخرب این بلایا انجام شده است. این راهکارها شامل ارتقای آیین‌نامه‌های طراحی، مقاوم‌سازی ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها، افزایش آگاهی عمومی، استفاده از دستگاه‌های هشدار سریع و انتقال ریسک است. این راهکارها بر مبنای اهدافی که از اجرای آن دنبال می‌شود در سطوح مختلف منطقه‌ای، ملی، استانی و یا محلی به اجرا در می‌آیند. مدیریت ریسک بلایا با راهکارهایی که به کار می‌برد، می‌تواند انواع پیامدهای خطرهای طبیعی را هدف قرار دهد (خرابی ساختمان‌ها، تلفات انسانی، خرابی زیرساخت‌ها، تأسیسات و امکانات شهری و شریان‌های حیاتی). با وجود اجرای این برنامه‌های مدیریتی، این نگرانی همواره وجود داشته است که بودجه‌ی مورد نیاز برای طرح‌های مدیریت ریسک چگونه باید میان راهکارهای مختلف توزیع گردد و یا آنکه این توزیع بدون توجه به بزرگی و مقدار ریسک و تنوع گزینه‌های کاهش ریسک در مناطق شهری مورد نظر انجام شود؛ که در این صورت سرمایه‌ها و بودجه‌ی ملی به هدر می‌رود و از آن‌ها در بهینه‌ترین راهکارها استفاده نخواهد شد و در نتیجه فرصت‌ها از دست خواهد رفت. بنابراین از بدو به اجرا درآمدن برنامه‌ها و راهکارهای مدیریت و کاهش ریسک، روش‌هایی برای ارزیابی سودمندی (کارایی) و اثرگذاری این برنامه‌ها و مقایسه‌ی نتایج پیاده‌سازی محتمل هر یک از این راهکارها ارائه گردید. این روش‌ها، با توجه به لزوم واقعی ارتقای آن‌ها، در حال پیشرفت و به روز شدن هستند. در این راستا در این پژوهش مدلی احتمالی، با هدف ارزیابی و تعیین اولویت اقدامات کاهش ریسک لرزه‌ای و اختصاص بودجه‌ی لازم به این اقدامات، ارائه شده که مدیران ریسک و تصمیم‌گیرندگان در این امر را یاری می‌دهد؛ همچنین راهکاری احتمالی برای سنجش میزان اثرگذاری و سودمندی روش‌های کاهش ریسک لرزه‌ای و انتخاب بهینه‌ترین روش در مناطق با لرزه‌خیزی نسبتاً بالا پیشنهاد شده است. در این مقاله برای نشان دادن کاربرد مدل پیشنهاد شده، یک مطالعه‌ی موردی کامل برای محیط ساختمان‌های مسکونی شهر تهران انجام شده است. شهر تهران بر روی لایه‌های آبرفتی در کوهپایه‌ی رشته کوه البرز، که بخشی از ناحیه‌ی کوهزای آلپ - هیمالیا است، توسعه یافته و با گسل‌های فعال فراوانی در شمال و جنوب محاصره شده است (گسل شمال تهران، گسل مشاء، گسل ری شمالی و جنوبی، طالقان). این گسل‌ها می‌توانند مجموعه‌ای از زلزله‌های کوچک و بزرگ را در فواصل بسیار نزدیک از این پایتخت سیاسی و اقتصادی پرجمعیت ایجاد نمایند. بر اساس داده‌های لرزه‌ای تاریخی، تهران زلزله‌های قوی متعددی را، با دوره‌ی بازگشت ۱۵۰ سال، تجربه کرده است [۱]. اگرچه تهران از سال ۱۸۳۰ تا کنون و در دوران ساخت و سازهای مدرن مهندسی سازه و زلزله، زلزله‌ی بزرگی را تجربه نکرده است، امکان وقوع یک زلزله‌ی بزرگ مخرب با پیامدهای بحرانی در نزدیکی این شهر، مانند آنچه در سال ۱۹۹۰ در منجیل رخ داد و منجر به کشته شدن حدود ۱۴۰۰۰ انسان گردید، بسیار محتمل است. تصور وقوع زلزله‌ای مانند بم در تهران و پیامدهای فاجعه‌بار احتمالی آن حتی منجر به این شد که دولت ایران بحث انتقال پایتخت از تهران را پس از رویداد آن زلزله مورد توجه و بررسی قرار دهد. اگرچه این امر به نتیجه نرسید، از زمان آن زلزله تا کنون طرح‌های کاهش ریسک سازه‌ای و غیرسازه‌ای زیادی در تهران به اجرا درآمده است و بخش‌های خصوصی و عمومی متعددی در کاهش ریسک لرزه‌ای مربوط به خود سعی کرده‌اند. به علاوه برنامه‌ها و مطالعات گسترده‌ای در رابطه با پیشگیری و مدیریت بحران در سطح تهران انجام شده است [۱، ۲، ۳]. علی‌رغم تمامی این تلاش‌ها همچنان ضعف‌های فراوانی وجود دارد که کارآمدی اقدامات پیشگیرانه و کاهش ریسک را زیر سؤال می‌برد که می‌توان به محدودیت منابع اقتصادی برای مقاوم‌سازی و بازسازی ساختمان‌های مسکونی آسیب‌پذیر، فقدان وجود یک برنامه‌ی بهینه‌سازی برای اختصاص منابع اقتصادی به اقدامات و راهکارهای کاهش ریسک، توجه کم به اولویت‌بندی مناسب برنامه‌های کاهش ریسک لرزه‌ای اشاره کرد. برای مثال این ضعف در گزارش «ارزیابی مدیریت بلایا در سطح محلی و پیشنهاد اقدامات عملی، مطالعات و ارزیابی قوانین، مقررات و ساختار مدیریت بلایا در ایران» مورد تأکید قرار گرفته است. در این گزارش نیاز مبرم به انجام تحلیل‌های سود ـ هزینه برای هریک از طرح‌های کاهش ریسک پیشنهاد شده است [۳].

برای اقدامی در راستای فایق آمدن بر مشکلات مذکور، در این پژوهش مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای[2] برای بهینه‌سازی اختصاص منابع اقتصادی و اقدامات کاهش ریسک لرزه‌ای پیشنهاد می‌گردد که قادر است عدم قطعیت‌های مربوط به اثر زلزله‌ها را در مدل‌سازی اقدامات کاهش ریسک لرزه‌ای منطقه‌ای و نحوه‌ی سرمایه‌گذاری برای این اقدامات، در نظر بگیرد. مدل برنامه‌ریزی تصادفی و تحلیل و بررسی نتایج مطالعه‌ی موردی انجام شده بر پایه‌ی آن، می‌تواند در درک بهتر، هدایت طراحی‌ها و اولویت‌بندی راهبردها و راهکارهای مقاوم‌سازی، پیامدهای حاصل از اجرای هر یک از راهکارها مانند هزینه‌های بازسازی در صورت وقوع هریک از زلزله‌های سناریو، و مشارکت نسبی هر یک از زلزله‌های محتمل در افزایش خسارات از میزان خسارت قابل

قبول یا مدیریت‌پذیر، مدیر ریسک را یاری نماید. مدل بهینه‌سازی تصادفی در نظر گرفته شده در این پژوهش، به دلیل شکل ویژه‌ی رابطه‌بندی آن در مقایسه با سایر مدل‌هایی که برای در نظر گرفتن عدم قطعیت زلزله‌ها در تصمیمات اختصاص منابع و کاهش ریسک لرزه‌ای وجود دارند، از برتری نسبی برخوردار است. برای بررسی و نشان دادن برتری‌های مدل تصادفی به سایر روش‌های احتمالی، ابتدا الگوریتم و رابطه‌بندی این مدل‌ها در این پژوهش ارائه شده است. سپس روش‌های «ارزش مورد انتظار اطلاعات صحیح»[۳] و «ارزش حل تصادفی»[۴] نیز شرح داده شده است تا با محاسبه‌ی آن‌ها در مطالعه‌ی موردی، ارزش تحلیل برنامه‌ریزی تصادفی بیشتر مشخص گردد.

پیدا کردن راهکار بهینه‌ی کاهش ریسک و مدل‌های بهینه‌سازی

روش‌های متعددی برای ارزیابی راهکارها و برنامه‌های مدیریت ریسک و ارزیابی آثار و سودمندی اجرای این راهکارها و در نتیجه انتخاب راهکارهای پرسودتر یا بهینه‌تر از میان راهکارهای موجود ارائه شده است. همچنین این روش‌ها می‌توانند در اختصاص منابع به راهکارهای سودمندتر و همچنین تعیین نحوه‌ی توزیع منابع میان راهکارهای سودمند انتخاب شده نیز به مدیر ریسک کمک کنند. پژوهش‌های پیشین انجام شده در مورد ارزیابی چگونگی اختصاص منابع برای مدیریت ریسک بلایای طبیعی را می‌توان به چهار گروه اصلی تقسیم کرد [۴، ۵]: ۱. تحلیل‌های ارزش فعلی خالص (NPV) یقینی[۵] (روش‌های سود ـ هزینه[۶]) [۱، ۶]؛ ۲. تحلیل‌های ارزش فعلی خالص (NPV) احتمالی[۷] [۷، ۸]؛ ۳. مدل‌های سود چند صفته[۸] [۹، ۱۰] و ۴. مدل‌های بهینه‌سازی.[۹] سه روش اول امکان مقایسه میان تعداد اندکی از راهکارها و گزینه‌های مقاوم‌سازی تعریف شده از قبل را فراهم می‌آورند، در حالی که مدل‌های بهینه‌سازی، مجموعه‌ی بزرگی از راهکارها و گزینه‌های مقاوم‌سازی را می‌توانند مورد مقایسه قرار دهند و تابع هدف خاصی را مانند سود بیشتر و یا خسارت لرزه‌ای کمتر، با در نظر گرفتن محدودیت‌های مشخص، بیشینه یا کمینه کنند [۵، ۱۱].

مدل‌های بهینه‌سازی در واقع یک بیان ریاضی برای راه حل‌هایی است که منجر به حل مسائل «اختصاص منابع» می‌شود. از طرف دیگر مسائل اختصاص منابع خود شاخه‌ای از علم وسیع‌تری با نام تحقیق در عملیات است که از جنبه‌های مختلف به زیرشاخه‌های متعددی تقسیم می‌شود. از نظر عدم قطعیت و احتمال وقوع موقعیت‌های امکان‌پذیر مختلف (زلزله) روش‌های اختصاص منابع یا بهینه‌سازی مرتبط با آن‌ها به دو دسته‌ی برنامه‌ریزی یقینی (خطی، صحیح و غیرخطی) و برنامه‌ریزی تصادفی یا احتمالی (مدل‌های بهینه‌سازی یا برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای، مدل‌های بهینه‌سازی یا برنامه‌ریزی چند مرحله‌ای و ...) تقسیم می‌شود. بهینه‌سازی تصادفی را اولین بار دنزیگ [۱۲] و بیل [۱۳] برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در پروسه‌ی تصمیم‌گیری معرفی کردند. ایده‌ی اصلی این روش در واقع تقسیم مسئله به چندین مرحله‌ی مختلف است، که اطلاعات میان این مراحل به‌طور تدریجی آشکار می‌شود. مدل‌های بهینه‌سازی تصادفی را می‌توان با تبدیل آن‌ها به مدل‌های یقینی معادل حل کرد.

هارش شاه و همکاران [۱۴] برای اولین بار یک مدل برنامه‌ریزی صحیح را که دارای قیدهایی برای محدودیت بودجه است، برای بیشینه کردن تحلیل‌های سود ـ هزینه‌ی انجام طرح مقاوم‌سازی لرزه‌ای ارائه کردند. چهار طرح مختلف مقاوم‌سازی سازه‌ای به‌مثابه‌ی روش کاهش ریسک لرزه‌ای برای پانزده ساختمان در دانشگاه استنفورد در این مدل در نظر گرفته شده بود. سود ناشی از این کار تنها برای یک سناریوی زلزله برآورده شده بود. پژوهشگران مؤسسه‌ی بین‌المللی تحلیل سیستم‌های کاربردی در امریکا (IIASA)[۱۰] مدل بهینه‌سازی تصادفی دینامیکی ویژه‌ای را برای انتخاب از میان سیاست‌های بیمه‌ای (حق بیمه)[۱۱] تهیه کردند. این مدل بهینه‌ترین تصمیم در میان تصمیمات موجود را که سود شرکت بیمه را بیشینه می‌کند، تعیین می‌نماید. نسخه‌هایی از این برنامه برای مطالعات موردی ریسک زلزله در روسیه به کار برده شده است. نکته‌ای که در رابطه با مدل‌های مؤسسه‌ی IIASA وجود دارد این است که تمرکز اصلی این مدل‌ها بر مبنای اقتصاد است و رابطه‌بندی این مدل‌ها نیز بر پایه‌ی منافع اقتصادی سرمایه‌گذاران بخش خصوصی استوار است [۴].

دسته‌ی دیگری از مدل‌های بهینه‌سازی نیز وجود دارد که برخلاف مدل‌های فوق، بر پایه‌ی تصمیم‌گیری‌های کاهش ریسک از منظر منافع اقتصادی عمومی است (بودجه‌ی این اقدامات از طریق بودجه‌ی کشور تأمین می‌شود که متعلق به همه‌ی مردم است). رابطه‌بندی این مدل‌ها کاملاً متفاوت است و دارای منطقی شبیه به متدولوژی‌های ارزیابی خسارت و ریسک منطقه‌ای است [۴]. این مدل‌ها اولین بار توسط دودو و همکاران ارائه گردید [۵]. دودو و همکاران [۵] برای اولین بار یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای اختصاص منابع و کاهش ریسک لرزه‌ای منطقه‌ای تهیه کردند. مدل‌های دیگری نیز به دنبال مدل دودو و همکاران و بر پایه‌ی تصمیم‌گیری‌های کاهش ریسک از منظر منافع عمومی ارائه شده‌اند [۱۱، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰]. خلاصه‌ای از مشخصات این مدل‌ها در جدول ۱ درج شده است. همه‌ی این مدل‌ها به غیر از مدل لگ [۱۸] بر تصمیم‌گیری‌های کاهش ریسک لرزه‌ای متمرکز هستند. مدل لگ بر روش‌های کاهش ریسک مرتبط با هاریکین (طوفان) متمرکز است. به علاوه همه‌ی این مدل‌ها دارای منطقی شبیه به متدولوژی‌های ارزیابی خسارت و ریسک منطقه‌ای هستند و مشخص می‌کنند که کدام ساختمان‌ها (از منظر نوع سازه، کاربری و مکان قرارگیری آن) باید تقویت شوند تا مقدار هزینه‌ی کل اجرای روش‌های کاهش ریسک و هزینه‌های بازسازی مورد انتظار پس از زلزله، کمترین مقدار را داشته باشد. هر یک از این مدل‌ها در نهایت برای تحلیل بخشی از یک شهر یا منطقه‌ی شهری توسعه یافته و به کار برده شده است. ژو و همکاران در پژوهشی دیگر [۱۷] مدل دودو و همکاران [۵] را به یک مدل بهینه‌سازی تصادفی ارتقا داده‌اند. وزیری [۱۱] برای نشان دادن قابلیت‌های مدل در

مناطق با لرزه‌خیزی بالا در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، برخی از عوامل کلیدی مدل دودو را اصلاح کرد. پیغاله و ذوالفقاری [۲۰] مدل تصادفی دو مرحله‌ای را بر پایه‌ی مدل ژو توسعه دادند، به گونه‌ای که شامل هدف برابری میان گروه‌های مختلف افراد در مدیریت ریسک زلزله باشد. پیغاله و ذوالفقاری همچنین مدل تصادفی دو مرحله‌ای برای نشان دادن قابلیت‌های مدل در مناطق با لرزه‌خیزی بالا در کشورهای در حال توسعه مانند ایران را نیز ارائه کرده‌اند [۲۱].

مدل بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای

مدل بهینه‌سازی‌ای که در این پژوهش ارائه شده و مورد استفاده قرار گرفته است، بر پایه‌ی مدل بهینه‌سازی و روش مدل‌سازی‌ای است که به وسیله‌ی پیغاله و ذوالفقاری [۲۱] و بر پایه‌ی مدل ژو و همکاران [۱۷] پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی به گونه‌ای ارائه شده است که بتواند برای کشورهای در حال توسعه که در مناطق با لرزه‌خیزی بالا قرار دارند مانند ایران مورد استفاده قرار گیرد. در این کشورها در مقایسه با کشورهای توسعه‌یافته‌ای مانند امریکا محدودیت‌های بیشتری برای منابع اقتصادی وجود دارد و خسارات و خرابی‌های لرزه‌ای شدت و وسعت بیشتری دارد و اختصاص منابع اقتصادی به راهبردها و روش‌های پیشگیری و کاهش ریسک، با وجود اهمیت بسیار، کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

مدل ارائه شده در این پژوهش یک مدل بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای است که هدف آن کمینه کردن کل هزینه‌های مقاوم‌سازی، بازسازی و مقدار مورد انتظار خسارت بیش از سطح خسارت قابل قبول برای کل یک دوره‌ی زمانی سرمایه‌گذاری مشخص است. در نتیجه از احتمال وقوع زلزله‌ها در کل دوره‌ی سرمایه‌گذاری یا برنامه‌ریزی به جای احتمال وقوع سالیانه‌ی زلزله‌ها که در سایر مدل‌های قبلی مورد استفاده قرار گرفته است، استفاده می‌شود.

از نظر محاسباتی مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای و مدل برنامه‌ریزی خطی معادل[۱۲] آن به گونه‌ای رابطه‌بندی شده است که بیانگر شرایط تحول تدریجی ساختمان‌های موجود در منطقه باشد. ساختمان‌های موجود در منطقه به صورت مساحت زیربنای ساختمان از یک نوع سازه‌ی خاص با کاربری مشخص است که در ناحیه‌ی شهری یا زون آماری واقع شده است (تصویر ۱). در مرحله‌ی اول در مورد اینکه کدام یک از ساختمان‌ها و با چه سطح طراحی باید تقویت شود و این مقاوم‌سازی باید چگونه باشد تصمیم‌گیری می‌شود. در این مدل راهکارهای متعددی برای کاهش ریسک در نظر گرفته شده که شامل تغییر نوع سازه در صورت ضعف سازه‌ای ساختمان‌های خشتی و همچنین مقاوم‌سازی ساختمان‌ها به سطح طراحی لرزه‌ای بالاتر است. در مدل ارائه شده در این پژوهش قیدی[۱۳] در نظر گرفته شده که بودجه‌ی مقاوم‌سازی را محدود می‌کند. در نظر گرفتن این قید برای به کار بردن این مدل برای کشورهای در حال توسعه مانند ایران که با محدودیت منابع اقتصادی و بودجه برای مقاوم‌سازی و اقدامات کاهش ریسک رو به رو هستند، ضروری و مناسب است. همچنین این مدل این امکان را به تصمیم‌گیرنده می‌دهد که در صورت تمایل محدودیت‌هایی را برای تصمیمات مقاوم‌سازی در نظر بگیرد. برای مشخص کردن گزینه‌های مقاوم‌سازی مجاز، قیود و محدودیت‌های مشخصی در مدل گنجانده شده است. همچنین در این مدل سیاست ارتقای سازه‌ای برای گروه‌های ساختمان‌ها و یا بازسازی آن‌ها به منزله‌ی راهکار پیشگیری و کاهش ریسک انتخابی از میان سایر روش‌ها مانند برنامه‌ریزی کاربری زمین و بیمه در نظر گرفته شده است. سود و هزینه‌ی غیر مرتبط با ریسک زلزله در نظر گرفته نشده است. ساختمان‌ها با توجه به موقعیت قرارگیری آن‌ها، نوع سازه (مصالح بنایی یا اسکلت فلزی و ...)، نوع کاربری (مسکونی، بیمارستانی و ...) و سطح طراحی لرزه‌ای گروه‌بندی شده‌اند. متغیری که نمایانگر مساحت زیربنای ساختمان از نوع خاصی از سازه، با کاربری خاص است و در ناحیه‌ی شهری یا زون آماری مشخصی قرار گرفته است، مقاوم‌سازی می‌شود. در واقع ارتقای این متغیر از یک سطح طراحی لرزه‌ای به سطح بالاتر و یا از یک نوع سازه به سازه‌ی دیگر که مقاومت لرزه‌ای بیشتری دارد، مقاوم‌سازی خوانده می‌شود. این مدل به گونه‌ای طراحی شده که برای هر ریزنمای جغرافیایی (ناحیه‌ی شهری یا زون آماری) کاربرد داشته باشد.

در مرحله‌ی دوم هر یک از زلزله‌ها با توجه به احتمال متناظر نسبت داده شده در آن‌ها رخ می‌دهد و برای هر یک از زلزله‌های محتمل هزینه‌های بازسازی خرابی‌ها، با توجه به مقاوم‌سازی‌های انجام شده، محاسبه می‌شود. در این مدل فرض شده که همه‌ی ساختمان‌های آسیب‌دیده با شکلی که کاربر تعیین می‌کند (به هر نوع سازه با هر سطح طراحی)، بازسازی می‌گردد. همچنین این مدل این امکان را به تصمیم‌گیرنده می‌دهد که در صورت تمایل محدودیت‌هایی را برای تصمیمات بازسازی در نظر بگیرد. در این مدل فرض شده که پس از زلزله، ساختمان آسیب‌دیده در یکی از سطوح خرابی (بدون خرابی، خرابی کم، متوسط و خرابی شدید) قرار می‌گیرد. باید توجه داشت که در محاسبات هزینه‌های بازسازی مدل ارائه شده تنها بر مبنای خسارات مستقیم اقتصادی ایجاد شده در اثر خرابی سازه‌ای ساختمان‌ها است.

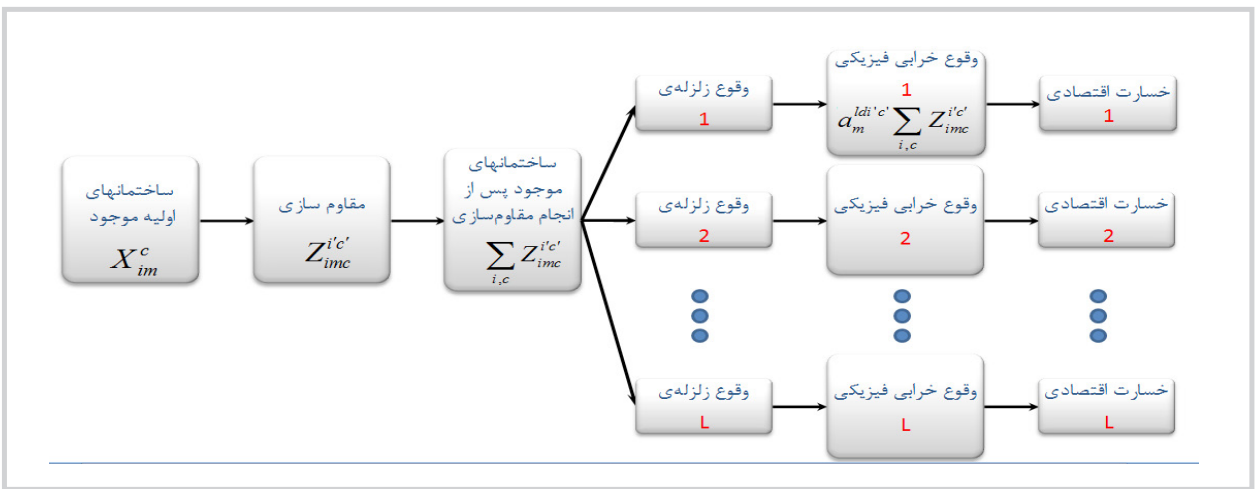
در رابطه‌بندی پیشنهادی این پژوهش، از امکان تجربه‌ی خسارت بیش از یک حد آستانه‌ای مجاز (آستانه‌ی خسارت مجاز)، اجتناب می‌شود. این حد بیانگر آستانه‌ای است که خسارت لرزه‌ای کمتر از آن با توجه به ظرفیت‌های منطقه‌ای مدیریت‌پذیر است. بنابراین با این کار می‌توان محدودیت منابع اقتصادی و بودجه‌ای را برای بازسازی پس از وقوع زلزله‌ها مدل کرد. این مدل در انتها پیشنهادهایی مبنی بر تصمیمات مقاوم‌سازی و نحوه‌ی اختصاص بهینه‌ی منابع به آن‌ها و همچنین هزینه‌ی بازسازی مرتبط با وقوع هر یک از زلزله‌های سناریو را به منزله‌ی نتایج تحلیل ارائه می‌دهد. مقادیر خسارات بیشتر از آستانه‌ی خسارت مجاز نیز از خروجی‌های مدل قابل دسترس خواهد بود. جدول ۲ روابط مربوط به قیدها و تابع هدف مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای و

جدول ۱: خلاصه‌ای از وضعیت فعلی و ویژگی‌های مدل‌های بهینه‌سازی پیشنهاد شده برای اختصاص منابع اقتصادی و کاهش ریسک لرزه‌ای

مقاله	Dodo ۲۰۰۵ [۵]	Dodo ۲۰۰۷ [۱۵]	Davidson ۲۰۰۵ [۱۶]	Xu۲۰۰۷ [۱۷]	Vaziri et al ۲۰۰۹ [۱۱]	Legg et al ۲۰۱۳ [۱۸]	Motamed et al ۲۰۱۱ [۱۹]
نوع خطر	زلزله	زلزله	زلزله	زلزله	زلزله	هاریکین ، طوفان	زلزله
نرخ بهره	در نظر گرفته شده	–	در نظر گرفته شده	در نظر گرفته شده	–	–	–
مدل برنامه‌ریزی بهینه‌سازی	خطی	خطی	خطی	خطی	خطی	خطی	خطی
احتمالی یا یقینی	مدل بهینه‌سازی یقینی اما بر مبنای احتمالات مورد انتظار سالیانه	مدل بهینه‌سازی یقینی اما بر مبنای احتمالات مورد انتظار سالیانه	مدل بهینه‌سازی یقینی اما بر مبنای احتمالات مورد انتظار سالیانه	مدل بهینه‌سازی تصادفی ((احتمالی	مدل بهینه‌سازی یقینی اما بر مبنای احتمالات مورد انتظار سالیانه	مدل بهینه‌سازی یقینی اما بر مبنای احتمالات مورد انتظار سالیانه	یقینی (در نظر گرفتن احتمالات خارج از مدل)
روش حل و نرم‌افزار حل	LP Matlab , cplex	Dantzig Wolfe algorithm and the heuristic algorithm	simplex (lingo)	Dantzig Wolfe algorithm	AMPL software , with CPLEX by ILOG .	Heuristic	Not given probably simplex
مدل خطر	احتمال وقوع سازگار با خطر سالیانه	احتمال وقوع سازگار با خطر سالیانه	احتمال وقوع سازگار با خطر سالیانه	احتمال وقوع سازگار با خطر سالیانه	احتمال وقوع سازگار با خطر سالیانه	احتمال وقوع سازگار با خطر سالیانه	یک سناریو زلزله بر مبنای نقشه‌ی تحلیل خطر (۴۷۵ ساله؛ ۲۴۷۵ ساله و ۷۵ (ساله
تعداد خطرهای مدل شده	جنبش قوی زمین	جنبش قوی زمین	جنبش قوی زمین	جنبش قوی زمین	جنبش قوی زمین	آب گرفتگی و باد	جنبش قوی زمین
جنبه‌ی ارزیابی و تخمین خرابی و خسارت							
طبقه‌بندی سازه‌ای در نظر گرفته شده	چندین نوع سازه	چندین نوع سازه	چندین نوع سازه	چندین نوع سازه	چندین نوع سازه	یک نوع (فقط ساختمان‌های (چوبی	چندین نوع سازه
تعداد سطوح خرابی ساختمانی	بیش از ۲ سطح	بیش از ۲ سطح	بیش از ۲ سطح	بیش از ۲ سطح	۲	بیش از ۲ سطح	بیش از ۲ سطح
انواع کاربری‌ها در نظر گرفته شده	چندین نوع سازه	چندین نوع سازه	چندین نوع سازه	چندین نوع سازه	–	–	چندین نوع سازه
خسارات جانی	–	در نظر گرفته شده	–	–	در نظر گرفته شده	–	در نظر گرفته شده– کشته‌ها و زخمی‌ها
خسارت جانی بیش از حد مجاز	–	–	–	–	در نظر گرفته شده	–	–
خسارت اقتصادی بیش از حد مجاز	–	–	–	در نظر گرفته شده	–	–	–
خسارت اختلال در عملکرد تجاری	–	–	–	–	–	–	–
خسارات غیرمستقیم	–	–	–	–	–	–	در نظر گرفته شده (هزینه‌ی بستری، جمع‌آوری آوار، عملیات (تهیه‌ی اسکان موقت
جنبه‌ی بازسازی پس از زلزله							
محدودیت‌های بازسازی	–	–	–	–	در نظر گرفته شده (جایگزین کردن ساختمان‌های ضعیف (به جای بازسازی آن‌ها	–	در نظر گرفته شده (جایگزین کردن ساختمان‌های ضعیف (به جای بازسازی آن‌ها
تأخیر در بازسازی	–	–	–	–	در نظر گرفته شده	–	–
جنبه‌ی مقاوم‌سازی لرزه‌ای							
در نظر گرفتن هزینه‌های مقاوم‌سازی در تابع هدف	در نظر گرفته شده	در نظر گرفته شده	–	در نظر گرفته شده	در نظر گرفته شده	در نظر گرفته شده	در نظر گرفته شده
ارتقای ظرفیت‌های پزشکی	–	–	–	–	–	–	در نظر گرفته شده
برنامه‌های تغییر کابری زمین، قبل یا پس از زلزله، تخریب و رهاسازی زمین و یا خرید زمین جدید و یا تغییر کاربری ساختمان	–	–	–	–	–	امکان تخریب و رهاسازی زمین‌ها پس زلزله در نظر .گرفته شده است	–

مقاله	Dodo ۲۰۰۵ [۵]	Dodo ۲۰۰۷ [۱۵]	Davidson ۲۰۰۵ [۱۶]	Xu۲۰۰۷ [۱۷]	Vaziri et al ۲۰۰۹ [۱۱]	Legg et al ۲۰۱۳ [۱۸]	Motamed et al ۲۰۱۱ [۱۹]
بیمه و انتقال ریسک	–	–	–	–	–	–	–
مقاوم‌سازی پس از زلزله	در نظر گرفته شده	در نظر گرفته شده	در نظر گرفته شده	در نظر گرفته شده	در نظر گرفته شده	در نظر گرفته شده	–
محدودیت در مقاوم‌سازی	–	–	–	–	در نظر گرفته شده (جایگزین کردن ساختمان‌های ضعیف به جای مقاوم سازی (آن‌ها	–	در نظر گرفته شده (جایگزین کردن ساختمان‌های ضعیف به جای مقاوم‌سازی (آن‌ها
استادک هولدرهای مختلف با اعمال بودجه‌های مختلف	خیر (تنها یک محدودیت بودجه (برای مقاوم سازی	خیر (تنها یک محدودیت بودجه برای (مقاوم‌سازی	خیر (تنها یک محدودیت بودجه (برای مقاوم‌سازی	خیر (تنها یک محدودیت بودجه برای (بازسازی	خیر(تنها یک محدودیت بودجه برای (مقاوم‌سازی و بازسازی	بله، دولت (بودجه های جداگانه برای مقاوم سازی و (بازسازی	خیر(تنها یک محدودیت بودجه برای مقاوم‌سازی و ارتقای (ظرفیت‌های پزشکی
سایر جنبه‌ها							
رشد جمعیت	–	–	–	–	–	–	–
اثرات توسعه	–	–	–	–	–	–	–
تغییرات در طول زمان	–	–	–	–	–	–	–
مهاجرت جمعیت	–	–	–	–	–	–	–
برابری	–	–	در نظر گرفته شده	–	–	–	–
تعداد سطوح جغرافیایی در نظر گرفته شده در مدل بهینه‌سازی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
مطالعه‌ی موردی	۱۰ ناحیه‌ی آماری در منطقه‌ی لوس‌آنجلس	نواحی مرکزی و شرقی شهر لوس‌آنجلس (۲۰۱ (ناحیه‌ی آماری	۱۰ ناحیه‌ی آماری در منطقه‌ی لوس‌آنجلس	نواحی مرکزی و شرقی شهر لوس‌آنجلس (۲۰۱ (ناحیه‌ی آماری	۱۰۹ ناحیه آماری در شهر تهران	ساختمان‌های چوبی مسکونی در شمال شرقی کالیفرنیا	منطقه‌ی ۱۷ شهر تهران

*annual 'hazard-consistent' probability of occurrence



تصویر ۱: روند تحول تدریجی ساختمان‌های موجود در مدل بهینه‌سازی تصادفی که متغیر اصلی در این مدل مساحت زیربنای ساختمان است

جدول ۳ خلاصه‌ای از داده‌های ورودی و متغیرهای تصمیم‌گیری را که در رابطه‌بندی مورد استفاده قرار گرفته است نشان می‌دهد.

محدودیت‌های روش مدل‌سازی

یکی از فرضیاتی که در رابطه‌بندی مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای در این پژوهش انجام شده است این است که کل بودجه‌ی مقاوم‌سازی برای انجام دادن مقاوم‌سازی از ابتدا در دسترس است. همچنین فرض شده که تنها یک زلزله از میان زلزله‌های احتمالی متفاوت می‌تواند در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی (دوره‌ی سرمایه‌گذاری) رخ دهد؛ یعنی فرض شده است که امکان وقوع دو یا سه زلزله در این مدت منتفی است. این رابطه‌بندی امکان اولویت‌بندی راهبردهای مقاوم‌سازی پیشنهادی را به صورت مرحله‌ای نمی‌دهد. با این وجود این امکان را می‌دهد که پیشنهادات مقاوم‌سازی برای اجرا در هر نقطه از زمان برنامه‌ریزی مشخص باشند. در شرایط واقعی، این امکان وجود دارد که ترکیبات مختلفی از زلزله‌های کوچک تا بزرگ در طول زمان برنامه‌ریزی رخ

جدول ۲: رابطه‌بندی مدل تصادفی

رابطه		توضیحات
تابع هدف		$Min \sum_{i,m,c,i',c'} F_{imc}^{i'c'} Z_{imc}^{i'c'} + \sum_{l} P^{l} \sum_{m,i',c'} \sum_{d} R_{m}^{di'c'} a_{m}^{ldi'c'} \sum_{i,c} Z_{imc}^{i'c'} + \kappa \sum_{l} P^{l} \beta^{l}$
قیود	مقاوم‌سازی	$X_{im}^{c} = \sum_{i',c'} Z_{imc}^{i'c'} \quad \forall i,m,c$
	محدودیت‌های مقاوم‌سازی	$Z_{imc}^{i'c'} = 0 \quad \forall i,m,i',c > c'$ $Z_{imc}^{i'c'} = 0 \quad \forall i,m,c,c',i' \in \Omega_Z$ $Z_{imc}^{i'c'} = 0 \quad \forall i,m,c,i',c' \in \Psi_Z$ $Z_{imc}^{i'c'} = 0 \quad \forall m,c,c',i \in \Theta_n, i' \notin \Theta_n$
	بودجه‌ی مقاوم‌سازی	$\sum_{i,m,c,i',c'} F_{imc}^{i'c'} Z_{imc}^{i'c'} \le G$
	ریسک وقوع خسارت اقتصادی بزرگ	$\sum_{m,i',c',d} R_{m}^{di'c'} a_{m}^{ldi'c'} \sum_{i,c} Z_{imc}^{i'c'} - \beta^{l} \le B \quad \forall l$
	شرط لازم منفی نبودن[14] متغیرها	$Z_{imc}^{i'c'} \ge 0 \quad \forall i,m,c,i',c'$ $\beta^{l} \ge 0 \quad \forall l$

جدول ۳: متغیرهای مدل تصادفی و تعاریف آن

متغیر		توضیحات
متغیرهای ورودی	c	اندیس سطح طراحی لرزه‌ای
	i	اندیس نوع سازه
	m	اندیس رتبه‌ی ساختمان کاربری j و ناحیه‌ی آماری k
	d	اندیس سطح خرابی ساختمان
	l	اندیس شماره‌ی زلزله در کاتالوگ زلزله‌ها
	$a_{m}^{ldi'c'}$	نسبتی از ساختمان‌ها با نوع سازه‌ی i'، رتبه‌ی m و در سطح طراحی c' است که اگر زلزله‌ی l رخ دهد در سطح آسیب d قرار می‌گیرد.
	B	سطح خسارت (هزینه‌ی بازسازی) قابل قبول
	κ	ضریب وزنی پرهیز از ریسک خسارت اقتصادی بسیار بزرگ در تابع هدف
	$F_{imc}^{i'c'}$	واحد هزینه‌های تقویت یک متر مربع ساختمان با نوع سازه‌ی i از رتبه‌ی m در سطح طراحی لرزه‌ای c به ساختمانی با نوع سازه‌ی i' و سطح طراحی لرزه‌ای c .
	G	بودجه‌ی کاهش ریسک یا مقاوم‌سازی
	Pl	احتمال وقوع زلزله‌ی l در طول دوره‌ی زمانی سرمایه‌گذاری (برنامه‌ریزی) است.
	$R_{m}^{di'c'}$	واحد هزینه‌ی بازسازی یک متر مربع ساختمان با نوع سازه‌ی i' از رتبه‌ی m در سطح طراحی لرزه‌ای c که دچار سطح آسیب d شده و به حالت اولیه بازسازی می‌شود. اگر قرار باشد محدودیتی در ساختمان‌های بازسازی شده و یا سطوح طراحی لرزه‌ای قابل قبول برای بازسازی در نظر گرفته شود، این امر در این ضرایب $R_{m}^{di'c'}$ اعمال می‌گردد.
متغیرهای تصمیم‌گیری	X_{im}^{c}	مساحت زیربنای ساختمان که نوع سازه‌ی آن i و نوع رتبه‌ی (کاربری و ناحیه‌ی شهری یا زون آماری) آن m است و برای سطح طراحی لرزه‌ای c طراحی شده است.
	Ω_Z	انواع سازه‌هایی که برای مقاوم‌سازی قابل قبول نیست.
	Ψ_Z	مجموعه‌ی سطوح طراحی لرزه‌ای که برای مقاوم‌سازی قابل قبول نیست.
	Θ_n	زیرمجموعه‌های انواع سازه‌هایی که در یک گروه قرار می‌گیرند (ساختمان‌های بلند، کوتاه یا میان مرتبه).
	$Z_{imc}^{i'c'}$	مساحت زیربنای ساختمان به متر مربع با نوع سازه‌ی i از رتبه‌ی m است که در سطح طراحی لرزه‌ای c قرار دارد و در مرحله‌ی اول به ساختمانی با نوع سازه‌ی i و سطح طراحی لرزه‌ای c تقویت شده است.
	β^{l}	خسارت (هزینه‌های بازسازی) بیشتر از مقدار خسارت مجاز B در اثر وقوع هر یک از سناریوهای زلزله‌ی احتمالی l است.

دهد. اما در این پژوهش امکان وقوع تنها یک زلزله‌ی احتمالی در مدت زمان برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر امکان وقوع دو یا تعداد بیشتری زلزله در طول زمان برنامه‌ریزی صفر فرض شده است. این فرض به نوعی نشان‌دهنده‌ی تمرکز مدل بیشتر بر روی زلزله‌های بزرگی است که می‌توانند منجر به خرابی شوند. اگر لازم باشد که وقوع چندین زلزله در مدت زمان برنامه‌ریزی در مدل در نظر گرفته شود، با تغییر کوچکی در رابطه‌بندی مدل و اندیس زلزله‌ها (l) می‌توان این کار را انجام داد. مقادیر مختلفی می‌تواند برای طول دوره‌ی برنامه‌ریزی در نظر گرفته شود. مدت زمان برنامه‌ریزی، زمانی است که بودجه‌ی طرح‌های مقاوم‌سازی برای زلزله‌هایی که محتمل است در طول این زمان رخ دهد، برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری می‌شود. انتخاب طول این زمان به لرزه‌خیزی منطقه‌ی مورد مطالعه، بودجه‌ی مقاوم‌سازی، دیدگاه‌ها و نظرهای مدیر ریسک و برنامه‌ی مدیریت و کاهش ریسک (مقاوم‌سازی) بستگی دارد. فرض ساده‌کننده‌ی دیگری که در مدل ارائه شده در این پژوهش در نظر گرفته شده است، عبارت است از اینکه همه‌ی ضرایب مربوط به هزینه‌ی مقاوم‌سازی و بازسازی بدون تغییر می‌مانند (یعنی با گذر زمان تغییر نمی‌کنند). چنانچه لازم باشد این فرض در نظر گرفته نشود مدل به طور کلی تغییر می‌کند. با این حال به نظر می‌رسد، فرض تغییر نکردن هزینه‌ها در طول زمان با توجه به مدت زمان برنامه‌ریزی شده‌ی ۲۰ ساله فرض معقولی باشد و در نتایج مدل تغییر عمده‌ای ایجاد نکند.

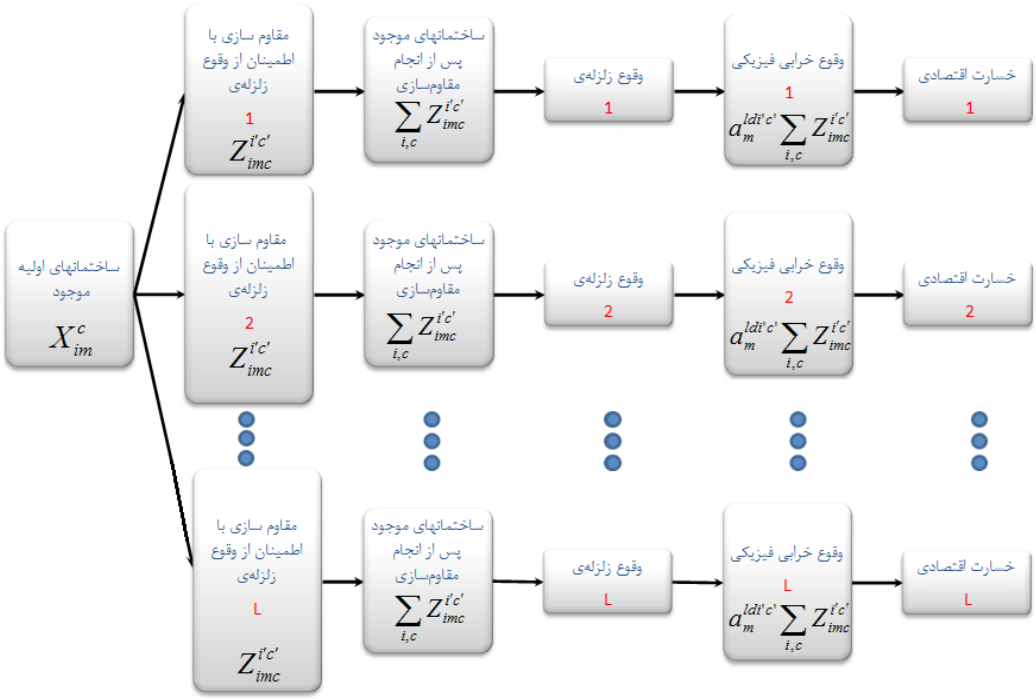
ارزیابی برتری بهینه‌سازی تصادفی در مقایسه با بهینه‌سازی یقینی و یا سایر روش‌های احتمالی

برای پایش مدل برنامه‌ریزی تصادفی و نشان دادن برتری‌ها و قابلیت‌های این مدل نسبت به سایر مدل‌هایی که بحث احتمالات را در خارج از فرایند برنامه‌ریزی بهینه‌سازی در نظر می‌گیرند، گونه‌های دیگری از روش‌های موجود برای در نظر گرفتن اثر عدم قطعیت زلزله‌ها در این بخش ارائه شده است. همچنین تحلیل‌هایی با توجه به این مدل‌ها در این مقاله ارائه شده است تا از کم و کیف برتری‌های مدل تصادفی نسبت به این مدل‌ها اطمینان حاصل گردد. در این راستا علاوه بر مقایسه‌ی نتایج، مقادیر کلیدی نشان‌دهنده‌ی برتری مدل تصادفی با نام «ارزش مورد انتظار اطلاعات صحیح EVPI» و «ارزش حل تصادفی VSS» محاسبه شده تا ارزش تحلیل برنامه‌ریزی تصادفی بیشتر مشخص گردد. این دو کمیت به طور کلی محرکی برای انجام برنامه‌ریزی تصادفی هستند. EVPI مبین ارزش مطلع بودن از آینده است و VSS ارزش موجود بودن توزیع احتمال و استفاده کردن از آن در نتایج آینده را ارزیابی می‌کند. از آنجا که تأکید ما بر مسئله‌ای به نام زلزله است که هیچ اطلاعات یقینی در رابطه با زمان وقوع آن‌ها در آینده در دسترس نیست، بنابراین VSS از نظر عملی بیشتر مورد قبول است.

در نظر گرفتن احتمالات خارج از مدل یقینی و محاسبه‌ی ارزش مورد انتظار اطلاعات صحیح

یکی از روش‌های بررسی اثربخشی مدل پیشنهادی در نظر گرفتن این احتمالات خارج از مدل برنامه‌ریزی یا بهینه‌سازی است. با این روش می‌توان یکی از مقادیر کلیدی نشان‌دهنده‌ی برتری مدل تصادفی با نام «ارزش مورد انتظار اطلاعات صحیح» را به دست آورد. این بار همه‌ی زلزله‌ها با احتمالاتشان در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب که مدل برنامه‌ریزی یقینی که توسط پیغاله و ذوالفقاری [۲۱] ارائه شده و در ادامه نیز به اختصار شرح داده می‌شود، برای هر یک از زلزله‌ها با فرض اینکه دقیقاً آن زلزله اتفاق می‌افتد، تحلیل می‌شود و تابع هدف حاصل از تحلیل برای هر زلزله‌ی مشخص که در این حالت بیانگر کل هزینه‌های ایجاد شده برای مقاوم‌سازی و بازسازی و خسارت اقتصادی بیش از حد مربوط به در نظر گرفتن و رویداد آن زلزله‌ی مشخص است، محاسبه می‌گردد. سپس متوسط وزنی تابع هدف با توجه به احتمالات زلزله‌ها حساب می‌شود، که بیانگر متوسط وزنی هزینه‌ی کل ایجاد شده است. کلیه‌ی داده‌های ورودی و فرضیات در نظر گرفته شده عیناً مشابه مدل تصادفی است. روند این روش در تصویر ۲ نشان داده شده است. تفاضل مقدار به دست آمده از تابع هدف (هزینه‌ی کل) با حل تصادفی و متوسط هزینه‌ی کل به دست آمده از بالا «ارزش مورد انتظار اطلاعات صحیح» را نشان می‌دهد. این اختلاف نشانگر آن است که اگر از وقوع زلزله اطلاعات کاملاً موثقی داشتیم، امکان تصمیم‌گیری بهتر برای مدیر ریسک وجود داشت. حال آنکه چنین امکانی وجود ندارد و روش تصادفی بهترین روش ممکن است.

همان‌طور که گفته شد برای انجام مقایسه‌ی روش تصادفی و سایر روش‌های احتمالی در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی یقینی متناسب با مدل تصادفی، طراحی شده توسط پیغاله و ذوالفقاری [۲۱]، مورد استفاده قرار گرفته است. از نظر محاسباتی این مدل به گونه‌ای رابطه‌بندی شده است که همانند مدل برنامه‌ریزی تصادفی ارائه شده، بیانگر شرایط تحول تدریجی ساختمان‌های موجود در منطقه باشد. همه‌ی متغیرهای ورودی و اطلاعات مرتبط در رابطه با ساختمان‌ها و هزینه‌ها عیناً مشابه مدل تصادفی است. با این تفاوت که در اینجا فرض می‌شود که زلزله‌ی مشخص l قطعاً رخ داده است. بنابراین ابتدا در مورد اینکه کدام یک از ساختمان‌ها باید تقویت شود و با چه سطح طراحی، تصمیم‌گیری می‌شود و سپس با در نظر گرفتن زلزله‌ای که از رویداد آن هزینه‌های بازسازی خرابی‌ها با توجه به مقاوم‌سازی‌ها محاسبه شده است، هزینه‌های مقاوم‌سازی بازسازی و ریسک هزینه‌ی بازسازی بیش از حد کمینه می‌گردد. همه‌ی فرضیه‌ها در مورد سطوح خرابی، نحوه‌ی بازسازی و مقاوم‌سازی عیناً مشابه مدل تصادفی است. مدل ارائه شده در انتها تصمیمات بهینه‌ی پیشنهادی برای مقاوم‌سازی و هزینه‌ی بازسازی مربوط به سناریوی زلزله‌ی مورد نظر را ارائه می‌دهد. قیدها و تابع هدف مدل برنامه‌ریزی یقینی در جدول ۴ نشان داده شده است.



تصویر ۲: روند تحول تدریجی ساختمان‌های موجود در مدل بهینه‌سازی یقینی در حالتی که احتمالات زلزله‌ها در خارج از مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. متغیر اصلی در این مدل مساحت زیربنای ساختمان است.

محاسبه‌ی ارزش حل تصادفی

برای به دست آوردن یکی دیگر از مقادیر کلیدی نشان‌دهنده‌ی برتری مدل تصادفی با نام «ارزش حل تصادفی»، مجدداً همه‌ی زلزله‌ها و احتمالاتشان به گونه‌ی دیگری در نظر گرفته شده است. در این حالت همه‌ی زلزله‌ها در برنامه‌ریزی و هزینه کردن بودجه‌ی مقاوم‌سازی، دخالت داده نمی‌شوند، بلکه تنها پیامد ناشی از همه‌ی زلزله‌های محتمل در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب که مدل برنامه‌ریزی یقینی برای یکی از زلزله‌های مهم یا متوسط تحلیل می‌شود و طرح‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی و تابع هدف که بیانگر کل هزینه‌های ایجاد شده برای مقاوم‌سازی و بازسازی است، با فرض وقوع آن زلزله، محاسبه می‌گردد. سپس فرض می‌شود که به جای زلزله‌ی پیش‌گفته، همه‌ی زلزله‌های بزرگ یا

جدول ۴: رابطه‌بندی مدل یقینی برای استفاده در روش احتمالی خارج از مدل بهینه‌سازی

رابطه		توضیحات
تابع هدف		$Min \sum_{i,m,c,i',c'} F_{imc}^{i'c'} Z_{imc}^{i'c'} + \sum_{m,i',c'} \left(\sum_{d} R_m^{di'c'} a_m^{ldi'c'} \sum_{i,c} Z_{imc}^{i'c'} \right) + \kappa\beta^{l}$
قیود	مقاوم‌سازی	$X_{im}^{c} = \sum_{i',c'} Z_{imc}^{i'c'} \quad \forall i,m,c$
	محدودیت‌های مقاوم‌سازی	$Z_{imc}^{i'c'} = 0 \quad \forall i,m,i',c > c'$ $Z_{imc}^{i'c'} = 0 \quad \forall i,m,c,c',i' \in \Omega_Z$ $Z_{imc}^{i'c'} = 0 \quad \forall i,m,c,i',c' \in \Psi_Z$ $Z_{imc}^{i'c'} = 0 \quad \forall m,c,c',i \in \Theta_n, i' \notin \Theta_n$
	بودجه‌ی مقاوم‌سازی	$\sum_{i,m,c,i',c'} F_{imc}^{i'c'} Z_{imc}^{i'c'} \le G$
	ریسک وقوع خسارت اقتصادی بزرگ	$\sum_{m,i',c',d} \left(R_m^{di'c'} a_m^{ldi'c'} \sum_{i,c} Z_{imc}^{i'c'} \right) - \beta^{l} \le B$
	شرط لازم منفی نبودن متغیرها	$Z_{imc}^{i'c'} \ge 0 \quad \forall i,m,c,i',c'$ $\beta^{l} \ge 0$

کوچک دیگر، البته هر کدام با احتمالات مربوط، رخ می‌دهد. برای همه‌ی حالات دیگر نیز مقدار خسارات وارده (هزینه‌های بازسازی و خسارت بیش از حد) و در نتیجه هزینه‌ی کل ایجاد شده محاسبه می‌گردد. برای محاسبه‌ی هزینه‌ی کل باید به ترتیب زیر عمل شود.

برای زلزله‌های گوناگون کوچک تا بزرگ فرض می‌شود که مثلاً زلزله‌ی l رخ خواهد داد و مدل بهینه‌سازی یقینی برای این زلزله تحلیل شده است و مقادیر تابع هدف شامل هزینه‌های کل مقاوم‌سازی، بازسازی و خسارت (هزینه‌های بازسازی) بیش از حد مجاز به دست آمده است. اگر زلزله‌ی l در آینده رخ داده باشد، این هزینه‌ها دقیقاً درست خواهد بود. اما اگر پیش‌بینی غلط باشد و زلزله‌ی e رخ داده باشد، هزینه‌های مقاوم‌سازی از تابع هدف استخراج شده اما هزینه‌های بازسازی و خسارت بیش از حد باید با فرایند تخمین خسارت برای وقوع زلزله‌ی دیگر محاسبه شود. بنابراین جملات دوم و سوم تابع هدف با فرض رخداد زلزله‌های متفاوت محاسبه می‌شود و در نهایت هزینه‌ی کل با استفاده از دو رابطه‌ی ۱ و ۲ محاسبه می‌گردد. در رابطه‌ی ۱ مقدار β^e محاسبه می‌گردد و از رابطه‌ی ۲ هزینه‌های کل در حالی که زلزله e رخ داده محاسبه می‌گردد.

رابطه‌ی ۱:

$$\sum_{m,i',c',d}^{Earthquake:e}\left(R_m^{di'c'}a_m^{li'c'}\sum_{i,c}Z_{imc}^{i'c'}\right)-\beta^e\le B$$

رابطه‌ی ۲:

$$\sum_{i,m,c,i',c'}^{Earthquake\,l}F_{imc}^{i'c'}Z_{imc}^{i'c'}+\sum_{m,i',c'}\left(\sum_{d}^{Earthquake\,e}R_m^{di'c'}a_m^{ldi'c'}\sum_{i,c}Z_{imc}^{i'c'}\right)+\kappa\beta^l$$

سپس متوسط وزنی مقادیر هزینه‌ی کل برای زلزله‌های مسبب با توجه به احتمالات زلزله‌ها حساب می‌شود. تفاضل مقدار به دست آمده از تابع هدف با حل تصادفی (هزینه‌ی کل حاصل از مدل تصادفی) و متوسط به دست آمده از بالا، «ارزش حل تصادفی» را نشان می‌دهد.

در نظر گرفتن برنامه‌ی متوسط[15] و «ارزش حل تصادفی» به گونه‌ی دیگر

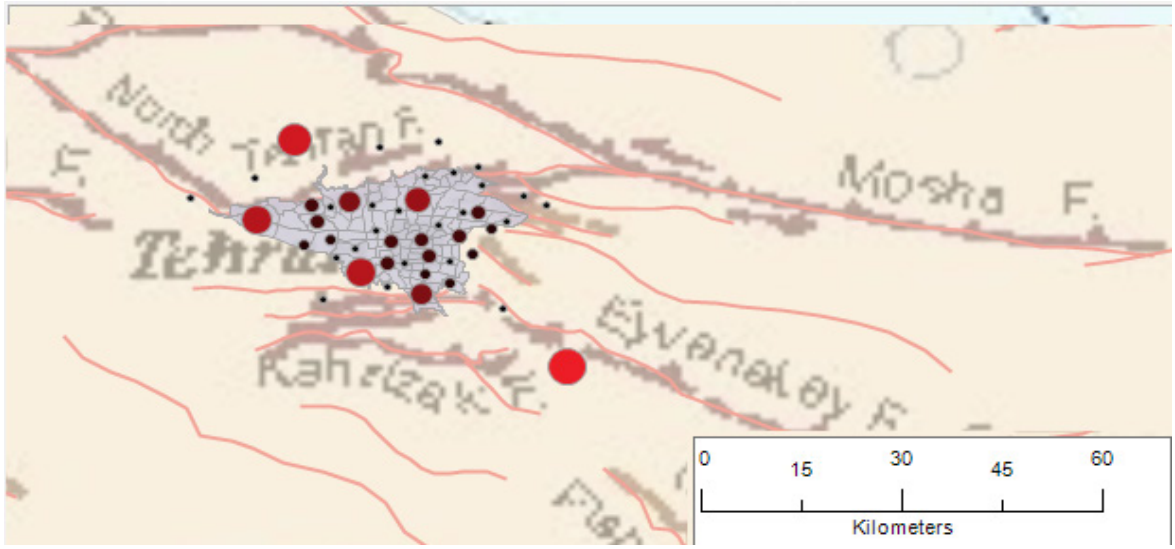
یکی دیگر از روش‌های در نظر گرفتن زلزله‌ها و احتمالات آن‌ها در برنامه‌ریزی برای مقاوم‌سازی و اختصاص منابع، استفاده از برنامه‌ی متوسط است. برای نشان دادن برتری مدل برنامه‌ریزی تصادفی این بار کلیه‌ی زلزله‌ها در تصمیم‌گیری برای مقاوم‌سازی و پیشنهادات مقاوم‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. بدین ترتیب که مدل برنامه‌ریزی یقینی برای هر یک از زلزله‌ها تحلیل می‌شود و با فرض اینکه دقیقاً آن زلزله اتفاق می‌افتد، مقادیر مساحت‌های پیشنهادی مقاوم‌سازی که همان تصمیمات بهینه هستند، برای کلیه‌ی سناریوهای زلزله محاسبه می‌گردد. حال یک برنامه‌ی متوسط انجام می‌شود، یعنی مقدار متوسط مساحت مقاوم‌سازی شده به صورت میانگین وزنی کلیه‌ی تصمیمات بهینه، برای هر یک از زلزله‌ها، با توجه به احتمالات آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. تفاوت در اینجا این است که میانگین‌گیری از تصمیمات بهینه‌سازی انجام می‌شود، به جای آنکه متوسط خسارات یا همان هزینه‌ی کل که از تابع هدف حاصل می‌شود، در نظر گرفته شود.

تصمیم مقاوم‌سازی حاصل از برنامه‌ی متوسط را می‌توان با تصمیمات مقاوم‌سازی بهینه برای هر زلزله سناریو و همچنین تصمیم مقاوم‌سازی بهینه‌ی حاصل از حل تصادفی مقایسه نمود. به علاوه می‌توان مقدار هزینه‌های کل ایجاد شده در اثر وقوع کلیه‌ی زلزله‌های بزرگ تا کوچک دیگر پس از انجام مقاوم‌سازی را با استفاده از روش برنامه‌ی متوسط، محاسبه کرده، سپس متوسط وزنی مقادیر هزینه‌ی کل را برای زلزله‌های مسبب با توجه به احتمالات زلزله‌ها محاسبه نمود. مجدداً تفاضل مقدار به دست آمده از تابع هدف با حل تصادفی (هزینه کل حاصل از مدل تصادفی)، و متوسط به دست آمده از بالا، «ارزش حل تصادفی» را نشان می‌دهد.

مطالعه‌ی موردی

برای تحلیل مدل بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای، مدل بهینه‌سازی خطی معادل آن طراحی شده و در نرم‌افزار IBM ILOG CPLEX Optimization Studio برنامه‌نویسی شده و با کمک نرم‌افزار CPLEX [۲۲] حل شده است. سپس برای نشان دادن قابلیت‌های مدل بهینه‌سازی، تحلیل موردی برای ساختمان‌های مسکونی واقع در شهر تهران انجام شده است. زمان مورد نیاز تحلیل بنا به داده‌های ورودی بسیار متغیر است، زیرا در فرایند حل مدل، ماتریس‌هایی تشکیل می‌شود که در صورت صفر بودن برخی عوامل این ماتریس‌ها به ماتریس‌های کوچک‌تر تبدیل شده و بنابراین روش حل در نرم‌افزار CPLEX را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در کل، زمان تحلیل بین ۲ دقیقه و در برخی حالات تا ۲۰ ساعت متغیر است.

برای تحلیل مدل بهینه‌سازی تصادفی باید طول دوره‌ی برنامه‌ریزی تعیین گردد. این دوره زمانی است که اقدامات کاهش ریسک پیشنهادی و اختصاص و برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری بودجه‌ی مورد نیاز این اقدامات به گونه‌ای انجام شوند تا ریسک زلزله‌های محتمل را در این دوره‌ی زمانی کاهش دهند. مقادیر مختلفی را می‌توان برای طول دوره‌ی برنامه‌ریزی در مدل بهینه‌سازی در نظر گرفت. انتخاب طول دوره‌ی برنامه‌ریزی به لرزه‌خیزی منطقه‌ی مورد مطالعه و مقدار بودجه‌ی مقاوم‌سازی و اهداف برنامه‌ی کاهش ریسک و نظر مدیر ریسک بستگی دارد. در این مطالعه طول دوره‌ی برنامه‌ریزی برابر ۲۰ سال در نظر گرفته شده است. این امر همچنین بدین معناست که فرض شده تنها یک زلزله‌ی محتمل از میان همه‌ی وقایع ممکن در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی (۲۰ سال) رخ می‌دهد. این فرض یک فرض حیاتی در این مدل است، زیرا با در نظر گرفتن این فرض، مدل از منظر محاسباتی قابل مدیریت خواهد شد. بدیهی است که در واقعیت در ناحیه‌ای مانند محیط ساختمانی شهر تهران این امکان وجود دارد



تصویر ۳: توزیع جغرافیایی کاتالوگ زلزله‌ها و گسل‌های لرزه‌زا در اطراف تهران شامل سناریو زلزله‌های محتمل سازگار با خطر بهینه شده با تعداد ۶۲ زلزله با دامنه‌ی بزرگی ۴/۶ تا ۶/۷۵

که در طول ۲۰ سال بیش از یک زلزله رخ دهد، اما تمرکز این مدل بر زلزله‌های متوسط و بزرگ است که می‌توانند منجر به خرابی شوند.

بررسی لرزه‌خیزی تاریخی در شعاع ۱۵۰ کیلومتری شهر تهران نشان می‌دهد که تقریباً در هر ۲۰ سال یک زلزله با بزرگی ۶ ریشتر و بیشتر رخ داده است [۲۳]. در نظر گرفتن دوره‌ی برنامه‌ریزی کوتاه‌تر (برای مثال ۱۰ ساله) منجر به حذف وقایع بزرگ‌تر از روند مدل می‌شود و در نتیجه مدل به یک مدل برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت با توجه بیشتر به زلزله‌های کوچک‌تر تبدیل خواهد شد. از طرف دیگر در نظر گرفتن مدت زمان طولانی‌تر، منجر به رد فرض وقوع تنها یک زلزله در خلال دوره‌ی زمانی برنامه‌ریزی می‌گردد. به علاوه از منظر برنامه‌های کاهش ریسک در سطح منطقه‌ای، برنامه‌های بسیار بلندمدت توجیه عملی ندارند، زیرا دوره‌ی بازگشت سرمایه‌ی[۱۶] آن‌ها بسیار طولانی خواهد بود. به علاوه برنامه‌های توسعه در ایران با سند چشم‌انداز ۲۰ ساله‌ی کشور تعریف می‌شود که شامل چهار دوره‌ی ۵ ساله‌ی برنامه‌ی توسعه است، بنابراین در این مدل طول دوره‌ی برنامه‌ریزی برابر ۲۰ سال در نظر گرفته شده است.

داده‌های ساختمانی اولیه‌ی موجود

در این مطالعه داده‌های ساختمانی مرتبط با ساختمان‌های مسکونی شهر تهران با واحد حوزه‌های آماری[۱۷] مورد استفاده قرار گرفته است. تهران به ۳۱۷۳ حوزه‌ی آماری، ۱۱۴ ناحیه[۱۸] و ۲۲ منطقه[۱۹] تقسیم شده است. برای هر حوزه‌ی آماری، تعداد ساختمان‌ها، جمع مساحت ساختمان‌ها با گونه‌های سازه‌ای مختلف و جمعیت ساکن در آن‌ها مشخص است. برای کاهش زمان تحلیل مدل بهینه‌سازی، واحد تحلیل، ناحیه‌های شهر تهران در نظر گرفته شدند و داده‌های موجود در سطح حوزه‌های آماری برای تعیین داده در سطح ناحیه‌ها با یکدیگر جمع شدند. داده‌های آماری جمعیت و ساختمانی از مطالعات ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای تهران بزرگ که جایکا برای تهران انجام داده است، استخراج گردید [۱]. با این حال برای تحلیل در این پژوهش ساختمان‌ها از منظر نوع سازه به ۱۳ گروه سازه‌ای تقسیم شده‌اند. بنابراین جدول ۵ برای تطابق انواع سازه‌های تعریف شده در این پژوهش با سازه‌های تعریف شده در پایگاه داده‌ی جایکا [۱] و انواع سازه‌های تعریف شده در پایگاه داده‌ی برنامه‌ی HAZUS [۲۴] مورد استفاده قرار گرفته است. پایگاه داده‌ی مورد استفاده در این پژوهش فقط شامل نوع کاربری مسکونی است، زیرا این تنها نوع کاربری است که داده‌های مرتبط با آن در دسترس است.

سناریوی زلزله‌های انتخاب شده

یکی از داده‌های ورودی که باید برای تحلیل مدل بهینه‌سازی تهیه گردد، سناریوهای زلزله و احتمالات مرتبط با آن‌ها در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی است. این زلزله‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که نمایانگر لرزه‌خیزی شهر تهران باشند. همچنین از این زلزله‌ها برای ارزیابی ریسک لرزه‌ای منطقه و تخمین خسارت برای تهیه‌ی سایر داده‌های ورودی مورد نیاز در مدل بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در این پژوهش برای انتخاب زلزله‌های سناریو، از یک روش ترکیبی متشکل از روش مونت کارلو[۲۰]، روش انتخاب زلزله‌ها دارای بیشترین مشارکت در ساخت منحنی‌های خطر لرزه‌ای و روش سناریوهای احتمالی سازگار با خطر بهینه شده (OPS)[۲۱] استفاده شده است [۲۱] و کاتالوگی شامل ۶۲ زلزله با دامنه‌ی بزرگی ۴/۶ تا ۶/۷۵ ریشتر به همراه احتمالات سالیانه‌ی وقوع آن‌ها تهیه شده است که توزیع جغرافیایی این زلزله‌ها در همسایگی تهران در تصویر ۳ نشان داده شده است. از آنجا که در این مطالعه‌ی موردی، مدت زمان برنامه‌ریزی (سرمایه‌گذاری) برابر ۲۰ سال فرض شده، احتمال وقوع ۲۰ ساله‌ی هر یک از زلزله‌ها با استفاده از توزیع پواسون[۲۲] محاسبه شده است.

جدول ۶: رواج نسبی اولیه‌ی انواع متفاوت سازه و درصد هزینه‌های مقاوم‌سازی اختصاص یافته به هر نوع سازه‌ای

نوع سازه	نام‌گذاری سازه در این مقاله	نام‌گذاری سازه در JICA برای منحنی‌های شکنندگی خرابی شدید	نام‌گذاری سازه در HAZUS برای منحنی‌های شکنندگی ناچیز و متوسط	گروه سازه‌ای	UMC [۱۱] ($)		URC[۱۱] ($) برای سطح خرابی ناچیز			URC[۱۱]($) برای سطح خرابی متوسط			URC[۱۱]($) برای سطح خرابی شدید		
					مقاوم‌سازی به سطح ۱	مقاوم‌سازی به سطح ۲	مقاوم‌سازی نشده	مقاوم‌سازی به سطح ۱	مقاوم‌سازی به سطح ۲	مقاوم سازی نشده	مقاوم‌سازی به سطح ۱	مقاوم‌سازی به سطح ۲	مقاوم‌سازی نشده	مقاوم‌سازی به سطح ۱	مقاوم‌سازی به سطح ۲
اسکلت فلزی کوتاه مرتبه	SLR	BT۲-	S۱L میانگین دو منحنی (pre-code) از نوع S۲L	کوتاه	۶۷	۱۳۳	۸۳	۱۵۰	۲۱۶	۱۶۶	۲۳۳	۲۹۹	۳۳۲	۳۳۲	۳۸۶
اسکلت فلزی میان مرتبه	SMR	BT۳-	S۱M میانگین دو منحنی (pre-code) از نوع S۲M	متوسط	۶۱	۱۲۲	۸۳	۱۴۴	۲۰۵	۱۶۶	۲۲۷	۲۸۸	۳۳۲	۳۳۲	۳۸۶
اسکلت فلزی بلند مرتبه	SHR	BT۳-	S۱H میانگین دو منحنی (pre-code) از نوع S۲H	بلند	۶۱	۱۲۲	۸۳	۱۴۴	۲۰۵	۱۶۶	۲۲۷	۲۸۸	۳۳۲	۳۳۲	۳۸۶
اسکلت بتنی کوتاه مرتبه	CLR	BT۵	C۱L میانگین دو منحنی (pre-code) از نوع C۲L	کوتاه	۶۱	۱۲۲	۸۳	۱۴۴	۲۰۵	۱۶۶	۲۲۷	۲۸۸	۳۳۲	۳۳۲	۳۸۶
اسکلت بتنی میان مرتبه	CMR	BT۶	C۱M میانگین دو منحنی (pre-code) از نوع C۲M	متوسط	۶۱	۱۲۲	۸۳	۱۴۴	۲۰۵	۱۶۶	۲۲۷	۲۸۸	۳۳۲	۳۳۲	۳۸۶
اسکلت بتنی بلند مرتبه	CHR	BT۴	C۱H میانگین دو منحنی (pre-code) از نوع C۲H	بلند	۶۱	۱۲۲	۸۳	۱۴۴	۲۰۵	۱۶۶	۲۲۷	۲۸۸	۳۳۲	۳۳۲	۳۸۶
نیمه اسکلت کوتاه مرتبه	HLR	BT۱	C۳L میانگین دو منحنی (pre-code) از نوع S۵L	کوتاه	۳۹	۷۸	۴۲	۸۱	۱۲۰	۸۳	۱۲۲	۱۶۱	-	-	-
نیمه اسکلت میان مرتبه	HMR	BT۱	C۳M میانگین دو منحنی (pre-code) از نوع S۵M	متوسط	۳۹	۷۸	۴۲	۸۱	۱۲۰	۸۳	۱۲۲	۱۶۱	-	-	-
نیمه اسکلت بلند مرتبه	HHR	BT۱	C۳M میانگین دو منحنی (pre-code) از نوع S۵M	بلند	۳۹	۷۸	۴۲	۸۱	۱۲۰	۸۳	۱۲۲	۱۶۱	-	-	-
مصالح بنایی کوتاه مرتبه	MLR	BT۸	URMM (pre-code)	کوتاه	-	-	۴۲	-	-	۸۳	-	-	-	-	-
مصالح بنایی میان مرتبه	MMR	BT۸	URMM (pre-code)	متوسط	-	-	۴۲	-	-	۸۳	-	-	-	-	-
ساختمان جنوبی	W	BT۷	W۲ (pre-code)	کوتاه	-	-	۴۲	-	-	۸۳	-	-	-	-	-
ساختمان خشتی	SDB	BT۹	برای سطح آسیب ناچیز از منحنی ارائه شده در [۳۳] و برای سطح آسیب متوسط از میانگین منحنی‌های سطح آسیب کم و شدید استفاده می‌شود.	کوتاه	-	-	۴۲	-	-	۸۳	-	-	-	-	-

محاسبه‌ی خسارات ناشی از زلزله

یکی از داده‌های ورودی مدل بهینه‌سازی که باید از قبل تهیه شود، مقدارهای ضرایب $a_m^{ldi'c'}$ است. این مقادیر عبارتند از نسبتی از مساحت ساختمان در کلاس ساختمانی m با نوع سازه‌ی i' و در سطح طراحی c' که در اثر زلزله‌ی l وارد سطح آسیب d می‌گردد. برای محاسبه‌ی این مقادیر، نیاز به انجام رساندن یک مدل ارزیابی ریسک لرزه‌ای است. اولین گام در ارزیابی ریسک لرزه‌ای ارزیابی خطر لرزه‌ای است. به دنبال محاسبه و انتخاب زلزله‌های سناریو در بخش پیشین برای مدل‌سازی خطر لرزه‌ای شهر تهران، سه رابطه‌ی کاهندگی [۲۵، ۲۶، ۲۷] با ضرایب وزنی مختلف برای محاسبه‌ی مقادیر PGA در نقطه‌ی مرکزی هر یک از ۱۱۴ ناحیه، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. خرابی لرزه‌ای ایجاد شده در هر گروه ساختمانی در اثر PGA محاسبه شده و با استفاده از درصد خرابی مربوط بر روی منحنی‌های شکنندگی مختلف برای گونه‌های

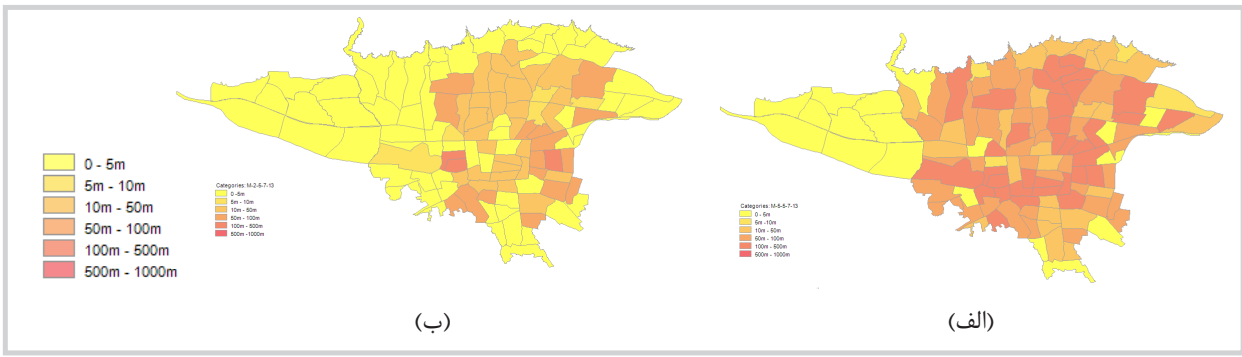
مختلف سازه محاسبه می‌شوند. ۱۳ گونه سازه (جدول ۵) و سه سطح خرابی: ۱. ناچیز، ۲. متوسط و ۳. شدید و فروریزش کامل در مدل در نظر گرفته شده است. همچنین از منحنی‌های شکنندگی که جایکا و HAZUS ارائه داده‌اند در این مدل بهره گرفته شده است [۱، ۲۴]. برای منحنی‌های شکنندگی سطوح خرابی شدید و فروریزش از منحنی‌های جایکا [۱] استفاده شده است. وقتی این منحنی‌ها، که نسبت خرابی کامل[۲۳] را در برابر شتاب زمین نشان می‌دهد، برای گروهی از مساحت ساختمان‌ها (متغیر تصمیم‌گیری در مدل بهینه‌سازی) به کار برده می‌شود، می‌توان به کمک روش ATC ۱۳ [۲۸] آن‌ها را به صورت نمودارهای آسیب‌پذیری به کار برد که هر نقطه بر روی آن مبین درصدی از مساحت ساختمان است که وارد سطح خرابی شدید و فروریزش می‌شود. اگر آن ساختمان در برابر PGA با مقدار مشخص قرار بگیرد، برای دو سطح آسیب دیگر از منحنی‌های شکنندگی HAZUS [۲۴] استفاده شده است. این منحنی‌ها در اصل احتمال فراگذشت یک ساختمان از سطح خرابی متوسط و یا ناچیز را در برابر تغییر مکان طیفی (SD)[۲۴] ناشی از زلزله نشان می‌دهد. در این مطالعه از منحنی‌های شکنندگی PGA معادل برای هر یک از سازه‌ها، مطابق آنچه در آیین‌نامه HAZUS ارائه شده است، با توجه به جدول ۵ استفاده شده است. احتمال فراگذشت از سطح متوسط و یا ناچیز نیز وجود دارد. وقتی این توابع برای گروهی از مساحت ساختمان‌ها (متغیر تصمیم‌گیری در مدل بهینه‌سازی) به کار برده می‌شود، می‌توان به کمک روش ATC ۱۳ [۲۸] آن‌ها را به صورت نمودارهای آسیب پذیری به کار برد که هر نقطه بر روی آن مبین درصدی از مساحت ساختمان است که وارد سطح خرابی متوسط یا کم می‌شود، اگر آن ساختمان در برابر PGA با مقدار مشخص قرار بگیرد. برای هر نوع سازه سه سطح طراحی لرزه‌ای در نظر گرفته شده است: «مقاوم‌سازی نشده»[۲۵]، «مقاوم‌سازی شده‌ی سطح ۱»[۲۶] و «مقاوم‌سازی شده‌ی سطح ۲»[۲۷]. بر مبنای قضاوت مهندسی و با توجه به پژوهش وزیری [۱۱] فرض شده که هدف مقاوم‌سازی سطح ۲ رسیدن به سطح عملکرد ایمنی جانی[۲۸] است. به طور مشابه برای مقاوم‌سازی سطح ۱ هدف رسیدن به سطح عملکرد جلوگیری از فروریزش[۲۹] است. این سطح عملکرد در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود در ایران تعریف شده است [۲۹] و این آیین‌نامه نیز برگرفته از آیین‌نامه‌ی FEMA 356 است [۳۰]. بر اساس این فرض و همچنین با توجه به آگاهی‌ای که در مورد ساختمان‌های موجود در تهران وجود دارد، اثر مقاوم‌سازی در سطح ۲ و ۱ به صورت جابه‌جایی منحنی شکنندگی به سمت راست تعریف شده است، به گونه‌ای که PGA ایجادکننده‌ی درصد یا نسبت خرابی مشخص به نسبت PGA لازم برای ایجاد همان درصد خرابی در منحنی شکنندگی قبل از مقاوم‌سازی، به ترتیب ۲۰۰ و ۱۵۰ درصد افزایش پیدا کرده است.

قیود و هزینه‌های مقاوم‌سازی و بازسازی

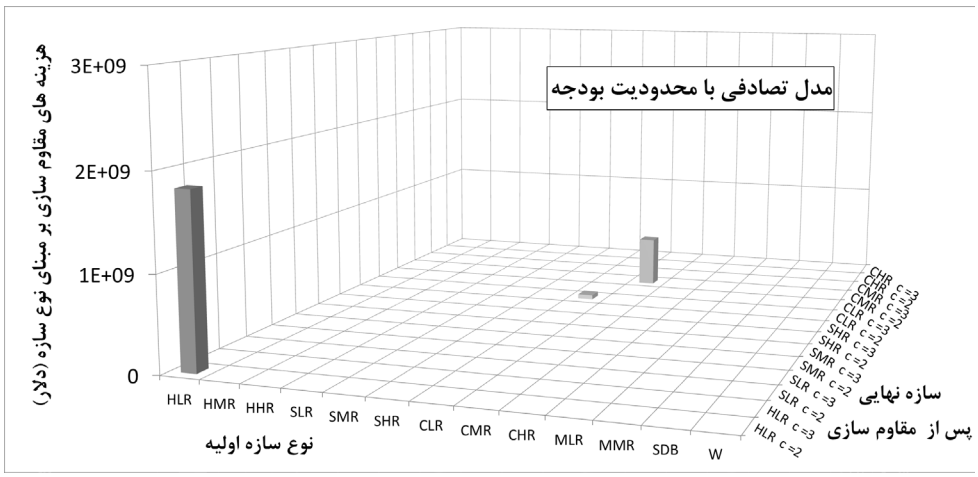
هزینه‌ی واحد مقاوم‌سازی، F ، و هزینه‌ی واحد بازسازی، R، تخمین زده شده است (جدول ۵). فرض شده که ساختمان‌های خشتی (SDB) و مصالح بنایی کوتاه و میان مرتبه (MLR و MMR) از جمله سازه‌های ضعیفی هستند که برای مقاوم‌سازی و همچنین بازسازی در زمانی که به شدت آسیب دیده و یا فروریخته باشند، مناسب و قابل قبول نیست. همچنین ساختمان‌های چوبی نیز امکان مقاوم‌سازی و بازسازی در صورت آسیب‌دیدگی شدید و فروریزش ندارند، زیرا این نوع سازه‌ها در تهران امروز متداول نیست و مصالح لازم برای بازسازی و مقاوم‌سازی آن‌ها وجود ندارد. برای مقاوم‌سازی چنین ساختمان‌هایی، این سازه‌ها با ساختمان‌های جدید با سازه‌های مقاوم‌تر و در سطح طراحی لرزه‌ای مقاوم‌سازی شده جایگزین می‌شوند. در این پژوهش فرض شده که سازه‌ها بر مبنای ارتفاع به ۳ گروه مجزا تقسیم شوند که عبارتند از: کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه (جدول ۵). این بدان معناست که جایگزین کردن یک سازه با سازه‌ی غیر هم گروه خود در میان گزینه‌های مقاوم‌سازی و بازسازی امکان‌پذیر نیست. از آنجا که سه سطح مختلف آسیب در این مطالعه‌ی موردی در نظر گرفته شده است، مقدار هزینه‌ی واحد بازسازی R برای هر سه سطح خرابی مختلف ارائه شده است. به علاوه این امکان وجود دارد که ساختمان‌ها به سطوح طراحی بالاتری نیز در روند بازسازی ارتقا یابند. تمامی ساختمان‌ها در صورت متحمل شدن سطوح مختلف خرابی ناچیز و متوسط می‌توانند به وضعیت اولیه‌ی قبل از خرابی بازسازی شوند. اما اگر ساختمان‌های خشتی، چوبی و مصالح بنایی و ساختمان‌های نیم اسکلت (HHR ، HMR، HLR) آسیب شدید ببینند یا به کل فرو بریزند باید به یکی از سازه‌های اسکلت فلزی یا بتنی متناسب با گروه مربوط بازسازی شوند.

محدودیت بودجه‌ی مقاوم‌سازی و سطح خسارت مجاز (قابل قبول)

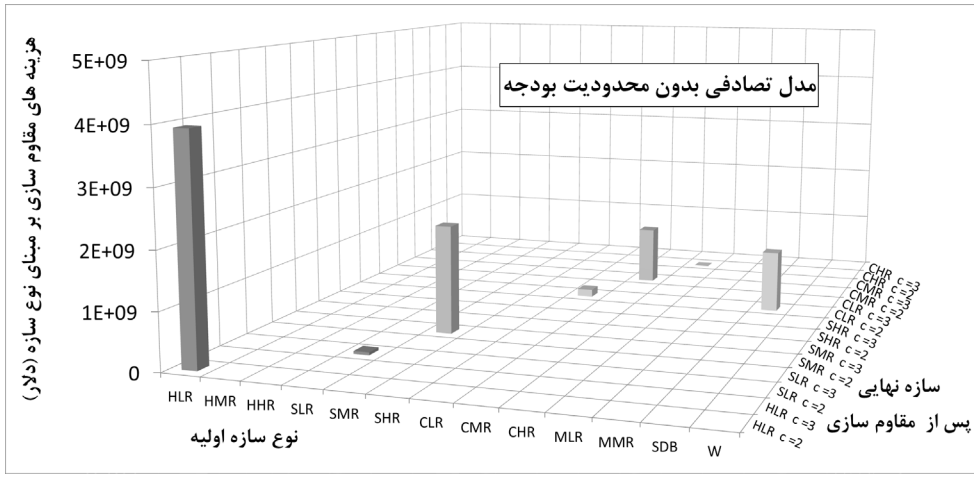
بر مبنای گزارش ملی ایران در سال ۲۰۰۵ [۳۱]، ایران ۲/۵٪ از بودجه‌ی سالانه‌ی خود را صرف طرح‌ها و فعالیت‌های پیشگیرانه و کاهش ریسک می‌کند. اگر فرض شود نیمی از این بودجه صرف فعالیت‌های پیشگیرانه و کاهش ریسک لرزه‌ای گردد و به علاوه از آنجا که تهران ۲۶٪ از تولید ناخالص ملی ایران را به خود اختصاص می‌دهد، با در نظر گرفتن اینکه کل بودجه‌ی کشور در سال ۲۰۰۵ برابر ۱,۶۰۰ تریلیون ریال بوده است [۳۲] مجموع بودجه‌ی سالیانه‌ی مقاوم‌سازی و بازسازی برابر ۶۰۰ میلیون دلار امریکا محاسبه شده است. از آنجا که مدت زمان برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده در مدل برابر ۲۰ سال است، مجموع بودجه‌ی ۲۰ ساله‌ی مقاوم‌سازی و بازسازی برابر ۱۲,۰۰۰ میلیون دلار امریکا محاسبه شده است. برای تحلیل موردی فرض شده که مجموع مقدار پارامتر B (سطح خسارت مجاز یا هزینه‌های بازسازی مجاز) و مقدار پارامتر G (بودجه‌ی مقاوم‌سازی) برابر مجموع بودجه‌ای است که دولت برای اقدامات مقاوم‌سازی و بازسازی لرزه‌ای در طی ۲۰ سال در نظر گرفته است (۱۲,۰۰۰ میلیون دلار امریکا محاسبه شده در بالا). همان‌طور که در قانون بودجه‌ی کشور[۳۰] ذکر شده است، باید یک پنجم کل بودجه‌ی اختصاص داده شده به کاهش ریسک زلزله و بازسازی، به اقدامات کاهش ریسک اختصاص یابد



تصویر ۴: هزینه‌های تقویت پیشنهاد شده برای محله‌های شهر تهران برای تحلیل موردی (میلیون دلار امریکا) که در آن‌ها k برابر ۶ است (الف) تحلیل تصادفی با محدودیت بودجه (ب) بدون محدودیت بودجه



(الف)



(ب)

تصویر ۵: هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهاد شده برای استراتژی‌های مختلف در برابر نوع سازه‌ی اولیه و سازه‌ی نهایی در شهر تهران برای تحلیل‌های (الف) با محدودیت بودجه مقاوم‌سازی، (ب) بدون محدودیت بودجه‌ی مقاوم‌سازی

جدول ۶: رواج نسبی اولیه‌ی انواع متفاوت سازه و درصد هزینه‌های مقاوم‌سازی اختصاص یافته به هر نوع سازه‌ای

نوع ساختمان‌های موجود اولیه		HLR		CLR		CMR		CHR		SLR		SMR		SDB		MLR	
سازه‌ای‌های رواج‌گونه		٪۴۵		٪۰/۹		٪۶/۵		٪۰/۱		٪۵		٪۳۴		٪۱/۲		٪۷	
						٪۷/۵											
تحلیل تصادفی	هزینه‌های مقاوم سازی	نوع ساختمان‌هایی که ساختمان‌های موجود به آن‌ها مقاوم سازی شده‌اند															
		HLR		CLR		CMR		CHR		SLR		SMR		CLR		CLR	
		c۲-	c۳-	c۲-	c۳-	c۲-	c۳-	c۲-	c۳-	c۲-	c۳-	c۲-	c۳-	c۲-	c۳-	c۲-	c۳-
تحلیل با محدودیت بودجه	۲/۴ میلیارد دلار	٪۷۵	٪۰	٪۲	٪۰	٪۲۳	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰
تحلیل بدون محدودیت بودجه	۸/۲ میلیارد دلار	٪۴۸	٪۰	٪۱/۵	٪۰	٪۱۳	٪۰	٪۰/۲	٪۰	٪۰/۶	٪۰	٪۲۳/۴	٪۰	٪۱۳	٪۰	٪۰	٪۰

[۳۴]. بنابراین در تحلیل موردی اصلی، فرض شده که ۲۰٪ از کل بودجه (۲,۴۰۰ میلیون دلار امریکا) برای بودجه‌ی مقاوم‌سازی و ۸۰٪ کل بودجه‌ی باقی‌مانده (۹,۶۰۰ میلیون دلار امریکا) برای بازسازی اختصاص یابد.

تحلیل مدل و نتایج

در این بخش، نتایج تحلیل مدل انجام شده ارائه می‌گردد و می‌توان با کمک این نتایج به سؤالات کلیدی پرسیده شده در ارتباط با راهبردهای مقاوم‌سازی پاسخ داد. برای پاسخ‌گویی به این سؤالات و درک آثار عوامل مختلف بر راهبرد مقاوم‌سازی انتخاب شده و انجام تحلیل حساسیت[۳۱] در این مطالعه‌ی موردی، مدل بهینه‌سازی با تغییر فرضیات و داده‌های ورودی شامل ۲۴ مقدار مختلف برای عامل پرهیز از ریسک اقتصادی (k) [۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ ، ۱/۲۵، ۱/۵، ۱/۷۵، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰،۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰] و دو حالت وجود و عدم وجود محدودیت برای بودجه‌ی مقاوم‌سازی، مورد تحلیل قرار گرفت.

پیشنهادهای کاهش ریسک و اولویت‌های مقاوم‌سازی

انتخاب راهبرد کاهش ریسک (مقاوم‌سازی ساختمان و یا بازسازی ساختمان به نوع دیگر سازه) به ترکیب عوامل بسیاری بستگی دارد. این عوامل شامل شدت و فراوانی خطر لرزه‌ای، رواج نسبی انواع متفاوت سازه در ساختمان‌های اولیه‌ی موجود، آسیب‌پذیری لرزه‌ای نسبی آن‌ها، انواع روش‌های مقاوم‌سازی و کاهش ریسک موجود و بهبود نسبی که در عملکرد ساختمان به دلیل انجام مقاوم‌سازی‌ها ایجاد می‌شود و هزینه‌های انجام هریک از انواع روش‌های مقاوم‌سازی است [۱۱]. در پایان نیز این انتخاب راهبرد مقاوم‌سازی به بودجه‌ی موجود برای مقاوم‌سازی و سطح ریسکی که برای تصمیم‌گیرنده و یا مدیر ریسک قابل پذیرش است، بستگی دارد.

تصویر ۴ (الف، ب) مقدار هزینه‌های مقاوم‌سازی را در مقابل موقعیت جغرافیایی هریک از ناحیه‌ها برای دو تحلیل بهینه‌سازی تصادفی، به ترتیب با محدودیت بودجه و بدون محدودیت بودجه، نشان می‌دهد. در این تحلیل‌ها مقدار k برابر ۶ در نظر گرفته شده است. در این نقشه‌ها مقدار هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی در بخش‌های مرکزی و شرقی تهران بیشتر از نواحی غربی است. این امر ممکن است به دلیل مقادیر بیشتر PGA در این بخش‌ها و یا چگالی بیشتر ساختمانی در این موقعیت‌های مکانی باشد. همان‌طور که در تصویر ۴ می‌توان مشاهده کرد، هزینه‌های مقاوم‌سازی حساسیت‌های بالایی نسبت به مقدار محدودیت بودجه‌ی قابل دسترس برای مقاوم‌سازی دارد.

تصویرهای ۵ (الف، ب) کل هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهاد شده را، در برابر نوع سازه‌ی اولیه و سازه‌ی نهایی ساختمان‌ها برای دو تحلیل موردی، با محدودیت‌های متفاوت برای بودجه مقاوم‌سازی در شهر تهران، نشان می‌دهد. جدول ۶ رواج نسبی اولیه‌ی انواع متفاوت سازه و درصد هزینه‌های مقاوم‌سازی اختصاص یافته به هر نوع سازه یا در واقع راهبرد مقاوم‌سازی را برای هر دو تحلیل موردی انجام شده ارائه می‌دهد.

تحلیل تصادفی با محدودیت بودجه به این نتیجه منجر می‌شود که بیشترین هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی صرف مقاوم‌سازی ساختمان‌های با نوع سازه‌ی نیمه اسکلتی فلزی - بنایی کوتاه مرتبه شود که با نام HLR نشان داده می‌شود. ساختمان‌های نیمه اسکلتی فلزی - بنایی کوتاه مرتبه و میان مرتبه (به ترتیب HLR و SMR) همان‌طور که در جدول ۶ قابل مشاهده است، سهم بزرگی از ساختمان‌های موجود در تهران را تشکیل می‌دهند، با این وجود به ترتیب در زیرگروه‌های سازه‌ای کوتاه مرتبه و میان مرتبه‌ی مربوط به خود کمترین آسیب‌پذیری لرزه‌ای را دارند. ساختمان‌های بتنی مسلح میان مرتبه و کوتاه مرتبه (CMR و CLR) به ترتیب پیشنهادهای مقاوم‌سازی بعدی خواهند بود. ساختمان‌های بتنی مسلح پس از ساختمان‌های نیمه اسکلتی فلزی - بنایی رایج‌ترین نوع سازه‌ای در تهران هستند که البته از آسیب‌پذیری بیشتری برخوردارند و به‌منزله‌ی راهبردهای بعدی مقاوم‌سازی پیشنهاد می‌شوند.

بنابراین به نظر می‌رسد که در این تحلیل موردی پیشنهادهای مقاوم‌سازی بیشتر تحت تأثیر رواج سازه‌های موجود (HLR) و آسیب‌پذیری سازه‌ها (CMR و CLR) باشد.

با افزایش امکان اختصاص بودجه‌ی بیشتر برای مقاوم‌سازی در تحلیل بدون محدودیت بودجه، هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی افزایش می‌یابد و سهم سه نوع سازه‌ی پیش‌گفته از مجموع هزینه‌ها کاهش می‌یابد (جدول ۶). به علاوه پیشنهاد می‌شود که سایر گونه‌های سازه‌ای مانند ساختمان‌های اسکلت فلزی کوتاه مرتبه و میان مرتبه (SLR و SMR)، همچنین آسیب‌پذیرترین نوع سازه یعنی سازه‌ی خشتی (SDB) و در آخر ساختمان‌های بتن مسلح بلند مرتبه (CHR) به ترتیب برای مقاوم‌سازی انتخاب شوند. به غیر از ساختمان خشتی (SDB) راهبرد مقاوم‌سازی در سایر سازه‌ها به صورت تقویت آن‌ها به سطح طراحی لرزه‌ای بالاتر (از سطح طراحی مقاوم‌سازی نشده به سطح مقاوم‌سازی شده سطح ۱) است. راهبرد مقاوم‌سازی در رابطه با ساختمان‌های خشتی (SDB) بدین صورت است که آن‌ها تخریب می‌شوند و با ساختمان‌های بتنی مسلح کوتاه مرتبه و با سطح طراحی مقاوم‌سازی شده‌ی سطح ۱ جایگزین می‌شوند، زیرا این نوع سازه‌ها قابلیت اینکه بر آن‌ها تقویت لرزه‌ای صورت بگیرد ندارند و عملکرد لرزه‌ای مناسبی را نمی‌توان از آن‌ها انتظار داشت. این امر نشان می‌دهد که با افزایش بودجه‌ی در دسترس برای مقاوم‌سازی، گزینه‌های مقاوم‌سازی پرهزینه‌تر مانند بازسازی ساختمان‌های خشتی نیز توسط مدل بهینه‌سازی پیشنهاد می‌شوند.

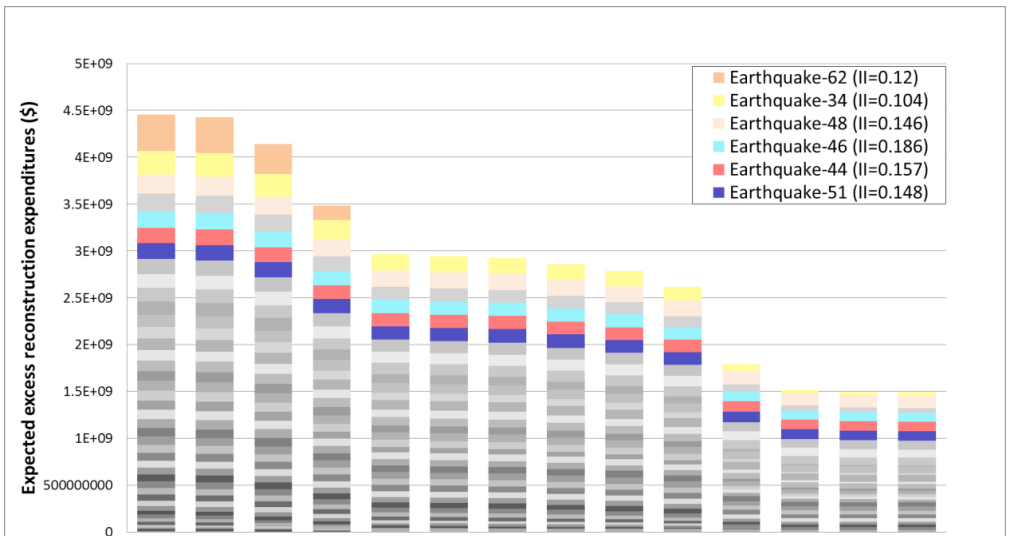
اثر زلزله‌های مختلف

هزینه‌های بازسازی می‌تواند به تفکیک برای سناریوهای زلزله مختلف نشان داده شود. به کمک این کار می‌توان زلزله‌هایی که بیشترین مشارکت را در احتمال خسارت بیش از حد خسارت مجاز (B) دارند، مشخص نمود. تصویر ۱۴ میزان مشارکت ۶۲ زلزله سناریو را در کل خسارت (هزینه‌های بازسازی) بیش از حد (یعنی مقدار $P^l \beta^l$ برای هر زلزله سناریو l) در برابر ۲۴ مقدار پارامتر پرهیز از ریسک اقتصادی (κ)، که هر کدام متناظر با یک تحلیل موردی است، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار خسارت (هزینه‌های بازسازی) بیش از حد، با کاهش κ از مقدار صفر تا ۴۰ افزایش می‌یابد و سپس برای مقادیر $80 > \kappa > 50$ ثابت باقی می‌ماند. تصویر ۶ همچنین شماره و شاخص شدت مربوط زلزله‌هایی که بیشترین مشارکت را در مقدار خسارت (هزینه‌های بازسازی) بیش از حد دارند، نشان می‌دهد. شاخص شدت مربوط به هر زلزله از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود و مبین میانگین وزنی شدت (بیشینه شتاب زمین) زلزله‌ی مربوطه‌ی وزن داده شده با جمعیت تحت تأثیر آن زلزله است.

رابطه‌ی ۳ :
$$Intensity\ \ Index = \sum_{m=1}^{114} \frac{PGA_m\, p_m}{Pop}$$

در این رابطه PGA_m مقدار بیشینه شتاب زمین در ناحیه‌ی m است و p_m، جمعیت ساکن در ناحیه‌ی m، Pop تعداد کل جمعیت، و m شاخص ناحیه است.

در تصویر ۶ برای حالتی که مقدار κ برابر صفر است، ۴۵ زلزله از ۶۲ زلزله در مقدار خسارت (هزینه‌های بازسازی) بیش از حد مشارکت می‌کنند و تنها ۲۰ زلزله سهم مشارکتی معادل ۷۰٪ کل مقدار خسارت (هزینه‌های بازسازی) بیش از حد دارند. سناریو زلزله‌های ۶۲، ۳۴ و ۴۸ با مجموع ۲۰٪ به ترتیب بیشترین سهم مشارکت را دارند. با افزایش عامل پرهیز از ریسک κ، تعداد سناریو زلزله‌هایی که در مقدار خسارت (هزینه‌های بازسازی) بیش از حد مشارکت می‌کنند کاهش می‌یابد. برای مقادیر $80 > \kappa > 50$ تعداد زلزله‌های مشارکت کننده به ۳۱ تقلیل می‌یابد. در این حالت زلزله‌های ۴۸، ۵۱، ۴۶ و ۴۴ با مجموع ۲۸٪ به ترتیب بیشترین زلزله‌های مشارکت کننده در مقدار خسارت (هزینه‌های بازسازی) بیش از حد هستند.



تصویر ۶: میزان مشارکت هر زلزله سناریو را در خسارت (هزینه‌های بازسازی) بیش از حد در برابر ۲۴ مقدار پارامتر پرهیز از ریسک اقتصادی (κ) که هر کدام متناظر با یک تحلیل موردی است. در این تحلیل‌ها محدودیتی برای بودجه‌ی مقاوم‌سازی وجود ندارد.

جدول ۷: توابع هدف دو حالت با و بدون محدودیت بودجه محاسبه شده برای همه‌ی زلزله‌ها با فرض وقوع قطعی آن‌ها

شماره‌ی زلزله	احتمال زلزله	تابع هدف، هزینه‌های کل (میلیارد دلار) با محدودیت بودجه	تابع هدف وزن‌دهی شده با احتمال زلزله، هزینه‌های کل (میلیارد دلار) با محدودیت بودجه	تابع هدف، هزینه‌های کل (میلیارد دلار) بدون محدودیت بودجه	تابع هدف وزن‌دهی شده با احتمال زلزله، هزینه‌های کل (میلیارد دلار) بدون محدودیت بودجه
۱	۰/۰۰۶	۸۶/۳	۰/۵۱۹	۶۴/۳	۰/۳۸۷
۲	۰/۰۱۷۸	۵۷/۱	۱/۰۲	۳۶/۳	۰/۶۴۶
۳	۰/۱۱۳۸	۴/۷۶	۰/۵۴۲	۴/۷۶	۰/۵۴۲
۴	۰/۰۰۰۴	۷/۰۵	۰/۰۰۲	۷/۰۵	۰/۰۰۲
۵	۰/۰۰۸۴	۱۶/۸	۰/۱۴۲	۱۳/۴	۰/۱۱۴
۶	۰/۱۰۳۵	۳/۶۶	۰/۳۷۹	۳/۶۶	۰/۳۷۹
۷	۰/۰۰۹۹	۷۰/۷	۰/۶۹۹	۵۰/۶	۰/۵
۸	۰/۰۰۶۹	۱۱۱	۰/۷۷۱	۸۱/۱	۰/۵۶۳
۹	۰/۰۱۰۲	۷/۹	۰/۸۰۵	۴۹	۰/۴۹۹
۱۰	۰/۰۹۹۴	۱/۳	۰/۱۲۹	۱/۳	۰/۱۲۹
۱۱	۰/۰۰۵۱	۹۴/۸	۰/۴۸۵	۶۸	۰/۳۴۷
۱۲	۰/۰۰۸۶	۵۳/۲	۰/۴۵۵	۳۴/۱	۰/۲۹۲
۱۳	۰/۰۱۵۵	۴۵/۵	۰/۷۰۵	۲۶/۲	۰/۴۰۷
۱۴	۰/۱۱۷۵	۳/۹۸	۰/۴۶۸	۳/۹۸	۰/۴۶۸
۱۵	۰/۰۰۹۹	۹/۰۴	۰/۰۸۹	۹/۰۴	۰/۰۸۹
۱۶	۰/۰۰۹	۱۱۱	۰/۹۹۷	۷۸/۷	۰/۷۰۶
۱۷	۰/۰۵۹۸	۳/۶۴	۰/۲۱۸	۳/۶۴	۰/۲۱۸
۱۸	۰/۰۰۵۶	۹/۰۵	۰/۰۵	۹/۰۵	۰/۰۵
۱۹	۰/۰۱۵۹	۸۳/۴	۱/۳۳	۵۵/۲	۰/۸۸
۲۰	۰/۰۰۵۳	۱۰۸	۰/۵۶۸	۸۰/۷	۰/۴۲۶
۲۱	۰/۰۴۰۵	۲/۹۷	۰/۱۲۰	۲/۹۷	۰/۱۲
۲۲	۰/۲۳۲۷	۳/۸۷	۰/۰۹	۳/۸۷	۰/۰۹
۲۳	۰/۰۰۹۵	۵۱/۴	۰/۴۸۷	۳۲/۵	۰/۳۰۸
۲۴	۰/۰۰۶۴	۹/۱۷	۰/۰۵۹	۹/۱۷	۰/۰۵۹
۲۵	۰/۰۰۹۲	۳۹/۲	۰/۳۶۱	۲۴	۰/۲۲۱
۲۶	۰/۰۰۴۷	۹/۸۴	۰/۰۴۶	۹/۸۴	۰/۰۴۶
۲۷	۰/۰۳۹۷	۶/۱	۰/۲۴۲	۶/۱	۰/۲۴۲
۲۸	۰/۰۰۳۸	۱۷/۴	۰/۰۶۷	۱۳/۸	۰/۰۵۳
۲۹	۰/۰۰۹۱	۲۱/۶	۰/۱۹۸	۱۵	۰/۱۳۷
۳۰	۰/۰۰۵۸	۱۰۵	۰/۶۰۳	۷۷/۳	۰/۴۴۵
۳۱	۰/۰۰۷۹	۹۳/۸	۰/۷۴۴	۶۳/۱	۰/۵
۳۲	۰/۰۱۳۸	۶۲/۹	۰/۸۶۶	۴۲/۴	۰/۵۸۴
۳۳	۰/۰۱۰۴	۴۲/۱	۰/۴۳۹	۲۴/۱	۰/۲۵۱
۳۴	۰/۰۲۵۹	۷۰/۲	۱/۸۲	۴۴/۶	۱/۱۶
۳۵	۰/۰۱۱۴	۶۷/۳	۰/۷۶۵	۴۵/۹	۰/۵۲۲
۳۶	۰/۰۲۶۵	۷/۹۴	۰/۲۱۰	۷/۹۴	۰/۲۱۰
۳۷	۰/۰۰۵۱	۱۱۹	۰/۶۰۶	۹۰/۳	۰/۴۶۰
۳۸	۰/۰۱۴۸	۲۰/۶	۰/۳۰۵	۱۴/۸	۰/۲۱۹

شماره‌ی زلزله	احتمال زلزله	تابع هدف، هزینه‌های کل (میلیارد دلار) با محدودیت بودجه	تابع هدف وزن‌دهی شده با احتمال زلزله، هزینه‌های کل (میلیارد دلار) با محدودیت بودجه	تابع هدف، هزینه‌های کل (میلیارد دلار) بدون محدودیت بودجه	تابع هدف وزن‌دهی شده با احتمال زلزله، هزینه‌های کل (میلیارد دلار) بدون محدودیت بودجه
۳۹	۰/۰۱۰۱	۱۱۲	۱/۱۳	۸۵/۹	۰/۸۶۸
۴۰	۰/۰۰۰۲	۱۳۳	۰/۰۲۶	۹۵/۲	۰/۰۱۹
۴۱	۰/۰۰۹۸	۹/۵۸	۰/۰۹۴	۹/۵۸	۰/۰۹۴
۴۲	۰/۰۰۴۹	۱۶۷	۰/۸۱۶	۱۳۴	۰/۶۵۵
۴۳	۰/۰۰۷۹	۱۲۳	۰/۸۸۴	۹۳/۲	۰/۶۷۱
۴۴	۰/۰۰۸۵	۱۳۵	۱/۱۵	۱۰۲	۰/۸۷۳
۴۵	۰/۰۰۶۲	۲۲/۶	۰/۱۳۹	۱۵/۴	۰/۰۹۵
۴۶	۰/۰۰۸	۱۴۶	۱/۱۷	۱۱۴	۰/۹۱۴
۴۷	۰/۰۰۹۲	۷۳/۳	۰/۶۷۷	۴۹/۸	۰/۴۶
۴۸	۰/۰۰۸	۱۷۴	۱/۳۸	۱۳۹	۱/۱۱
۴۹	۰/۰۰۶۴	۴۴/۸	۰/۲۸۵	۲۶/۸	۰/۱۷
۵۰	۰/۰۱۲۵	۴/۸۴	۰/۰۶	۴/۸۴	۰/۰۶
۵۱	۰/۰۰۷۱	۱۶۰	۱/۱۴	۱۲۳	۰/۸۷۷
۵۲	۰/۰۰۴	۱۲۸	۰/۵۱۵	۹۹/۹	۰/۴
۵۳	۰/۰۲۸۸	۶/۱	۰/۱۷۶	۶/۱	۰/۱۷۶
۵۴	۰/۰۰۵۱	۱۱۵	۰/۵۸۶	۸۴/۷	۰/۴۳۳
۵۵	۰/۰۰۷۹	۹۱/۲	۰/۷۲۲	۶۱/۲	۰/۴۸۴
۵۶	۰/۰۰۱۵	۱۷۳	۰/۲۶۴	۱۳۸	۰/۲۱
۵۷	۰/۰۰۵۱	۱۰۲	۰/۵۲۳	۶۶/۴	۰/۲۴
۵۸	۰/۰۰۶۱	۱۶۲	۰/۹۹	۱۲۳	۰/۷۵۱
۵۹	۰/۰۱۵۴	۹/۹۶	۰/۱۵۴	۹/۹۶	۰/۱۵۴
۶۰	۰/۰۷۹۳	۱۰/۳	۰/۸۲۱	۱۰/۳	۰/۸۲۱
۶۱	۰/۱۰۱۳	۴/۱۴	۰/۴۱۹	۴/۱۴	۰/۴۱۹
۶۲	۰/۱۱۸۹	۲۵/۹	۳/۰۸	۱۶/۲	۱/۹۲
متوسط توابع هدف			۳۵/۶	۲۶/۲	

جدول ۸: محاسبه‌ی ارزش مورد انتظار اطلاعات صحیح برای تحلیل موردی در دو حالت با و بدون محدودیت بودجه

تحلیل موردی	تابع هدف، هزینه‌های کل (میلیارد دلار) از حل تصادفی	متوسط تابع هدف (میلیارد دلار)	ارزش مورد انتظار اطلاعات صحیح (میلیارد دلار)
تحلیل تصادفی با محدودیت بودجه	۳۸/۳	۳۵/۶	۲/۶۶
تحلیل تصادفی بدون محدودیت بودجه	۳۶/۵	۲۶/۲	۱۰/۳

ارزیابی برتری بهینه‌سازی تصادفی در مقایسه با سایر روش‌های احتمالی

برای بررسی مدل پیشنهادی از منظر در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های زلزله‌های محتمل و نشان دادن برتری‌ها و قابلیت‌های مدل برنامه‌ریزی تصادفی (احتمالی) نسبت به مدل‌هایی که بحث احتمالات را در خارج از پروسه‌ی برنامه‌ریزی در نظر می‌گیرند، مجموعه تحلیل‌هایی در نظر گرفته شده است. این تحلیل‌ها با فرض داده‌هایی که برای حالت تحلیل تصادفی در دو حالت با و بدون محدودیت بودجه در نظر گرفته شده شامل زلزله‌ها و احتمالات آن‌ها، انجام شده است و نتایج این تحلیل‌ها با نتایج تحلیل‌های تصادفی مورد مقایسه قرار گرفته است. علاوه بر مقایسه‌ی نتایج تحلیل‌ها و پیشنهادات مقاوم‌سازی ارائه شده

جدول ۹. مقادیر متوسط هزینه‌های زلزله‌های محتمل با فرض وقوع هر یک از سناریوها در برنامه‌ی یقینی و یا برنامه‌ی متوسط، هزینه‌های کل حاصل از حل تصادفی و ارزش حل تصادفی برای تحلیل‌های با و بدون محدودیت بودجه

تحلیل موردی	متوسط هزینه‌های کل(میلیارد دلار) در اثر وقوع کلیه زلزله‌ها با فرض پیش بینی وقوع سناریو زلزله ا برای مدل بهینه‌سازی و یا برنامه متوسط	تابع هدف، هزینه‌های کل (میلیارد دلار) از حل تصادفی	ارزش حل تصادفی (میلیارد دلار)
زلزله‌ی شماره‌ی ۳			
تحلیل تصادفی با محدودیت بودجه	۳۹/۹	۳۸/۳	۱/۶۷
تحلیل تصادفی بدون محدودیت بودجه	۳۹/۹	۳۶/۵	۳/۴۲
زلزله‌ی شماره‌ی ۴۶			
تحلیل تصادفی با محدودیت بودجه	۳۸/۷	۳۸/۳	۰/۴۶۲
تحلیل تصادفی بدون محدودیت بودجه	۴۷	۳۶/۵	۱۰/۵
زلزله‌ی شماره‌ی ۵۱			
تحلیل تصادفی با محدودیت بودجه	۳۸/۹	۳۸/۳	۰/۶۳۲
تحلیل تصادفی بدون محدودیت بودجه	۴۸/۷	۳۶/۵	۱۲/۲
زلزله‌ی شماره‌ی ۶۲			
تحلیل تصادفی با محدودیت بودجه	۳۸/۶	۳۸/۳	۰/۳
تحلیل تصادفی بدون محدودیت بودجه	۳۸/۵	۳۶/۵	۲/۰۴
برنامه‌ی متوسط			
تحلیل تصادفی با محدودیت بودجه	۳۹/۶	۳۸/۳	۱/۳۴

توسط این روش‌ها، مقادیر کلیدی نشان‌دهنده‌ی برتری مدل تصادفی «ارزش مورد انتظار اطلاعات صحیح» و «ارزش حل تصادفی» محاسبه شده تا ارزش انجام تحلیل برنامه‌ریزی تصادفی بیشتر مشخص گردد.

در نظر گرفتن احتمالات خارج از مدل یقینی و محاسبه‌ی ارزش مورد انتظار اطلاعات صحیح

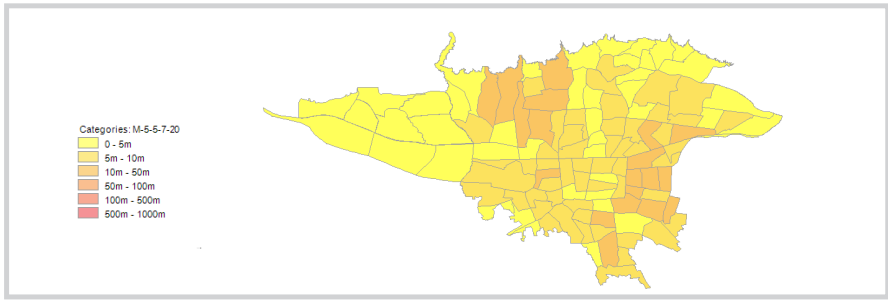
برای به دست آوردن «ارزش مورد انتظار اطلاعات صحیح»، به روش شرح داده شده، مدل برنامه‌ریزی یقینی ارائه شده برای هریک از ۶۲ سناریوهای زلزله‌ی فهرست زلزله‌های کاهش یافته، با فرض وقوع قطعی هر یک از آن‌ها تحلیل شده است و تابع هدف مربوط به هر یک از زلزله‌ها محاسبه می‌گردد. مقادیر تابع هدف و متوسط آن و همچنین ارزش مورد انتظار اطلاعات صحیح برای تحلیل در دو حالت با و بدون محدودیت بودجه انجام شده و در جدول ۷ نشان داده شده است. تفاضل مقدار به دست آمده از تابع هدف (هزینه‌ی کل) با حل تصادفی، و متوسط هزینه‌ی کل به دست آمده از بالا، «ارزش مورد انتظار اطلاعات صحیح» را نشان می‌دهد که برای دو تحلیل تصادفی با و بدون محدودیت بودجه در جدول ۸ نشان داده شده است. این نوع متوسط‌گیری و در واقع در نظر گرفتن احتمالات در خارج از مدل بهینه‌سازی بیانگر حالتی است که فرض شده وقوع زلزله‌ها به صورت چرخشی و قطعی در دوره‌های بسیار طولانی در آینده است. حال آنکه از وقوع زلزله‌ها در آینده اطلاع موثقی در دسترس نیست. مثبت بودن مقدار این اختلاف (ارزش مورد انتظار اطلاعات صحیح) نشان می‌دهد که اگر از وقوع زلزله اطلاعات کاملاً موثقی داشتیم، امکان تصمیم‌گیری بهتر برای مدیر ریسک وجود داشته است. حال آنکه چنین امکانی وجود ندارد و روش تصادفی بهترین روش ممکن است.

محاسبه‌ی «ارزش حل تصادفی»

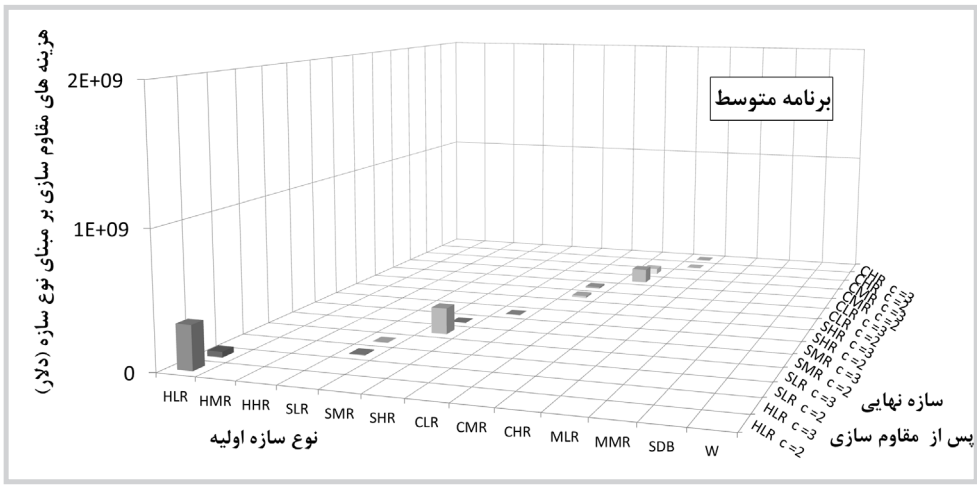
برای محاسبه‌ی ارزش حل تصادفی متناظر با مدل تصادفی ارائه شده در اینجا، چهار زلزله در دو حالت با و بدون محدودیت بودجه انتخاب شده‌اند و مقادیر ارزش حل تصادفی در ۸ حالت مذکور به دست آمده است. جدول ۹ مقدار هزینه‌های کل و ارزش حل تصادفی را برای هر یک از این چهار سناریوی زلزله ۳، ۴۶، ۵۱ و ۶۲ در دو حالت محدودیت بودجه نشان می‌دهد.

در نظر گرفتن فرض وقوع حتمی یک زلزله‌ی متوسط یا یک زلزله‌ی بزرگ، منجر به یک تصمیم مقاوم‌سازی متناسب با این زلزله می‌گردد. این کار در مسائل بهینه‌سازی معمول است، با این حال می‌تواند عواقب نامطلوبی داشته باشد. بدین معنا که چنانچه زلزله‌های دیگری رخ دهد که تناسبی با زلزله‌ی در نظر گرفته شده نداشته باشد، می‌تواند هزینه‌های بیشتری را تحمیل کند. در جدول ۹ ارزش حل تصادفی برای هر چهار سناریو زلزله و در دو حالت محدودیت بودجه مقداری مثبت دارد و این در واقع خسارت حاصل از در نظر نگرفتن تغییرات تصادفی است و به معنای سود محتمل در اثر حل مدل تصادفی است. باید توجه داشت که این مقدار برابر مقدار مورد انتظار اطلاعات کامل نیست و می‌تواند حتی بزرگ‌تر از آن نیز باشد.

برنامه‌ی متوسط و محاسبه‌ی «ارزش حل تصادفی» با فرض برنامه‌ی تصادفی



تصویر ۷: هزینه‌های تقویت پیشنهاد شده برای محله‌های شهر تهران برای برنامه‌ی متوسط (میلیون دلار آمریکا)



تصویر ۸: هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهاد شده برای استراتژی‌های مختلف در برابر نوع سازه‌ی اولیه و سازه‌ی نهایی در شهر تهران برای برنامه‌ی متوسط

یکی دیگر از روش‌های در نظر گرفتن زلزله‌ها و احتمالات آن‌ها در برنامه‌ریزی برای مقاوم‌سازی و اختصاص منابع، استفاده از برنامه‌ی متوسط است. برای نشان دادن مدل برنامه‌ریزی تصادفی (احتمالی) نسبت به این روش تصادفی، مدل برنامه‌ریزی یقینی ارائه شده برای هریک از زلزله‌ها تحلیل می‌شود و با فرض اینکه دقیقاً آن زلزله اتفاق می‌افتد، مقادیر مساحت‌های پیشنهادی مقاوم‌سازی، که همان تصمیمات بهینه هستند، برای ۶۲ سناریو زلزله محاسبه می‌گردد. حال یک برنامه‌ی متوسط انجام می‌شود؛ یعنی مقدار متوسط مساحت مقاوم‌سازی شده، به صورت میانگین وزنی ۶۲ تصمیم بهینه، برای هریک از زلزله‌ها با توجه به احتمالات آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. سپس تصمیم مقاوم‌سازی حاصل از برنامه‌ی متوسط با تصمیمات مقاوم‌سازی بهینه‌ی حاصل از حل تصادفی مقایسه می‌شود.

تصویر ۷ توزیع جغرافیایی هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی در برنامه‌ی متوسط را در حالت با محدودیت بودجه نشان می‌دهد. از آنجا که این برنامه در واقع متوسط همه‌ی برنامه‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی است، توزیع جغرافیایی پراکنده‌تری نسبت به پیشنهادهای مدل تصادفی و به ویژه مقادیر مقاوم‌سازی دارد. همچنین در مقایسه با حل تصادفی بر نواحی خاصی متمرکز نیست و ساختمان‌ها تقریباً در کلیه‌ی ناحیه‌های تهران تا حد محدودی مقاوم‌سازی شده‌اند. تصویر ۸ نیز کل هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهاد شده در برنامه‌ی متوسط را، در برابر نوع سازه‌ی اولیه و سازه‌ی نهایی ساختمان‌ها با محدودیت بودجه‌ی مقاوم‌سازی در شهر تهران، نشان می‌دهد. در اینجا نیز توزیع هزینه‌های مقاوم‌سازی در میان ساختمان‌های مختلف پراکنده‌تر بوده، شامل کلیه‌ی راهکارهای مقاوم‌سازی غیر از مقاوم‌سازی ساختمان‌های خشتی و مصالح بنایی و چوبی به دلیل محدودیت بودجه می‌شود. بیشترین هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی همانند تحلیل تصادفی با محدودیت بودجه صرف مقاوم‌سازی ساختمان‌های با نوع سازه‌ی نیمه‌اسکلتی فلزی- بنایی کوتاه مرتبه HLR نشان داده می‌شود. البته تفاوت هزینه‌های صرف شده برای مقاوم‌سازی سازه‌های مختلف در اینجا در مقایسه با تحلیل‌های مربوط به سایر زلزله‌های بررسی شده و مدل تصادفی زیاد نیست. گزینه‌های مقاوم‌سازی بعدی ساختمان‌های اسکلت فلزی میان مرتبه (SMR) و ساختمان‌های بتنی مسلح میان مرتبه (CMR) هستند.

در این حالت نیز مقدار ارزش حل تصادفی با محاسبه‌ی مقدار هزینه‌های کل ایجاد شده در اثر وقوع کلیه‌ی زلزله‌های بزرگ تا کوچک دیگر و سپس گرفتن متوسط وزنی مقادیر هزینه‌ی کل برای زلزله‌های مسبب با توجه به احتمالات زلزله‌ها و محاسبه‌ی تفاضل مقدار به دست آمده از تابع هدف با حل تصادفی (هزینه کل حاصل از مدل تصادفی)، و متوسط محاسبه شده، به دست آمده است. این مقدار در جدول ۹، در حالتی که محدودیت برای بودجه موجود است، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده

می‌شود، ارزش حل تصادفی برای در نظر گرفتن برنامه‌ی متوسط نیز مقداری مثبت دارد و این در واقع نشان می‌دهد که روش حل تصادفی به دلیل ارائه کردن هزینه‌های کمتر نسبت به برنامه‌ریزی متوسط عدم قطعیت‌های مرتبط با زلزله‌ها را بهتر مدل کرده است.

نتیجه‌گیری

اختصاص منابع اقتصادی و اهمیت آن در ریسک بلایای طبیعی در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مباحثی نظیر اثرگذاری و سودمندی نحوه‌ی بودجه‌بندی و توزیع منابع اقتصادی به منزله‌ی اهداف اصلی در انتخاب راهکار بهینه برای کاهش ریسک و اختصاص منابع عمومی برای این منظور مورد تأکید قرار گرفت. یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای با هدف کمینه کردن آثار نامطلوب زلزله‌های محتمل آینده (خسارات) و هزینه‌ی راهکارهای مطلوب کاهش ریسک در سطح منطقه‌ای توسعه داده شده است. وجه تمایز این مدل با مدل‌های پیشین علاوه بر ارتقای مدل‌های بهینه‌سازی یقینی به مدل‌های بهینه‌سازی تصادفی، برقراری توازن میان ریسک و سودمندی است. برای نشان دادن برتری مدل تصادفی ارائه شده از منظر در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به وقوع زلزله‌های محتمل، در مقایسه با سایر روش‌هایی که احتمالات را خارج مدل بهینه‌سازی در نظر می‌گیرند، برخی از این روش‌ها مانند برنامه‌ی متوسط در این مقاله تعریف و ارائه شده است. همچنین نحوه‌ی محاسبه‌ی «ارزش حل تصادفی» و «ارزش مورد انتظار اطلاعات صحیح» برای مقایسه این روش‌ها نیز ارائه شده است.

برای نشان دادن کاربرد مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای و مقایسه‌ی آن با سایر روش‌های در نظر گرفتن احتمالات در بحث بهینه‌سازی از نظر عملی، مطالعه‌ی موردی که برای شهر تهران انجام شده، به همراه نحوه‌ی تهیه داده‌های ورودی و نتایج استخراج شده از آن ارائه و مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل مطالعه‌ی موردی انجام شده یافته‌های جدیدی را ارائه می‌کند. در مطالعه‌ی موردی اصلی انتخاب آنکه چه سازه‌ای باید مقاوم‌سازی شود، بیش از هر عامل دیگری به رواج نسبی آن گونه‌های ساختمان‌ها، آسیب‌پذیری آن‌ها و محدودیت بودجه‌ی مقاوم‌سازی وابسته است. با افزایش بودجه‌ی در دسترس، گونه‌های دیگر سازه‌ای و راهکارهای پرهزینه‌تر و تغییر نوع سازه نیز به‌منزله‌ی راهکارهای انتخابی در نظر گرفته می‌شوند. تحلیل‌های موردی تکمیلی برای مقایسه‌ی مدل تصادفی و سایر روش‌های احتمالی حاکی از برتری مدل بهینه‌سازی تصادفی در مقایسه با این روش‌های احتمالی است. به‌ویژه همان‌طور که مشخص است اطلاعات دقیقی از وقوع زلزله سناریو در دسترس نیست و مقایسه‌ی نتایج این تحلیل‌ها با نتایج تحلیل مدل تصادفی و مقادیر عامل کلیدی «ارزش حل تصادفی» نشان‌دهنده‌ی این امر است. از طرف دیگر مقایسه‌ی نتایج حاصل از برنامه‌ی متوسط و برنامه‌ی تصادفی بر اساس مقادیر «ارزش حل تصادفی»، حاکی از آن است که ارزش حل تصادفی برای در نظر گرفتن برنامه‌ی متوسط نیز، مقداری مثبت دارد و این در واقع نشان می‌دهد که روش حل تصادفی به دلیل ارائه کردن هزینه‌های کمتر نسبت به برنامه‌ریزی متوسط، عدم قطعیت‌های مرتبط با زلزله‌ها را بهتر مدل کرده است.

استفاده از روش‌های بهینه‌سازی به مدیر ریسک و یا تصمیم‌گیرنده، در مورد تعیین راهبرد اختصاص منابع اقتصادی، این امکان را می‌دهد که بتواند میان تعداد فراوانی از راهکارها مقایسه انجام دهد. همچنین امکان در نظر گرفتن اهداف مختلف مانند کاهش ریسک خسارات اقتصادی بیش از حد مجاز، هزینه‌های مقاوم‌سازی و هزینه‌های بازسازی و نیز محدودیت‌های مختلف مانند محدودیت بودجه را به طور همزمان فراهم می‌کند. علاوه بر این استفاده از مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای این فرصت را برای مدیر ریسک فراهم می‌کند تا بتواند احتمال وقوع همه‌ی زلزله‌ها و پیامدهای متفاوت و گهگاه متناقض آن‌ها را در فرایند تصمیم‌گیری برای اختصاص منابع اقتصادی و کاهش ریسک لرزه‌ای در نظر بگیرد. با این حال این مدل نیز دارای محدودیت‌هایی مانند سایر مدل‌های ریاضی و رایانه‌ای است. از جمله محدودیت‌ها این است که این مدل فقط به بحث مقاوم‌سازی و بازسازی ساختمان‌های موجود در منطقه‌ی شهری پرداخته است و هیچ یک از زیرساخت‌ها در این مدل در نظر گرفته نشده‌اند. همچنین اثر مقاوم‌سازی لرزه‌ای بر عملکرد سازه‌ای ساختمان و دیگر اثراتی که مقاوم‌سازی بر افزایش سرمایه و یا مهاجرت جمعیت دارد در نظر گرفته نشده است. علاوه بر این برای محاسبه‌ی تابع هدف فقط خسارت اقتصادی ناشی از آسیب‌دیدگی و خرابی ساختمان در نظر گرفته شده است و سایر خسارات اقتصادی مانند خسارت به اجزای غیر سازه‌ای محتویات و خسارت اختلال در عملکرد تجاری ساختمان نیز در نظر گرفته نشده است. به علاوه در این مدل خسارات جانی در اثر زلزله که می‌تواند قابل توجه باشد در نظر گرفته نشده است. وارد کردن این اثر و همچنین سایر آثار اجتماعی و اقتصادی زلزله بر یک محیط شهری و مدل‌سازی آن‌ها در مدل بهینه‌سازی می‌تواند منجر به پیچیده شدن و در برخی موارد بزرگ شدن مدل، به حدی که با نرم‌افزارهای موجود دیگر قابل حل نباشد، گردد. با این وجود از نظر ریاضی می‌توان هریک از این آثار و حتی اثر خطرات ثانویه‌ی زلزله مانند آتش‌سوزی و سونامی را نیز در رابطه‌بندی مدل ارائه کرد.

پی‌نوشت

1. Gross Domestic Product
2. Two- stage stochastic optimization program
3. The expected value of perfect information (EVPI)
4. Value of Stochastic Solution (VSS)
5. Deterministic net present value (NPV) analysis
6. Benefit- cost analysis
7. Stochastic NPV analysis
8. Multi- attribute utility models
9. Optimization model
10. International institute for applied systems analysis (IIASA)
11. Insurance premium
12. Equivalent
13. Constraint
14. Non-negativity Requirements
15. Average Plan

16. Payback period
17. Census zone
18. Commune
19. District
20. Monte Carlo simulation (MCS)
21. Optimization-based Probabilistic Scenario
22. Poisson distribution
23. Damage ratio
24. Specrtal displacement
25. not mitigated
26. mitigated level 1
27. mitigated level 2
28. Life Safety Performance Level
29. Collapse Prevention Performance Level
30. Iranian Budget Law
31. Sensitivity Analysis

منابع

1. Japan International Cooperation Agency (JICA). (2000). *The Study on Seismic Microzoning of the Greater Tehran Area in the Islamic Republic of Iran, Final report to the Government of the Islamic Republic of Iran.* Tokyo, Japan.

2. JICA and TDMMO (2004). *The comprehensive master plan study on urban seismic disaster prevention and management for greater Tehran area In I.R. Iran*, GE, JR, 04-039.

3. IIEES, (2011). Assessment of Disaster Management in Local Level and Proposing Practicable Measure, Study and Assessment of Present Provision, Laws and structures of Disaster Management in Iran. World Bank Project Number EERP/PMU/CB/CC/SRI. IIEES, Tehran, Iran.

4. Vaziri, P, (2009). *Earthquake risk mitigation: hazard identification and resource allocation*. Ph.D. Dissertation, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University.

5. Dodo A, Xu N, Davidson R, Nozick L. (2005). Optimizing regional earthquake mitigation investment strategies. *Earthquake Spectra*, 21(2), 305–327.

6. Kappos A, Dimitrakopoulos E.G. (2008). Feasibility of pre-earthquake strengthening of buildings based on cost-benefit and life-cycle cost analysis, with aid of fragility curves. *Natural Hazards*, 45,33–54.

7. Englehardt J, Peng C, (1996). A Bayesian benefit-risk model applied to the South Florida building code. *Risk Analysis*, 16(1), 81–91.

8. Mostafa E, Grigoriu M (2002). A methodology for optimizing retrofitting techniques. *In Proceedings 7th US National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, Earthquake Engineering Research Institute.

9. Opricovic S, Tzeng G.H. (2002). Multicriteria planning of post-earthquake sustainable reconstruction. *Comput-Aided Civil and Infrastructure* 17, 211–220.

10. Jiawei Li; Simon Pollard; Graham Kendall; Emma Soane; Gareth Davies (2009). Optimizing risk reduction: An expected utility approach for marginal risk reduction during regulatory decision making. *Reliability Engineering and System Safety,* 94, 1729–1734.

11. Vaziri, P; Davidson R; Nozick L; Hosseini M, (2009). Resource allocation for regional earthquake risk mitigation: a case study of Tehran, Iran. *Natural Hazards*, DOI 10.1007/s11069-009-9446-4.

12. Dantzig, G. B. (1955). Linear Programming under Uncertainty. Management Science, 1, 197 – 206.

13. Beale, E. M. L. (1955). On Minimizing a Convex Function Subject to Linear Inequalities. *Journal of the Royal Statistical Society*, Series B, 17, 173 – 184.

14. Shah Haresh, Bendimerad F, Stojanovski P, (1992). Resource allocation in seismic risk mitigation. In Proceedings *10th World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, 4, 6007–6011.

15. Dodo, A; Davidson, R; Xu, N; Nozick, L. (2007). Application of regional earthquake mitigation optimization. *Computers and Operations Research* 34(8), 2478-2494.

16. Davidson, R; Nozick, L; Dodo, A; Xu, N. (June 19-23, 2005). *Equity in regional earthquake mitigation investment.* Symposium on Risk Modeling and Loss Reduction Strategies for Natural and Technological Hazards, Part of Ninth International Conference on Structural Safety and Reliability – ICOSSAR'05, Rome, Italy.

17. Xu N; Davidson R; Nozick L; Dodo A, (2007). The risk-return tradeoff in optimizing regional earthquake mitigation investment. *Structure and Infrastructure Engineering* 3(2), 133–146

18. Legg M, Davidson R, M.ASCE, Nozick L, M. ASCE. (2013). Optimization-based Regional Hurricane Mitigation Planning. I: Model, (in press)

19. Motamed H; Khazai B; Ghafory-Ashtiany M; Amini-Hosseini K (2011). An automated model for optimizing budget allocation in earthquake mitigation scenarios. *Natural Hazards*, DOI 10.1007/s11069-011-0035-y.

20. Peyghaleh E, Zolfaghari M R, (2014). Implementation of equity in resource allocation for regional earthquake risk mitigation using two-Stage stochastic programming. *Journal of Risk Analysis*, In press.

۲۱. پیغاله، الناز؛ ذوالفقاری، محمدرضا (۱۳۹۲). اختصاص منابع اقتصادی جهت کاهش ریسک لرزه‌ای منطقه‌ای با استفاده از مدل بهینه‌سازی

تصادفی و یقینی. نشریه علمی پژوهشی مدیریت بحران، شماره‌ی ۴، زمستان ۱۳۹۲.

22. CPLEX Optimizer (2013). High-performance mathematical programming solver for linear programming, mixed integer programming, and quadratic programming, IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, Version: 12.4, Visualization Powered by IBM ILOG JViews: http://www.01.ibm.com/software/integration/visualization/java/ Copyright IBM Corporation and other(s) 1987, 2011.

23. Yaghoob Gholipour et al. (2008). Probabilistic seismic hazard analyses, Phase 1 Greater Tehran Regions , final report, President Deputy Strategic Planning and Control, college of engineering university of Tehran, Yaghoob Gholipour, Yousef Bozorgnia, Manoel Berberian, Mohsen Rahnama, Manoochehr Ghoreyshi, Talebian Nazari, Jafar Shoja Taaheri, Ali Shafiyee. Table 6-1, available at http://iranhazard.mporg.ir/PageItem.aspx?p=Reports, 2008.

24-. Federal Emergency Management Agency (FEMA). (1999). HAZUS earthquake loss estimation methodology. Technical Manual, Service Release 1. FEMA, Washington, D.C.

25. Ramazi, H., (1999). Attenuation laws of Iranian earthquakes, in Proceedings of the 3rd International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran, 337-344.

26. Ambraseys, N., and Bommer, J., (1991). The attenuation of ground acceleration in Europe, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 20(12), 1179-1202.

27. Sarma, S. K., and Srbulov, M., (1996). A simplified method for prediction of kinematic soil-foundation interaction effects on peak horizontal acceleration of a rigid foundation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25(8), 815-836.

28. Federal Emergency Management Agency (FEMA). (1985). ATC-13, Earthquake damage evaluation data for California, Aplide Technollogy concil, Redwood, CA.

29. Management and Planning Organization (MPO) of Iran, (2007). instruction for rehabilitation of existing buildings, Monograph No. 360, Office of Deputy for Technical Affairs, MPO

30. Federal Emergency Management Agency (FEMA), (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA 356, prepared by the American Society of Civil Engineers for FEMA, Washington

31. Iran (2005b). National report of the Islamic Republic of Iran on disaster reduction, world conference on disaster reduction, Kobe, Japan. Available at: http://www.unisdr.org/eng/mdgs-drr/national-reports/Iranreport .pdf, Accessed 4 May 2008

32. Iran (2005a). National budget act of 1384, 2005. Available at: http://www.spac.ir/hoghoghi, Accessed 15

May 2008

33. Ghodrati Amiri, G., Jalalian, M. and Razavian Amrei, S.A. (2007). Derivation of Vulnerability Functions Based on Observational Data for Iran, Proceedings of the International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering, Paper No. 227, Shanghai, China, November 28-30.

34. Iran Ministry of the interior, Management and Planning organization of Iran (2005). Executive financial regulation of Article (10) related to government resource towards natural and unexpected events, No. 32855 of 5649, Date: 03/01/1384, article 10, Article 1 , Note 1.