اختصاص منابع اقتصادی جهت کاهش ریسک لرزه‌ای منطقه‌ای با استفاده از مدل بهینه‌سازی تصادفی و یقینی

مطالعه‌ی موردی: شهر تهران

الناز پیغاله *- دانشجوی دکتری، دانشکده‌ی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرطوسی، epeyghaleh@dena.kntu.ac.ir
محمدرضا ذوالفقاری - دانشیار، دانشکده‌ی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرطوسی

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. بنابراین یک مدل برنامه‌ریزی بهینه‌سازی تصادفی (احتمالی) دو مرحله‌ای توسعه داده شده است تا منابع اقتصادی اختصاص یافته به راهکارهای کاهش ریسک لرزه‌ای (مقاوم‌سازی) و بازسازی پس از زلزله‌های احتمالی آینده را در سطح منطقه‌ای بهینه سازد. این مدل پیشنهادی راهبردهای 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. برای نشان دادن قابلیت کاربردی مدل پیشنهادی، نواحی ساختمانی شهر تهران مورد تحلیل قرار گرفته است. بنابراین داده‌های ساختمانی ناحیه‌ی مورد مطالعه، به همراه توابع آسیب‌پذیری این ساختمان‌ها و ویژگی‌های خطر لرزه‌ای منطقه‌ای برای ارزیابی احتمالی ریسک منطقه‌ی مورد مطالعه به کار گرفته شده‌اند. نتایج تحلیل مدل پیشنهادی به صورت تغییرات هزینه‌های مقاوم‌سازی با موقعیت جغرافیایی و بر حسب نوع سازه و سطح طراحی لرزه‌ای ارائه شده است. برای بررسی مدل پیشنهادی از دیدگاه در نظر گرفتن عدم قطعیت وقوع زلزله‌ها و همچنین نشان دادن برتری‌های مدل برنامه‌ریزی تصادفی نسبت به مدل‌های بهینه‌سازی یقینی، مدل یقینی متناظر با مدل تصادفی پیشنهادی، ارائه و تحلیل‌هایی نیز بر مبنای این مدل انجام شده است. در پایان نتایج این تحلیل‌ها با نتایج تحلیل مدل تصادفی مورد مقایسه قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: *بهینه‌سازی، کاهش ریسک لرزه‌ای، اختصاص منابع، آسیب‌پذیری لرزه‌ای، تهران.*

Resource allocation for regional earthquake risk mitigation considering equtty, using two stage stochastic and deterministic programming

Case study: Tehran

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. In order to present the functionality of the proposed stochastic method, the approach is applied for a pilot area in Tehran. Therefore building stocks for the pilot area besides structural vulnerability functions for them as well as regional seismic hazard characteristics are modeled to compile a probabilistic seismic risk model for the pilot region. Results illustrate the variation of mitigation expenditures in particular, structural retrofitting expenditures by location and structural type for buildings in this region. In addition, in order to investigate the consideration of uncertainty related to the probable earthquakes and demonstrate the advantages of stochastic programming compared to deterministic programming, a deterministic programming and such approach are discussed here and some pilot studies are designed and performed. The results of these studies are compared with the pilot analyses done based on proposed stochastic programming.

Keywords: *Optimization, Seismic Risk Mitigation, Resource Allocation, Seismic Vulnerability, Tehran.*

1 PhD student, Faculty of Civil, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran. email: epeyghaleh@dena.kntu.ac.ir
2 Assoc. Prof., Faculty of Civil, Khajeh Nasir Toosi University od Technology, Tehran, Iran.

مقدمه

بلایای طبیعی موجب به تعویق افتادن توسعه در کشورهای در حال رشد می‌شود. این امر علت‌های گوناگونی دارد که کمبود آگاهی عمومی، مشکلات اقتصادی، توسعه‌ی سریع و بدون برنامه، مهاجرت از روستا به نواحی شهری و سایر عوامل اجتماعی - اقتصادی از آن جمله است. بنابراین برای توسعه‌ی پایدار در کشورهای در حال توسعه‌ی در معرض بلایای طبیعی، باید به برنامه‌ریزی‌های پیشگیری و کاهش ریسک بلایای طبیعی توجه بیشتری معطوف گردد.

ایران از جمله کشورهای در حال توسعه با تاریخی طولانی از زلزله‌های مخرب است. زلزله‌های بسیار بزرگی در ایران رخ داده که منجر به از دست رفتن جان انسان‌ها به طور گسترده و خرابی‌های شدید و خسارات وسیع اقتصادی گردیده است. همانند سایر کشورها در ایران نیز درس‌هایی که از زلزله‌های مخرب گرفته شده است بیشترین قوه‌ی محرکه برای اجرای طرح‌های پیشگیری، کاهش ریسک و افزایش آمادگی بوده است. زلزله‌ی منجیل در سال ۱۹۹۰ در شمال ایران و پیامدهای سنگین اقتصادی- اجتماعی آن نقطه‌ی آغازی برای اجرای برنامه‌های کاهش ریسک لرزه‌ای و اقدامات و فعالیت‌های پیشگیرانه در ایران شد [۱]. این امر منجر به تشکیل کمیته‌ی ملی کاهش بلایای طبیعی[۱] و تصویب آیین‌نامه‌ی زلزله‌ی ساختمان‌های ایران با نام استاندارد ۲۸۰۰ [۲] به منزله‌ی استاندارد اجباری در شرکت‌ها و مؤسسات ساختمانی در سطح ملی گردید. به علاوه، تلاش‌های صورت گرفته پس از زلزله‌ی منجیل منجر به ایجاد «برنامه‌ی پیشگیری زلزله»[۲] و اجرای اقداماتی برای تقویت دانش علمی و آگاهی عمومی نسبت به مسئله‌ی پیشگیری و کاهش ریسک زلزله و برنامه‌هایی برای اقدامات پس از زلزله گردید. با وجود تمامی این اقدامات و فعالیت‌ها، وقوع زلزله‌های پس از زلزله‌ی منجیل مانند زلزله‌ی بم در سال ۲۰۰۳ نشان داد که هنوز راهی بسیار طولانی در اجرای کامل راهکارهای مدیریت ریسک لرزه‌ای پیش از زلزله و مدیریت بحران زلزله پس از وقوع آن وجود دارد. کمبود آگاهی عمومی، کمبود مشارکت مردمی، اجرای ناتمام اقدامات افزایش آمادگی، تراکم جمعیتی بالا در نواحی آسیب‌پذیر و توسعه‌ی سریع، دلایلی هستند که در پیامدهای مخرب ناشی از زلزله‌ها مشارکت دارند. زلزله‌ی بم نقطه‌ی عطف دیگری در امر مدیریت ریسک و بحران لرزه‌ای گردید. خسارات وارده پس از این زلزله و عملیات پاسخگویی و بازسازی نشان داد که فرایند پیشگیری و کاهش ریسک بسیار پیچیده است و تحت تأثیر عوامل متعددی است. این زلزله حتی موجب شد که دولت ایران بحث انتقال پایتخت از تهران را مورد توجه و بررسی قرار دهد. همچنین اصلاح ساختار مدیریت ریسک را در ایران، به‌ویژه با همکاری سازمان‌های بین‌المللی مانند Hyogo Frame work (HFA) و UNDAF، در پی داشت و برنامه‌ی «راهبرد کاهش ریسک زلزله‌ی ایران» (IERRS)[۳] نیز در سطح ملی به اجرا درآمد [۱]. همچنین از آن زمان تاکنون طرح‌های کاهش ریسک سازه‌ای و غیر سازه‌ای زیادی به اجرا درآمده و به علاوه برنامه‌ها و مطالعات گسترده‌ای در سطح منطقه‌ای و ملی برای پیشگیری و مدیریت بحران انجام شده است [۳، ۴، ۵، ۶]. به رغم تمامی این تلاش‌ها همچنان ضعف‌های فراوانی وجود دارد که کارآمدی اقدامات پیشگیرانه و کاهش ریسک در ایران را به عقب می‌اندازد.

- محدودیت منابع اقتصادی برای مقاوم‌سازی و بازسازی ساختمان‌های مسکونی آسیب‌پذیر که اتفاقاً بیشتر مرگ و میر ناشی از زلزله نیز در این ساختمان‌ها رخ می‌دهد.
- نبود پیوستگی میان اقدامات مدیریت ریسک در سطوح مختلف ملی و منطقه‌ای.
- فقدان یک نظام بیمه‌ای مناسب که محرک و سرمایه‌گذار برای اجرای برنامه‌های پیشگیرانه و کاهش ریسک باشد.
- نبود یک برنامه‌ی بهینه‌سازی برای اختصاص منابع اقتصادی به اقدامات و راهکارهای کاهش ریسک؛ برای مثال این ضعف در گزارش «ارزیابی مدیریت بلایا در سطح محلی و پیشنهاد اقدامات عملی، مطالعات و ارزیابی قوانین و مقررات و ساختار مدیریت بلایا در ایران» مورد تأکید قرار گرفته است. در این گزارش تحلیل‌های سود - هزینه برای هر یک از طرح‌های کاهش ریسک پیشنهاد شده است و نیاز جدی به انجام دادن آن یادآوری شده است [۶].
- توجه بیشتر به مدیریت پس از وقوع بلایا در مقایسه با اقدامات پیشگیرانه و ارتقای سطح آمادگی به‌ویژه با توجه به شرایط اقتصادی و محدودیت بودجه.
- توجه کم به اولویت‌بندی مناسب برنامه‌های کاهش ریسک لرزه‌ای.

بنابراین در این پژوهش سعی شده تا به برخی از نیازها درباره‌ی تعیین اولویت‌های مناسب در اجرای راهکارهای کاهش ریسک و بهینه‌سازی اختصاص بودجه به این راهکارها پاسخ داده شود. به همین منظور یک مدل بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای[۴] برای اختصاص منابع اقتصادی و اقدامات کاهش ریسک لرزه‌ای پیشنهاد گردید که در آن اثر معیارهایی نظیر تأثیرگذاری و سودمندی (کارآیی) در نظر گرفته شده است. این مدل سبب ایجاد بینش کلی در مدیر ریسک نسبت به پیچیدگی‌های موجود در برنامه‌ریزی، گزینش و اولویت‌بندی راهبردهای کاهش ریسک منطقه‌ای خواهد شد. همچنین برای نشان دادن کاربرد مدل پیشنهاد شده، یک مطالعه‌ی موردی کامل برای محیط ساختمان‌های مسکونی شهر تهران انجام شده است. تحلیل و بررسی نتایج، کاربرد آن‌ها را در درک بهتر، هدایت طراحی‌ها و اولویت‌بندی راهبردها و راهکارهای مقاوم‌سازی بیشتر مشخص می‌کند. نتایج حاصل از مدل بهینه‌سازی می‌تواند جهت پاسخگویی به سؤالات زیر مورد استفاده قرار گیرد:

۱. کدام ساختمان‌ها و چگونه باید مقاوم‌سازی شوند؟
۲. چه مقدار باید برای مقاوم‌سازی در مدت زمان برنامه‌ریزی (سرمایه‌گذاری) هزینه شود؟
۳. با در نظر گرفتن هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی و اجرای راهکارهای مقاوم‌سازی پیشنهادی، هزینه‌های بازسازی در صورت وقوع هر یک از زلزله‌های سناریو چقدر است؟

همچنین با تحلیل و بررسی نتایج، علاوه بر یافتن پاسخ سؤالات بالا، مدیر ریسک می‌تواند از آثار پیچیده و متقابل الگوی جغرافیایی جنبش زمین که در اثر زلزله‌های مختلف ایجاد می‌شود، توزیع محیط ساختمانی و انواع گوناگون سازه‌ها، آسیب‌پذیری سازه‌ها، محدودیت بودجه و هزینه‌های مقاوم‌سازی و بازسازی درک مناسبی به دست آورد. در نهایت نیز برای نشان دادن برتری‌های مدل بهینه‌سازی تصادفی در مقایسه با روش‌های یقینی، مجموعه تحلیل‌هایی انجام شده است و نتایج این تحلیل‌ها با نتایج تحلیل مدل تصادفی مورد مقایسه قرار گرفته است.

مدل‌های بهینه‌سازی تصادفی و یقینی

پیشینه‌ی مدل بهینه‌سازی

روش‌های متعددی برای ارزیابی راهکارها و برنامه‌های مدیریت ریسک و ارزیابی اثرات 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. یکی از این مدل‌ها، مدل‌های بهینه‌سازی[5] هستند. مدل‌های بهینه‌سازی، مجموعه‌ی بزرگی از راهکارها و گزینه‌های مقاوم‌سازی را می‌توانند مورد مقایسه قرار دهند و تابع هدف خاصی را مانند سود بیشتر یا خسارت لرزه‌ای کمتر، با در نظر گرفتن محدودیت‌های مشخص، بیشینه یا کمینه کنند [۷، ۸]. 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. پروفسور شاه و همکاران [۹] برای اولین بار یک مدل برنامه‌ریزی صحیح را که دارای قیدهایی برای محدودیت بودجه است برای بیشینه کردن تحلیل‌های سود - هزینه‌ی طرح مقاوم‌سازی لرزه‌ای ارائه کردند. چهار روش 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. دودو و همکاران [۷] برای اولین بار مدل برنامه‌ریزی خطی را برای اختصاص منابع جهت کاهش ریسک لرزه‌ای منطقه‌ای تهیه کردند. این مدل بر پایه‌ی تصمیم‌گیری‌های کاهش ریسک از منظر منافع عمومی است و رابطه‌بندی این مدل دارای منطقی شبیه به روش‌شناسی‌های ارزیابی خسارت و ریسک منطقه‌ای است [۱۰]. مدل‌های دیگری نیز به دنبال مدل دودو و همکاران و بر پایه‌ی تصمیم‌گیری‌های کاهش ریسک از منظر منافع عمومی ارائه شده‌اند [۱۱، ۱۲، ۱۳، ۸، ۱۴]. همه‌ی این مدل‌ها بر تصمیم‌گیری‌های کاهش ریسک لرزه‌ای متمرکزند. به علاوه همه‌ی این مدل‌ها دارای منطقی شبیه به روش‌شناسی‌های 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. ژو و همکاران در پژوهشی دیگر [۱۳] مدل دودو و همکاران [۷] را به یک مدل بهینه‌سازی تصادفی ارتقا داده‌اند. این مدل می‌تواند تغییرات خسارات لرزه‌ای سالیانه و همچنین سود خالص حاصل از سرمایه‌گذاری‌های کاهش ریسک را به طور مشخص مدل کند. این کار اجازه می‌دهد تا تعادل و توازن بازگشت - ریسک[6] بین هدف اصلی کمینه کردن مجموع هزینه‌ی پیشگیری و کاهش ریسک و هزینه‌ی بازسازی مورد انتظار و هدف دومی که شانس وقوع یک خسارت بسیار بزرگ و غیر قابل قبول در هر زلزله است، صورت پذیرد. وزیری [۸] 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. تفاوت عمده‌ی این مدل با مدل‌های قبلی مربوط به توانایی آن در مورد توجه قرار دادن کشته‌های زیاد در کشورهای در حال توسعه مانند ایران است. بدین منظور این مدل شامل هدف دومی است که شانس وقوع تعداد کشته‌های بیش از حد را در اثر هر زلزله‌ای کاهش می‌دهد [۱۰] (علاوه بر اینکه متوسط میزان سالیانه‌ی کشته‌های همه‌ی زلزله‌ها را کاهش می‌دهد). معتمد و همکاران [۱۴] یک مدل خودکار بهینه‌سازی یقینی را بر مبنای سناریو برای شهر تهران ارائه کرده‌اند. مدل بهینه‌سازی آن‌ها هر دو نوع مخارج را، قبل و بعد از زلزله، شامل می‌شود. این مخارج عبارتند از هزینه‌ی مقاوم‌سازی ساختمان‌ها، ارتقای عملکرد تسهیلات حیاتی، مخارج فراهم کردن پناهگاه‌های اسکان موقت، جمع‌آوری آوارها، هزینه‌های بیمارستانی و ارزش پولی[7] جان‌های از دست رفته. علاوه بر روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌ای، سایر روش‌های پیشگیرانه‌ی غیرسازه‌ای مانند ارتقای ظرفیت نظام کمک‌رسانی پزشکی و درمان مجروحان برای کاهش تعداد تلفات نیز در این رابطه‌ی بهینه‌سازی وارد شده است.

مقایسه‌ی مدل ارائه شده با مدل‌های ارائه شده‌ی قبلی

مدلی که در این پژوهش ارائه شده است بر پایه‌ی مدل بهینه‌سازی و روش مدل‌سازی‌ای است که به وسیله‌ی ژو و همکاران [۱۳] پیشنهاد شده است. در واقع این مدل به گونه‌ای اصلاح 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 توسعه یافته‌ای 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.

مدل‌های یقینی که دودو و همکاران [۷] و سایر افراد ارائه کرده‌اند بر مبنای این فرض استوار است که در هر سال خسارتی کم (در نتیجه سود کم برای مقاوم‌سازی) رخ می‌دهد. حال آنکه در حقیقت گاه ممکن است در طول سال‌های متمادی هیچ خسارتی رخ ندهد و ناگهان در یک سال خسارت بسیار بزرگی واقع شود [۱۳]. بنابراین در مدل برنامه‌ریزی تصادفی ارائه شده در این پژوهش سعی شده که مدل‌های یقینی به گونه‌ای ارتقا داده شوند که با صراحت کامل و جداگانه تغییرات خسارت لرزه‌ای احتمالی و در نتیجه سود خالص سرمایه‌گذاری برای مقاوم‌سازی[۸] را مدل‌سازی کنند.

برنامه‌ریزی احتمالی که ژو و همکاران [۱۳] ارائه کرده‌اند شامل چند دوره‌ی متناوب سرمایه‌گذاری در یک دوره‌ی طولانی‌تر برنامه‌ریزی است. در هر یک از این دوره‌های زمانی کوچک، تنها یک زلزله از میان زلزله‌های مختلف احتمالی می‌تواند رخ دهد. آن‌ها برای آنکه مدل ارائه شده را از نظر محاسباتی مدیریت‌پذیر کنند، تعدادی فرض‌های ساده کننده در نظر گرفتند. در نتیجه مدل ارائه شده را به یک مدل بهینه‌سازی احتمالی دو مرحله‌ای تنها در یک دوره‌ی تناوب تبدیل می‌کنند. یکی از این فرض‌های ساده کننده که در مدل ارائه شده در این پژوهش نیز در نظر گرفته شده است عبارت است از اینکه همه‌ی ضرایب مربوط به هزینه‌ی مقاوم‌سازی و بازسازی بدون تغییر می‌مانند (با گذر زمان تغییر نمی‌کنند). در مدل ارائه شده در این پژوهش مفاهیم مدل ژو و همکاران [۱۳] مورد استفاده قرار گرفته است با این تفاوت که مدل بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای به جای یک دوره‌ی زمانی یک ساله برای کل دوره‌ی زمانی سرمایه‌گذاری ارائه شده است؛ در نتیجه از احتمال وقوع زلزله‌ها در کل دوره‌ی سرمایه‌گذاری یا برنامه‌ریزی به جای احتمال وقوع سالیانه‌ی زلزله‌ها که در مدل ژو [۱۳] و سایر مدل‌های قبلی مورد استفاده قرار گرفته است، استفاده می‌شود.

در مدل ارائه شده در این پژوهش بر خلاف مدل ژو و همکاران [۱۳] قیدی[۹] 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. 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.

مدل پیشنهادی در این پژوهش همچنین اجازه می‌دهد که ساختمان‌های آسیب‌دیده به هر نوع سازه با هر سطح طراحی بازسازی شوند. همچنین این مدل این امکان را به تصمیم‌گیرنده می‌دهد که در صورت تمایل محدودیت‌هایی را برای تصمیمات مقاوم‌سازی و بازسازی در نظر بگیرد. مدل پیشنهادی بر مبنای خسارات مستقیم اقتصادی ایجاد شده در اثر خرابی سازه‌ای ساختمان‌هاست. خسارات لرزه‌ای ناشی از وقوع سطوح خرابی در اثر زلزله‌های احتمالی مختلف در مدل در نظر گرفته شده است. همچنین در این مدل سیاست ارتقای سازه‌ای برای گروه‌های ساختمان‌ها 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 به 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 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. انتخاب این ریزنمایی به میزان داده‌های در دسترس، دقت لازم و تقاضای محاسبات بستگی دارد. در حقیقت ناحیه‌ی شهری یا زون آماری انتخاب شده باید به اندازه‌ای کوچک باشد که پارامتر خطر در تمام نقاط آن تقریباً یکنواخت باشد. از دیدگاه محاسباتی، تعریف متغیر تصمیم‌گیری به صورت یک متغیر پیوسته (m۲ مساحت زیربنا) به جای متغیر گسسته یا عدد صحیح (تعداد ساختمان‌ها)، روند بهینه‌سازی را ساده‌تر می‌کند و با توجه به کیفیت و کمیت داده‌های در دسترس مناسب‌تر است [۸].

در رابطه‌بندی پیشنهادی این پژوهش، به طور مشابه با مدل ژو و همکاران [۱۳] 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. برای این منظور، روشی که ژو و همکاران [۱۳] ارائه کرده‌اند مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل ریسک با مقدار E در رابطه‌ی ۱ تعریف شده که در واقع خسارت مورد انتظار بیش از آستانه‌ی خسارت مجاز است.

رابطه‌ی ۱:
$$E = \sum_{l} P^{l} \beta^{l}$$

در این رابطه P^{l} احتمال وقوع زلزله‌ی l و β^{l} هزینه‌ی بازسازی اضافی (بیش از حد) برای زلزله‌ی l است.

مدل بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای

از نظر محاسباتی مدل برنامه‌ریزی احتمالی دو مرحله‌ای و مدل برنامه‌ریزی خطی معادل[۱۰] 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 تصمیم‌گیری می‌شود. 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، بازسازی می‌گردد. همچنین فرض شده که پس از زلزله ساختمان آسیب‌دیده در یکی از سطوح خرابی (بدون خرابی، خرابی کم، خرابی متوسط و خرابی شدید) قرار می‌گیرد. مدل ارائه شده در انتها تصمیمات بهینه‌ی پیشنهادی برای مقاوم‌سازی و هزینه‌ی بازسازی هر یک از سناریوهای زلزله را ارائه می‌دهد.

در ادامه قیدها و تابع هدف مدل برنامه‌ریزی احتمالی دو مرحله‌ای و رابطه‌بندی مربوط ارائه شده است. معادلات ۲ تا ۱۰ نمایانگر رابطه‌ی قیود است و معادله‌ی ۱۱ رابطه‌ی تابع هدف را نشان می‌دهد.

الف. مقاوم‌سازی

فرض می‌شود که X_{im}^{c} مساحت زیربنای ساختمان باشد که نوع سازه‌ی آن i و نوع رتبه‌ی (کاربری و ناحیه‌ی شهری) آن m است و برای سطح طراحی لرزه‌ای c طراحی شده است. اولین تصمیم کلیدی که باید گرفته شود این است که کدام ساختمان باید تقویت شود و این مقاوم‌سازی باید چگونه باشد (مقاوم‌سازی با طراحی لرزه‌ای بالاتر، یا تغییر نوع سازه). فرض می‌شود که $Z_{imc}^{i'c'}$ 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. در نتیجه فرض شده که مقاوم‌سازی با تغییر سطح طراحی لرزه‌ای و نوع سازه امکان‌پذیر است و مساحت اولیه‌ی ساختمان‌ها یا مقاوم‌سازی می‌شود (اگر c'>c یا i'≠i برقرار باشد) یا مقاوم‌سازی نمی‌شود (c'= c و i'=i برقرار باشد)، بنابراین تصمیم مقاوم‌سازی با قید زیر بیان می‌گردد:

رابطه‌ی ۲:
$$X_{im}^{c} = \sum_{i',c'} Z_{imc}^{i'c'} \qquad \forall i,m,c$$

ب. محدودیت‌های مقاوم‌سازی

برای مشخص کردن گزینه‌های مقاوم‌سازی مجاز قیود و محدودیت‌های مشخصی در مدل گنجانده شده است. رابطه‌ی ۳ بیانگر امکان نداشتن مقاوم‌سازی در سطوح پایین‌تر طراحی لرزه‌ای است (با این وجود امکان مقاوم‌سازی در همان سطح موجود وجود دارد که بیانگر صحت رابطه‌ی ۲ است). روابط ۴ و ۵ به ترتیب نشان می‌دهند که هیچ ساختمانی را نمی‌توان به نوع سازه‌ی i' که عضو مجموعه‌ی سازه‌های نامطلوب Ω_Z (سازه‌ی خشتی) هستند یا به سطح طراحی 'c که عضو مجموعه‌ی سطوح طراحی نامطلوب Ψ_Z هستند، مقاوم‌سازی کرد. همچنین فرض شده که ساختمان‌ها بر مبنای نوع سازه به N زیرمجموعه تقسیم شده‌اند[Θ_n , where n∈(۱,…,N)]. رابطه‌ی ۶ بیانگر این محدودیت است که تغییر نوع سازه‌ی ساختمان در روند کاهش ریسک و مقاوم‌سازی تنها در اعضای داخلی زیر مجموعه‌ها Θ_n امکان‌پذیر است.

رابطه‌ی ۳:
$$Z_{imc}^{i'c'} = 0 \qquad \forall i,m,i',c > c'$$

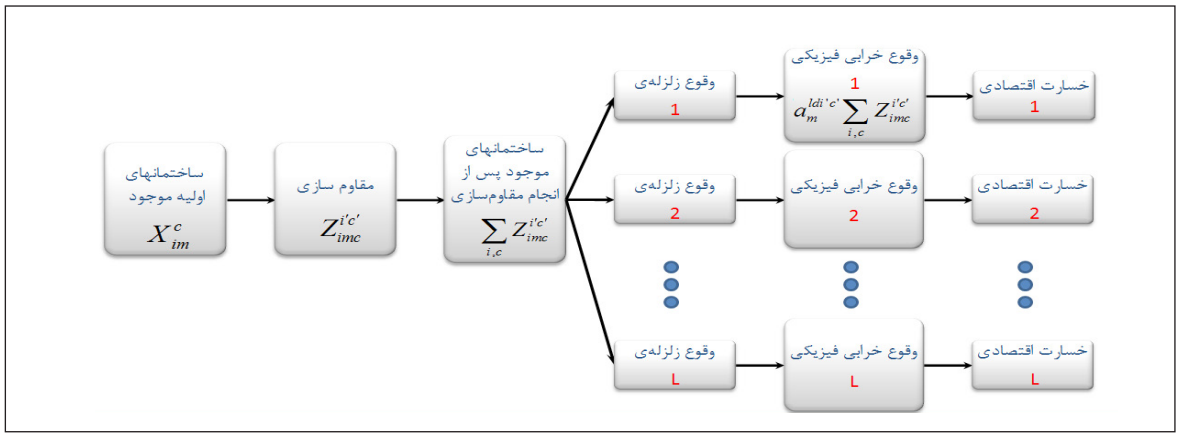
رابطه‌ی ۴:
$$Z_{imc}^{i'c'} = 0 \qquad \forall i,m,c,c',i' \in \Omega_Z$$

رابطه‌ی ۵:
$$Z_{imc}^{i'c'} = 0 \qquad \forall i,m,c,i',c' \in \Psi_Z$$

رابطه‌ی ۶:
$$Z_{imc}^{i'c'} = 0 \qquad \forall m,c,c',i \in \Theta_n, i' \notin \Theta_n$$

ج. بودجه‌ی مقاوم‌سازی

در این مدل مقداری به منزله‌ی بیشترین بودجه‌ی مقاوم‌سازی فرض شده که با G نمایش داده می‌شود. $F_{imc}^{i'c'}$ 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' است. فرض می‌شود که همه‌ی هزینه‌ها به صورت ارزش فعلی[۱۱] آن‌هاست. تصمیم در مورد اینکه چگونه بودجه‌ی موجود



تصویر۱: روند تحول تدریجی ساختمان‌های موجود در مدل بهینه‌سازی تصادفی (متغیر اصلی: مساحت زیربنای ساختمان)

باید به گزینه‌های مختلف مقاوم‌سازی اختصاص یابد با رابطه‌ی ۷ نشان داده می‌شود.

رابطه‌ی ۷:

$$\sum_{i,m,c,i',c'} F_{imc}^{i'c'} Z_{imc}^{i'c'} \le G$$

د. ریسک وقوع خسارت اقتصادی بزرگ

تمایل به مقابله کردن با سناریوهایی که منجر به ایجاد هزینه‌های بازسازی بزرگ و غیر قابل قبول در اثر وقوع هر یک از زلزله‌ها می‌شوند، با رابطه‌ی ۸ بیان شده است. مقدار B نشانگر خسارت یا هزینه‌ی بازسازی مجاز است. بنابراین در این رابطه مقدار β^l، که در واقع هزینه‌های بازسازی بیشتر از مقدار خسارت مجاز B در اثر وقوع هر یک از سناریوهای زلزله‌ی محتمل l است، محاسبه می‌شود. اولین جمله از چپ هزینه‌های بازسازی در صورت رخداد زلزله‌ی l با توجه به تصمیم مقاوم‌سازی اتخاذ شده در مرحله‌ی اول است. در این جمله، $R_m^{di'c'}$ مقدار هزینه‌ی بازسازی برای یک متر مربع ساختمان با نوع سازه‌ی i' از رتبه‌ی m در سطح طراحی لرزه‌ای c' است که دچار سطح آسیب d شده و به حالت اولیه بازسازی می‌شود. تمامی سازه‌هایی که از نظر لرزه‌ای نامطلوبند و تمامی سطوح طراحی که برای بازسازی قابل قبول نیستند در تعریف مقادیر $R_m^{di'c'}$ از جانب تصمیم‌گیرنده و کاربر اعمال شده و در نظر گرفته می‌شوند. $a_m^{li'c'}$ 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.

رابطه‌ی ۸: $\forall l$

$$\sum_{m,i',c',d} R_m^{di'c'} a_m^{ldi'c'} \sum_{i,c} Z_{imc}^{i'c'} - \beta^l \le B$$

ه. شرط لازم منفی نبودن[۱۲] متغیرها

قیود مربوط به نامنفی نگه داشتن متغیرها باید برای همه‌ی متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته شود که عبارتند از:

رابطه‌ی ۹: $\forall i,m,c,i',c'$

$$Z_{imc}^{i'c'} \ge 0$$

رابطه‌ی ۱۰: $\forall l$

$$\beta^l \ge 0$$

و. تابع هدف

تابع هدف به صورت کمینه کردن کل هزینه‌های مقاوم‌سازی (اولین جمله)، بازسازی (دومین جمله) و مقدار مورد انتظار خسارت بیش از سطح خسارت قابل قبول B است که با ضریب وزنی تعریف شونده‌ی کاربرκ مقیاس می‌گردد (جمله‌ی آخر).

رابطه‌ی ۱۱:

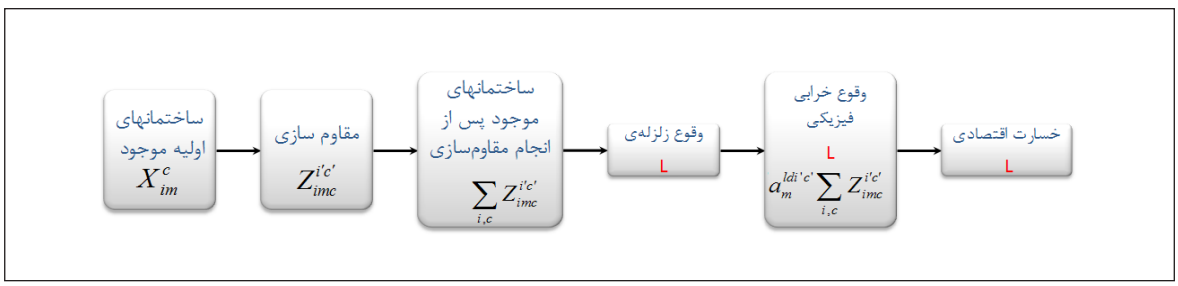
$$Min \sum_{i,m,c,i',c'} F_{imc}^{i'c'} Z_{imc}^{i'c'} + \sum_l P^l \sum_{m,i',c'} \sum_d R_m^{di'c'} a_m^{li'c'} \sum_{i,c} Z_{imc}^{i'c'} + \kappa \sum_l P^l \beta^l$$

این مدل در انتها پیشنهادهایی مبنی بر تصمیمات مقاوم‌سازی و نحوه‌ی اختصاص منابع به آن‌ها $Z_{imc}^{i'c'}$ و همچنین مخارج بازسازی مرتبط با وقوع هر یک از زلزله‌های سناریو $\sum_{m,i',c',d} R_m^{di'c'} a_m^{ldi'c'} \sum_{i,c} Z_{imc}^{i'c'}$ به منزله‌ی نتایج تحلیل ارائه می‌دهد. مقادیر خسارات بیشتر از آستانه‌ی خسارت مجاز $P^l \beta^l$ نیز از خروجی‌های مدل قابل دسترس خواهد بود.

جدول ۱ خلاصه‌ای از داده‌های ورودی و متغیرهای تصمیم‌گیری را که در رابطه‌بندی مورد استفاده قرار گرفته است نشان می‌دهد. تعریف مقادیر صحیح برای پارامترهایی که کاربر باید در مدل تعریف کند، دشوار است. برای حل این مشکل می‌توان از تحلیل حساسیت[۱۳] با تعریف مقادیر مختلفی برای این پارامترها استفاده کرد. این امر می‌تواند بینش مناسبی در مورد این مقادیر و نحوه‌ی اثرگذاری آن‌ها در کاربر یا مدیر ریسک ایجاد کند.

ارزیابی برتری بهینه‌سازی احتمالی در مقایسه با بهینه‌سازی یقینی

برای پایش مدل برنامه‌ریزی احتمالی و نشان دادن برتری‌ها و قابلیت‌های این مدل نسبت به مدل‌های برنامه‌ریزی یقینی، مدل یقینی در این بخش ارائه شده است. اگر از آینده اطلاعات دقیقی موجود بود، به گونه‌ای که معلوم بود دقیقاً چه زلزله‌ای رخ خواهد داد آنگاه مدل برنامه‌ریزی یقینی با اطمینان کامل قابل استفاده بود. حال آنکه در اینجا چنین اطلاعاتی وجود ندارد. با این حال در این پژوهش جهت مقایسه، یک مدل برنامه‌ریزی یقینی، متناسب با مدل تصادفی ارائه شده، طراحی شده است که در این بخش ارائه می‌گردد. از نظر محاسباتی این مدل به گونه‌ای رابطه‌بندی شده است که همانند مدل برنامه‌ریزی احتمالی ارائه شده، بیانگر شرایط تحول تدریجی ساختمان‌های موجود در منطقه باشد (تصویر ۲). همه‌ی متغیرهای ورودی و اطلاعات مرتبط با ساختمان‌ها و هزینه‌ها عیناً مشابه مدل احتمالی 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



تصویر ۲: روند تحول تدریجی ساختمان‌های موجود در مدل بهینه‌سازی یقینی، که متغیر اصلی در این مدل مساحت زیربنای ساختمان است.

مقاوم‌سازی بازسازی و ریسک هزینه‌ی بازسازی بیش از حد کمینه می‌گردد. همه‌ی فرضیه‌ها در مورد سطوح خرابی، نحوه‌ی بازسازی و مقاوم‌سازی عیناً مشابه مدل احتمالی است. مدل ارائه شده در انتها تصمیمات بهینه‌ی پیشنهادی برای مقاوم‌سازی و هزینه‌ی بازسازی مربوط به سناریوی زلزله‌ی مورد نظر را ارائه می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده گردید، به طور کلی مدل بهینه‌سازی اختصاص منابع جهت کاهش ریسک لرزه‌ای شامل یک تابع هدف و چندین معادله است که بیانگر قیود و محدودیت‌های مسئله هستند. قیود مدل بهینه‌سازی یقینی، به غیر از یک مورد، مشابه قیود مدل بهینه‌سازی تصادفی است. این قید مرتبط با ریسک وقوع خسارت اقتصادی بزرگ که در رابطه‌ی ۸ در مدل تصادفی ارائه شده با قید رابطه‌ی ۱۲ جایگزین می‌شود. در این رابطه مقدار β^l که در واقع هزینه‌های بازسازی بیشتر از مقدار خسارت مجاز در اثر وقوع سناریوی زلزله‌ی مشخص l است، محاسبه می‌شود. اولین جمله از چپ هزینه‌های بازسازی در اثر رخداد زلزله‌ی l با توجه به تصمیم مقاوم‌سازی گرفته شده در مرحله‌ی اول است.

رابطه‌ی ۱۲:

$$\sum_{m,i',c',d} R_m^{di'c'} a_m^{ll\,i'c'} \sum_{i,c} Z_{imc}^{i'c'} - \beta^l \le B$$

تابع هدف (رابطه‌ی ۱۳) به صورت کمینه کردن کل هزینه‌های مقاوم‌سازی (اولین جمله)، بازسازی (دومین جمله) و مقدار مورد انتظار خسارت بیش از سطح خسارت قابل قبول B است که با ضریب وزنی تعریف شونده از جانب کاربر κ مقیاس می‌گردد (جمله‌ی آخر).

رابطه‌ی ۱۳:

$$Min \sum_{i,m,c,i',c'} F_{imc}^{i'c'} Z_{imc}^{i'c'} + \sum_{m,i',c'} \sum_{d} R_m^{di'c'} a_m^{ld\,i'c'} \sum_{i,c} Z_{imc}^{i'c'} + \kappa\beta^l$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود در رابطه‌های پیشین، تفاوت با حذف احتمالات از مدل بهینه‌سازی تصادفی (احتمالی) حاصل شده است. برای مقایسه‌ی تصمیم‌گیری‌ها در حالات رخداد زلزله‌های گوناگون و همچنین مقایسه‌ی مقادیر تابع هدف و مقدار هزینه‌های کمینه شده در این حالات و حالتی که برنامه‌ریزی احتمالی انجام شده است، مقایسه‌های زیر در نظر گرفته شده است.

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. سپس فرض شده تا مثلاً زلزله‌ی دیگری (e) رخ خواهد داد و هزینه‌های پیش‌گفته از تحلیل بهینه‌سازی یقینی آن به دست آمده است، اما پیش‌بینی غلط بوده و زلزله‌ی l رخ داده است. در این حالت می‌توان مقدار یا ارزش پیش‌بینی صحیح[۱۴] را از تفاضل هزینه‌ی کل (تابع هدف در حالت اول و هزینه‌ی کل محاسبه شده با تخمین خسارت) به ترتیب زیر به دست آورد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تابع هدف در حالت دوم گویای هزینه‌های کل در شرایط رخ داده نیست، زیرا پیش‌بینی شده که زلزله‌ی e رخ می‌دهد اما زلزله‌ی l رخ داده است. در این حالت 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 ۱۴ و ۱۵ محاسبه می‌گردد. در رابطه‌ی ۱۴ مقدار β^l محاسبه می‌گردد و از رابطه‌ی ۱۵ هزینه‌های کل در حالی که زلزله‌ی l رخ داده محاسبه می‌گردد.

رابطه‌ی ۱۴:

$$\sum_{m,i',c',d} R_m^{di'c'} a_m^{Earthquake:l\;ll\,i'c'} \sum_{i,c} Z_{imc}^{i'c'} - \beta^l \le B$$

رابطه‌ی ۱۵:

$$Total\ Loss = \sum_{i,m,c,i',c'}^{Earthquake} F_{imc}^{i'c'} Z_{imc}^{:e\;i'c'} + \sum_{m,i',c'} \sum_{d} R_m^{Earthquake\;di'c'} a_m^{:l\;ld\,i'c'} \sum_{i,c} Z_{imc}^{i'c'} + \kappa\beta^l$$

مطالعه‌ی موردی

برای تحلیل مدل بهینه‌سازی احتمالی دو مرحله‌ای، مدل بهینه‌سازی خطی معادل آن طراحی شده و پس از برنامه‌نویسی در نرم‌افزار IBM ILOG CPLEX Optimization Studio با کمک نرم‌افزار CPLEX [۱۵] 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 می‌شود و بنابراین روش حل در نرم‌افزار CPLEX را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در کل زمان تحلیل بین ۲ دقیقه در برخی حالات تا ۹۶ ساعت متغیر است.

همان‌طور که گفته شد محیط ساختمانی تهران، پایتخت سیاسی و اقتصادی ایران، برای تحلیل موردی مورد استفاده قرار گرفت. تهران بزرگ در نواحی کوهپایه‌ای رشته کوه البرز، که بخشی از ناحیه‌ی کوهزای آلپ - هیمالیا است، واقع شده است. این ناحیه با داشتن گسل‌های فعال ویژه یکی از نواحی بسیار لرزه‌خیز در دنیاست. ناحیه‌ی شهری تهران بر روی لایه‌های آبرفتی توسعه یافته است. این لایه‌های آبرفتی بر صخره‌های سختی قرار گرفته‌اند که خود طی فرایندهای پیچیده‌ی زمین‌شناسی تشکیل شده است. بر اساس داده‌های لرزه‌ای تاریخی، تهران زلزله‌های قوی متعددی با دوره‌ی بازگشت ۱۵۰ سال را تجربه کرده است [۳]. شهر منجیل که در فاصله‌ی ۲۰۰ کیلومتری در غرب تهران قرار گرفته است در سال ۱۹۹۰ زلزله‌ی بزرگی را تجربه کرد که منجر به کشته شدن ۱۴۰۰۰ انسان گردید [۳]. لرزه‌شناسان بر این باورند که در آینده‌ای نزدیک زلزله‌ای بزرگ در تهران به وقوع خواهد پیوست چرا که این شهر از سال ۱۸۳۰ تاکنون زلزله‌ی مخربی را تجربه نکرده است [۳].

از طرف دیگر ناحیه‌ی شهری تهران به سرعت در حال رشد است

و جمعیت تهران در دهه‌های گذشته به صورت انفجاری افزایش یافته است و از ۱ میلیون نفر در سال ۱۹۵۰ به ۷ میلیون نفر در سال ۲۰۰۰ و بیش از ۱۲ میلیون نفر در سال ۲۰۱۲ رسیده است. با وجود طرح‌های بسیار در امر مدیریت بلایای طبیعی مانند زلزله در تهران، توسعه‌ی شهری تهران و رشد سریع جمعیت بدون توسعه‌ی مناسب نظام‌های پیشگیری و آمادگی در برابر زلزله‌های محتمل آینده اتفاق افتاده است. طرح‌های انجام شده شامل مقاوم‌سازی ساختمان‌های راهبردی، زیرساخت‌ها و سازه‌های صنعتی، برنامه‌ی جامع برای توسعه و سامان دادن به شبکه‌ی امداد و نجات و توسعه‌ی ایمنی و نظام‌های خود امدادی، اجرای سیاست‌هایی برای گسترش بیمه‌ی لرزه‌ای ساختمان‌های مسکونی، تجاری و صنعتی است. با وجود اجرای چنین طرح‌هایی همچنان به یک برنامه‌ریزی جامع برای پیشگیری، مدیریت و کاهش ریسک لرزه‌ای منطقه‌ای- شهری نیاز است تا از خرابی‌های لرزه‌ای محتمل در آینده با توجه به محدودیت‌های اقتصادی موجود پیشگیری کند.

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 آن، مدل از منظر محاسباتی قابل مدیریت خواهد شد. بدیهی است که در واقعیت در ناحیه‌ای مانند محیط ساختمانی شهر تهران این امکان وجود دارد 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 [۱۶]. 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[۱۵] 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 ورودی برای مطالعه‌ی موردی

در جدول ۱ متغیرهای نمایانگر داده‌های ورودی مختلف استفاده شده در مدل بهینه‌سازی احتمالی دو مرحله‌ای و همچنین تعاریف آن‌ها ارائه شده است. جدول ۱ همچنین منابعی که این داده‌ها از آن‌ها استخراج شده است را مشخص می‌کند. در ادامه روش‌های تهیه‌ی داده‌های ورودی و متغیرهای ورودی متناظر با آن برای مطالعه‌ی موردی شهر تهران ارائه شده است.

داده‌های ساختمانی اولیه‌ی موجود

در این مطالعه داده‌های ساختمانی مرتبط با ساختمان‌های مسکونی شهر تهران با واحد حوزه‌های آماری[۱۶] مورد استفاده قرار گرفته است. تهران به ۳۱۷۳ حوزه‌ی آماری، ۱۱۴ ناحیه[۱۷] و ۲۲ منطقه[۱۸] 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 [۳]. با این حال برای تحلیل در این پژوهش ساختمان‌ها از منظر نوع سازه به ۱۳ گروه سازه‌ای تقسیم شده‌اند. بنابراین جدول ۲ برای تطابق انواع سازه‌های تعریف شده در این پژوهش با سازه‌های تعریف شده در پایگاه داده‌ی جایکا [۳] و انواع سازه‌های تعریف شده در پایگاه داده‌ی برنامه‌ی HAZUS [۱۷] 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 جهت تهیه‌ی سایر داده‌های ورودی مورد نیاز در مدل بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در این پژوهش برای انتخاب زلزله‌های سناریو و مدل‌سازی لرزه‌خیزی منطقه ابتدا یک فهرست زلزله‌ی مصنوعی تولید شده مورد استفاده قرار گرفته است. این فهرست به روش مونت کارلو[۱۹] شبیه‌سازی شده و مدت زمان آن ۱۰،۰۰۰ سال و شامل ۸۴،۰۰۰ زلزله با دامنه‌ی بزرگی از ۴/۶ تا ۷/۵۵ است که در شعاع ۲۰۰ کیلومتری از تهران قرار گرفته‌اند (تصویر ۳) [۱۸]. برای کاهش تعداد زلزله‌های این فهرست، در گام اول زلزله‌هایی که در

جدول ۱: داده‌های ورودی مورد نیاز مدل، تعاریف آن‌ها و محل و نحوه‌ی تهیه‌ی آن‌ها برای مطالعه‌ی موردی

منابع	توضیحات	متغیرهای ورودی
تعریف کاربر	اندیس سطح طراحی لرزه‌ای	c
تعریف کاربر	اندیس نوع سازه	i
[۳]	اندیس کلاس ساختمان کاربری j و ناحیه‌ی آماری k	m
تعریف کاربر	اندیس سطح خرابی ساختمان	d
تعریف کاربر	اندیس شماره‌ی زلزله در کاتالوگ زلزله‌ها	l
محاسبه شده بر مبنای منحنی‌های شکنندگی [۳، ۱۷]	نسبتی از ساختمان‌ها با نوع سازه‌ی i'، کلاس m و در سطح طراحی c' است که اگر زلزله‌ی l رخ دهد در سطح آسیب d قرار می‌گیرد.	$a_m^{ldi'c'}$
تعریف کاربر بر مبنای داده‌های آماری ایران از مرکز آمار ایران	سطح خسارت (هزینه‌ی بازسازی) قابل قبول	B
تعریف کاربر	ضریب وزنی پرهیز از ریسک خسارت اقتصادی بسیار بزرگ در تابع هدف	κ
تعریف کاربر بر مبنای داده‌های آماری ایران و [۹]	واحد هزینه‌های مقاوم‌سازی یک متر مربع ساختمان با نوع سازه‌ی i از کلاس m در سطح طراحی لرزه‌ای c به ساختمانی با نوع سازه‌ی i' سطح طراحی لرزه‌ای c'.	$F_{imc}^{i'c'}$
تعریف کاربر بر مبنای داده‌های آماری ایران از مرکز آمار ایران	بودجه‌ی کاهش ریسک یا مقاوم‌سازی	G
تحلیل خطر	احتمال وقوع زلزله‌ی l در طول دوره‌ی سرمایه‌گذاری (برنامه‌ریزی) ۲۰ ساله است.	Pl
تعریف کاربر بر مبنای داده‌های آماری ایران و [۹]	واحد هزینه‌ی بازسازی یک متر مربع ساختمان با نوع سازه‌ی i' از کلاس 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 یا سطوح طراحی لرزه‌ای قابل قبول برای بازسازی در نظر گرفته شود، این امر در این ضرایب $R_m^{di'c'}$ اعمال می‌گردد.	$R_m^{di'c'}$
[۳]	مساحت زیربنای ساختمان که نوع سازه‌ی آن i و نوع کلاس (کاربری و ناحیه‌ی آماری- سطحی) آن m بوده و برای سطح طراحی لرزه‌ای c طراحی شده است.	X_{im}^c
تعریف کاربر	انواع سازه‌هایی که برای مقاوم‌سازی قابل قبول نیست.	Ω_Z
تعریف کاربر	مجموعه‌ی سطوح طراحی لرزه‌ای که برای مقاوم‌سازی قابل قبول نیست.	Ψ_Z
تعریف کاربر	زیرمجموعه‌های انواع سازه‌هایی که در یک گروه قرار می‌گیرند. (مثلاً ساختمان‌های بلند، کوتاه یا میان‌مرتبه)	Θ_n

کل ناحیه‌های شهر تهران (۱۱۴ ناحیه) شتابی کمتر از آستانه‌ی g ۰/۰۱ ایجاد می‌کردند از این فهرست زلزله حذف شدند. با حذف این زلزله‌ها فهرستی شامل مجموعه‌ی کوچک‌تری از زلزله‌ها به دست آمد که شامل ۱۱،۶۶۰ زلزله است (تصویر ۳).

برای کاهش تعداد زلزله‌های سناریو، به گونه‌ای که علاوه بر نمایندگی خطر لرزه‌ای منطقه قابل مدیریت و کاربرد در مدل بهینه‌سازی احتمالی دو مرحله‌ای باشد، روش سناریوهای احتمالی سازگار با خطر بهینه شده (OPS)[۲۰] مورد استفاده قرار گرفته و فهرستی شامل ۶۲ زلزله با دامنه‌ی بزرگی ۴/۶ تا ۶/۷۵ ریشتر به همراه احتمالات آن‌ها تهیه شد که توزیع جغرافیایی این زلزله‌ها در همسایگی تهران در تصویر ۳ نشان داده شده است. با استفاده از هر یک از این فهرست‌ها منحنی‌های خطر لرزه‌ای برای کل منطقه به دست آمده است. در این مطالعه‌ی موردی، مدت زمان برنامه‌ریزی (سرمایه‌گذاری) برابر ۲۰ سال فرض شده است. از آنجا که در مدل خطر، برای زلزله‌های انتخاب شده، احتمالات سالیانه‌ی وقوع آن‌ها محاسبه شده است، باید احتمال وقوع این زلزله‌ها در ۲۰ سال نیز با انجام فرضیاتی محاسبه گردد. بنابراین، توزیع پواسون[۲۱] برای محاسبه‌ی احتمال ۲۰ ساله‌ی وقوع هر یک از زلزله‌های انتخاب شده مورد استفاده قرار گرفته است.

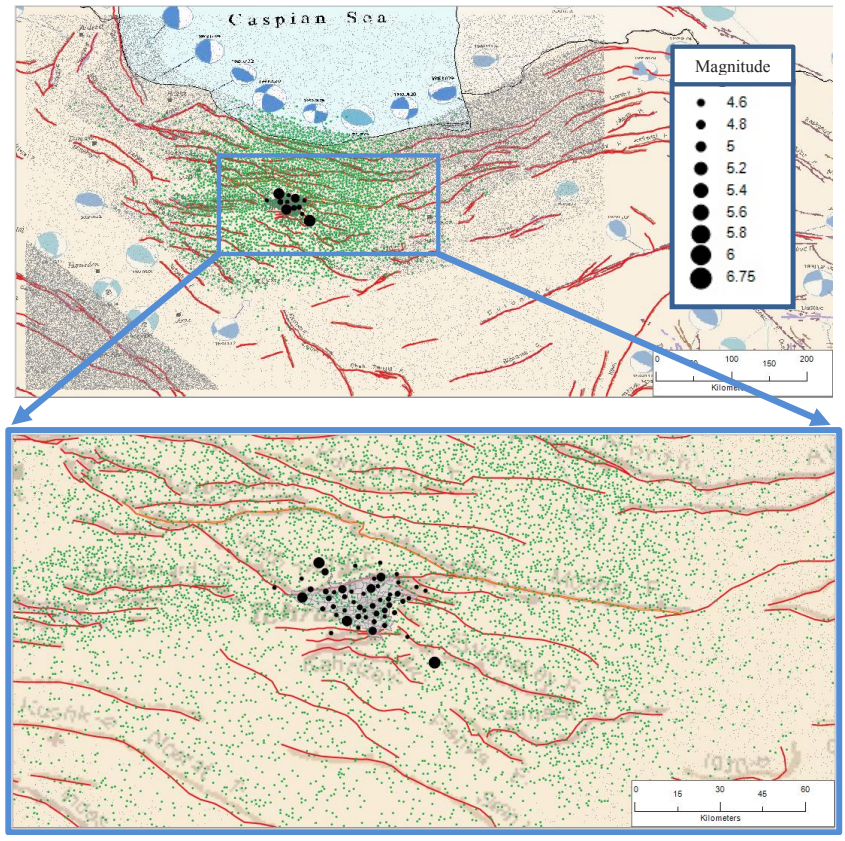
محاسبه‌ی خسارات ناشی از زلزله

یکی از داده‌های ورودی مدل بهینه‌سازی که باید از قبل تهیه شود مقادیر 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

جدول ۲: انواع گونه‌های سازه و واحد هزینه‌ی مقاوم‌سازی (Unit Mitigation Cost: UMC) و واحد هزینه‌ی بازسازی: Unit Reconstruction Cost: URC) به دلار

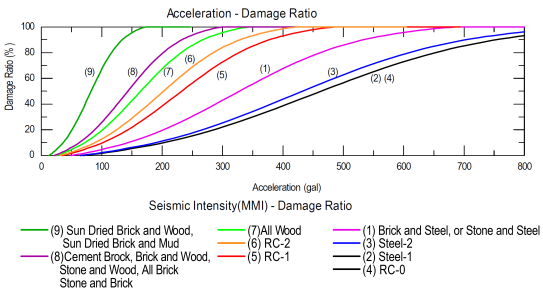
نوع سازه	نام‌گذاری سازه در JICA برای منحنی‌های شکنندگی خرابی شدید	نام‌گذاری سازه در HAZUS برای منحنی‌های شکنندگی ناچیز و متوسط	گروه سازه‌ای	[۱۱] UMC ($)		[۱۱] URC ($) برای سطح خرابی ناچیز			[۱۱] URC ($) برای سطح خرابی متوسط			[۱۱] URC ($) برای سطح خرابی شدید		
				مقاوم‌سازی به سطح ۱	مقاوم‌سازی به سطح ۲	مقاوم‌سازی نشده	مقاوم‌سازی به سطح ۱	مقاوم‌سازی به سطح ۲	مقاوم‌سازی نشده	مقاوم‌سازی به سطح ۱	مقاوم‌سازی به سطح ۲	مقاوم‌سازی نشده	مقاوم‌سازی به سطح ۱	مقاوم‌سازی به سطح ۲
اسکلت فلزی کوتاه مرتبه	SLR	BT-2	میانگین دو منحنی S1L و S2L از نوع (pre-code)	کوتاه	۶۷	۱۳۳	۸۳	۱۵۰	۲۱۶	۱۶۶	۲۳۳	۲۹۹	۳۳۲	۳۳۲	۳۸۶
اسکلت فلزی میان مرتبه	SMR	BT-3	میانگین دو منحنی S1M و S2M از نوع (pre-code)	متوسط	۶۱	۱۲۲	۸۳	۱۴۴	۲۰۵	۱۶۶	۲۲۷	۲۸۸	۳۳۲	۳۳۲	۳۸۶
اسکلت فلزی بلند مرتبه	SHR	BT-3	میانگین دو منحنی S1H و S2H از نوع (pre-code)	بلند	۶۱	۱۲۲	۸۳	۱۴۴	۲۰۵	۱۶۶	۲۲۷	۲۸۸	۳۳۲	۳۳۲	۳۸۶
اسکلت بتنی کوتاه مرتبه	CLR	BT5	میانگین دو منحنی C1L و C2L از نوع (pre-code)	کوتاه	۶۱	۱۲۲	۸۳	۱۴۴	۲۰۵	۱۶۶	۲۲۷	۲۸۸	۳۳۲	۳۳۲	۳۸۶
اسکلت بتنی میان مرتبه	CMR	BT6	میانگین دو منحنی C1M و C2M از نوع (pre-code)	متوسط	۶۱	۱۲۲	۸۳	۱۴۴	۲۰۵	۱۶۶	۲۲۷	۲۸۸	۳۳۲	۳۳۲	۳۸۶
اسکلت بتنی بلند مرتبه	CHR	BT4	میانگین دو منحنی C1H و C2H از نوع (pre-code)	بلند	۶۱	۱۲۲	۸۳	۱۴۴	۲۰۵	۱۶۶	۲۲۷	۲۸۸	۳۳۲	۳۳۲	۳۸۶
نیمه اسکلت کوتاه مرتبه	HLR	BT1	میانگین دو منحنی C3L و S5L از نوع (pre-code)	کوتاه	۳۹	۷۸	۴۲	۸۱	۱۲۰	۸۳	۱۲۲	۱۶۱	–	–	–
نیمه اسکلت میان مرتبه	HMR	BT1	میانگین دو منحنی C3M و S5M از نوع (pre-code)	متوسط	۳۹	۷۸	۴۲	۸۱	۱۲۰	۸۳	۱۲۲	۱۶۱	–	–	–
نیمه اسکلت بلند مرتبه	HHR	BT1	میانگین دو منحنی C3M و S5M از نوع (pre-code)	بلند	۳۹	۷۸	۴۲	۸۱	۱۲۰	۸۳	۱۲۲	۱۶۱	–	–	–
مصالح بنایی کوتاه مرتبه	MLR	BT8	URMM (pre-code)	کوتاه	–	–	۴۲	–	–	۸۳	–	–	–	–	–
مصالح بنایی میان مرتبه	MMR	BT8	URMM (pre-code)	متوسط	–	–	۴۲	–	–	۸۳	–	–	–	–	–
ساختمان جنوبی	W	BT7	W2 (pre-code)	کوتاه	–	–	۴۲	–	–	۸۳	–	–	–	–	–
ساختمان خشتی	SDB	BT9	برای سطح آسیب ناچیز از منحنی ارائه شده در [۱۹] و برای سطح آسیب متوسط از میانگین منحنی‌های سطح آسیب کم و شدید استفاده می‌شود.	کوتاه	–	–	۴۲	–	–	۸۳	–	–	–	–	–

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 [۲۰، ۲۱، ۲۲] 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 ۲) و سه سطح خرابی: ۱. ناچیز، ۲. متوسط و ۳. شدید و فروریزش کامل در



تصویر ۳: توزیع جغرافیایی فهرست زلزله‌ها و گسل‌های لرزه‌زا در اطراف تهران شامل فهرست ۱۰،۰۰۰ ساله‌ی زلزله‌های شبیه‌سازی شده با روش مونت کارلو دربرگیرنده‌ی ۸۴،۰۰۰ زلزله با دامنه‌ی بزرگی از ۴/۶ تا ۷/۵۵ (نقاط سیاه با کوچک‌ترین اندازه) [۱۸]، فهرست کاهش یافته شامل ۱۱،۶۰۰ زلزله (نقاط سبز) و فهرست زلزله‌های کاهش یافته بیانگر سناریوی زلزله‌های محتمل سازگار با خطر بهینه شده با تعداد ۶۲ زلزله با دامنه‌ی بزرگی ۴/۶ تا ۶/۷۵ (دایره‌های سیاه‌رنگ کوچک تا بزرگ)

مدل در نظر گرفته شده است. همچنین از منحنی‌های شکنندگی که جایکا و HAZUS ارائه داده‌اند در این مدل بهره گرفته شده است [۳، ۱۷]. برای منحنی‌های شکنندگی سطوح خرابی شدید و فروریزش از منحنی‌های جایکا [۳] و برای دو سطح آسیب دیگر از منحنی‌های شکنندگی HAZUS [۱۷] استفاده شده است. منحنی‌های شکنندگی انواع سازه‌های شهر تهران، که جایکا برای سطح آسیب شدید و فروریخته ارائه داده است، در تصویر ۴ آمده است. برای هر نوع سازه سه سطح طراحی لرزه‌ای در نظر گرفته شده است: «مقاوم‌سازی نشده[۲۲]»، «مقاوم‌سازی شده‌ی سطح ۱[۲۳]» و «مقاوم‌سازی شده‌ی سطح ۲[۲۴]». بر مبنای قضاوت مهندسی و با توجه به پژوهش وزیری [۱۰] فرض شده که هدف مقاوم‌سازی سطح ۲ رسیدن به سطح عملکرد ایمنی جانی[۲۵] است. به طور مشابه برای مقاوم‌سازی سطح ۱ هدف رسیدن به سطح عملکرد جلوگیری از فروریزش[۲۶] است. این سطح عملکرد در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود در ایران تعریف شده است[۲۳] و این آیین‌نامه نیز برگرفته از آیین‌نامه‌ی FEMA 356 است[۲۴]. براساس 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

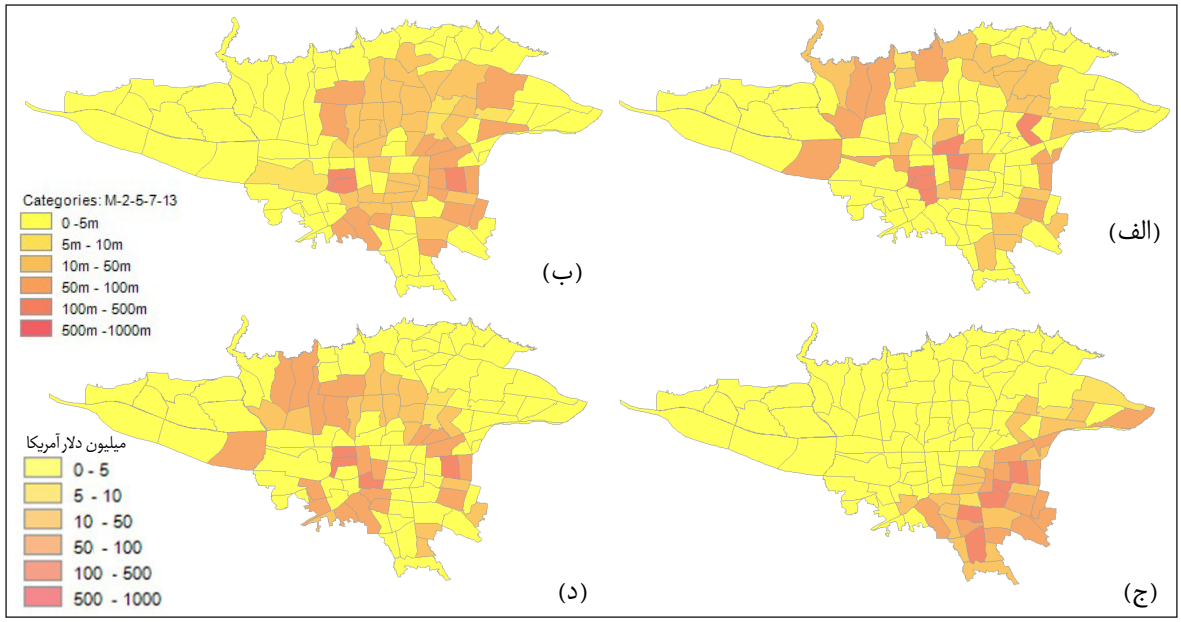


تصویر ۴: منحنی‌های شکنندگی انواع سازه‌های شهر تهران (میزان مشخصی از آسیب (احتمال) در برابر شتاب زلزله) [۳]

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 ۲). 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 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



تصویر۵: هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهاد شده برای محله‌های تهران؛ (الف) مدل تصادفی، (ب) زلزله‌ی ۴۶، (ج) زلزله‌ی ۶۲، (د) زلزله‌ی ۵۱ با فرض κ=۶

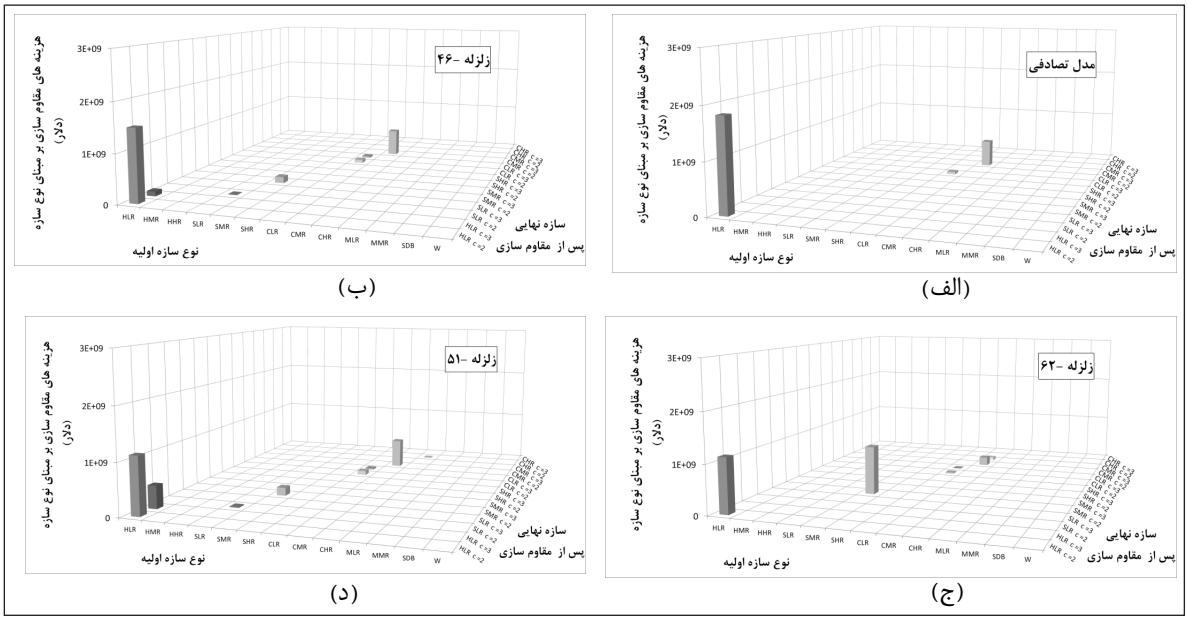
مقاوم‌سازی چنین ساختمان‌هایی، این سازه‌ها با ساختمان‌های جدید با سازه‌های مقاوم‌تر و در سطح طراحی لرزه‌ای مقاوم‌سازی شده جایگزین می‌شوند. در این پژوهش فرض شده که سازه‌ها بر مبنای ارتفاع به ۳ گروه مجزا تقسیم شوند که عبارتند از: کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه (جدول ۲). این بدان معناست که جایگزین 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 نیم‌اسکلت (HLR ,HMR ,HHR) 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 [۲۵]، 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[۲۷] ایران را به خود اختصاص می‌دهد، با در نظر گرفتن اینکه کل بودجه‌ی کشور در سال ۲۰۰۵ برابر ۱,۶۰۰ تریلیون ریال بوده است [۲۶] 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[۲۸] ذکر شده است، باید یک پنجم کل بودجه‌ی اختصاص داده شده به کاهش ریسک زلزله و بازسازی، به اقدامات کاهش ریسک اختصاص یابد [۲۷]. 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

نتایج تحلیل موردی انجام شده که در این بخش ارائه شده است، به سؤالات کلیدی راهبردهای کاهش ریسک پاسخ می‌دهد. انتخاب راهبرد کاهش ریسک (مقاوم‌سازی ساختمان یا بازسازی ساختمان به نوع دیگر سازه) به ترکیب عوامل بسیاری بستگی دارد: 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 مقاوم‌سازی‌ها ایجاد می‌شود و هزینه‌های اجرای هر یک از انواع روش‌های مقاوم‌سازی [۹]. در نهایت نیز انتخاب این راهبرد مقاوم‌سازی به بودجه‌ی موجود برای مقاوم‌سازی و سطح ریسکی که برای تصمیم‌گیرنده یا



تصویر ۶: هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهاد شده برای راهبردهای مختلف در برابر نوع سازه‌ی اولیه و نهایی در تهران برای تحلیل‌های موردی؛ (الف) مدل تصادفی، (ب) زلزله‌ی ۴۶، (ج) زلزله‌ی ۶۲ ، (د) زلزله‌ی ۵۱

جدول ۳: رواج نسبی اولیه‌ی انواع متفاوت سازه و درصد هزینه‌های مقاوم‌سازی اختصاص یافته به هر نوع سازه یا در واقع راهبرد مقاوم‌سازی

نوع ساختمان‌های موجود اولیه		HLR		CLR		CMR		CHR		SLR		SMR		SDB		MLR	
رواج گونه‌های سازه‌ای		٪۴۵		٪۰/۹		٪۶/۵		٪۰/۱		٪۵		٪۳۴		٪۱/۲		٪۷	
				٪۷/۵													
تحلیل‌های موردی	هزینه‌های مقاوم‌سازی (میلیارد دلار)	نوع ساختمان‌هایی که ساختمان‌های موجود به آن‌ها مقاوم‌سازی شده‌اند															
		HLR		CLR		CMR		CHR		SLR		SMR		CLR		CLR	
		c-۲	c-۳	c-۲	c-۳	c-۲	c-۳	c-۲	c-۳	c-۲	c-۳	c-۲	c-۳	c-۲	c-۳	c-۲	c-۳
مدل تصادفی	۲/۴	٪۷۵	٪۰	٪۲	٪۰	٪۲۳	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰
زلزله‌ی ۴۶	۲/۴	٪۶۲	٪۴	٪۳	٪۱/۳	٪۲۴	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰/۲	٪۰	٪۵/۳	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰
زلزله‌ی ۶۲	۲/۴	٪۴۷	٪۰	٪۱	٪۰/۱	٪۷/۷	٪۲/۹	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۴۱/۵	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰
زلزله‌ی ۵۱	۲/۴	٪۴۶	٪۱۸	٪۳/۴	٪۱	٪۲۳/۷	٪۰	٪۰/۰۱	٪۰	٪۰/۷	٪۰	٪۶/۵	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰	٪۰

مدیر ریسک قابل پذیرش است، بستگی دارد. تصویر ۵ (الف) مقدار هزینه‌های مقاوم‌سازی را در مقابل موقعیت جغرافیایی هر یک از ناحیه‌ها که از تحلیل مدل تصادفی به دست آمده است، نشان می‌دهد. در این تحلیل 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 یا چگالی بیشتر ساختمانی در این موقعیت‌های مکانی باشد.

تصویر ۶ کل هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهاد شده را در برابر نوع سازه‌ی اولیه و سازه‌ی نهایی ساختمان‌ها برای تحلیل موردی حاصل از مدل تصادفی در تهران نشان می‌دهد. جدول ۳ نیز رواج نسبی اولیه‌ی انواع متفاوت سازه و درصد هزینه‌های مقاوم‌سازی اختصاص یافته به هر نوع سازه یا در واقع راهبرد مقاوم‌سازی برای تحلیل موردی حاصل از مدل تصادفی انجام شده را ارائه می‌دهد. نتیجه‌ی این تحلیل بیانگر آن است که بیشترین هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی صرف مقاوم‌سازی ساختمان‌های با نوع سازه‌ی نیمه اسکلتی فلزی - بنایی کوتاه مرتبه می‌شود که با نام HLR (Brick and steel) نشان داده شده است. ساختمان‌های نیمه اسکلتی فلزی- بنایی کوتاه مرتبه و میان مرتبه (به ترتیب HLR و SMR) همان‌طور که در جدول ۳ 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 بر اساس منحنی‌های شکنندگی از آسیب‌پذیری بیشتری برخوردارند و به‌منزله‌ی راهبردهای بعدی مقاوم‌سازی پیشنهاد می‌شوند. به نظر می‌رسد که در این تحلیل موردی پیشنهادهای مقاوم‌سازی

بیشتر تحت تأثیر رواج سازه‌های موجود (HLR) و آسیب‌پذیری سازه‌ها (CMR و CLR) باشد.

ارزیابی برتری بهینه‌سازی احتمالی در مقایسه با بهینه‌سازی یقینی

برای بررسی مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن قطعی نبودن زلزله‌های محتمل و نشان دادن برتری‌ها و قابلیت‌های مدل برنامه‌ریزی تصادفی (احتمالی) نسبت به سایر مدل‌های برنامه‌ریزی یقینی، مجموعه تحلیل‌هایی در نظر گرفته شده است. این تحلیل‌ها با فرض داده‌هایی که برای حالت تحلیل موردی تصادفی (مبنا) در نظر گرفته شده، انجام شده است و نتایج این تحلیل‌ها با نتایج تحلیل موردی مبنا مورد مقایسه قرار گرفته است.

اگر اطلاعات دقیق و جامعی از آینده در دسترس بود، به گونه‌ای که دقیقاً مشخص بود که کدام زلزله در مدت زمان برنامه‌ریزی رخ خواهد داد، آنگاه استفاده از مدل برنامه‌ریزی (بهینه‌سازی) یقینی می‌توانست امری بسیار منطقی و صحیح باشد. برنامه‌ی یقینی متناظر با برنامه‌ی احتمالی در مقاله‌ی همراه این مقاله ارائه شده است. همه‌ی متغیرهای ورودی و اطلاعات مرتبط در مورد ساختمان‌ها و هزینه‌ها عیناً مشابه مدل احتمالی است. با این تفاوت که در اینجا از وقوع زلزله‌ی مشخص *1* دقیقاً اطمینان حاصل شده است. همه‌ی فرضیات در رابطه با سطوح خرابی، نحوه‌ی بازسازی و مقاوم‌سازی عیناً مشابه مدل احتمالی است. مدل ارائه شده در انتها تصمیمات بهینه‌ی پیشنهادی برای مقاوم‌سازی و هزینه‌ی بازسازی مربوط به سناریوی زلزله‌ی مورد نظر را ارائه می‌دهد.

برای مقایسه‌ی تصمیم‌گیری‌ها در حالات رخداد زلزله‌های گوناگون و همچنین مقایسه‌ی مقادیر تابع هدف و مقدار هزینه‌های کمینه شده در این حالات و حالتی که برنامه‌ریزی احتمالی انجام شده است، تحلیل موردی تکمیلی در نظر گرفته شده است. بنابراین ابتدا ۴ سناریوی زلزله با بزرگی‌های مختلف از میان فهرست زلزله‌های محتمل انتخاب شده‌اند. این زلزله‌ها عبارتند از زلزله‌ی کوچک ۳ (با بزرگی ۴/۶ ریشتر)، زلزله‌های متوسط ۴۶ و ۵۱ (با بزرگی ۵ ریشتر) و زلزله‌ی بزرگ ۶۲ (با بزرگی ۶/۷۵ ریشتر). از میان این ۴ سناریوی انتخاب شده، زلزله‌های بزرگ و متوسط به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بیشترین مشارکت را در خسارات وارده برای تحلیل تصادفی داشته باشند؛ سپس مراحل زیر که به طور مثال برای زلزله‌ی ۴۶ توضیح داده شده است، برای هر یک از سناریوهای زلزله به منزله‌ی تحلیل‌های موردی تکمیلی انجام شده است.

در گام اول فرض شده که زلزله‌ی شماره‌ی ۴۶، که یک زلزله‌ی متوسط (۵ ریشتر) است، رخ خواهد داد و برنامه‌ریزی بهینه‌سازی یقینی بر پایه‌ی این فرض اعمال شده است. چنانچه این فرض صحیح باشد، پیشنهادات مقاوم‌سازی و هزینه‌های آن و همچنین تابع هدف که در واقع همان هزینه‌های کل در صورت وقوع زلزله‌ی شماره‌ی ۴۶ است و شامل هزینه‌های مقاوم‌سازی، بازسازی و هزینه‌ی خسارت بیش از حد است، محاسبه می‌گردد. توزیع جغرافیایی هزینه‌های مقاوم‌سازی و همچنین توزیع آن‌ها در برابر نوع سازه‌های اولیه‌ی موجود به ترتیب در تصاویر ۳ و ۴ نشان داده شده است. هزینه‌های مقاوم‌سازی، بازسازی، خسارت بیش از حد و هزینه‌ی کل در جدول ۴ نشان داده شده است.

در گام دوم مجدداً فرض شده که زلزله‌ی شماره‌ی ۴۶ رخ خواهد داد و برنامه‌ریزی بهینه‌سازی یقینی بر پایه‌ی این فرض اعمال می‌شود. با این وجود زلزله‌ی ۴۶ رخ نمی‌دهد و به جای آن در آینده سناریوی زلزله‌ی دیگری (یکی از سناریوهای ۶۲، ۳ و ۵۱) رخ داده است. در صورت وقوع هر یک از این زلزله‌ها هزینه‌های مقاوم‌سازی تغییری نمی‌کند، زیرا این تصمیم قبلاً در برنامه‌ی یقینی گرفته و اعمال شده است. اما با انجام دادن فرایند تخمین خسارت، هزینه‌های بازسازی و خسارت بیش از حد برای این سه زلزله‌ی دیگر به صور جداگانه محاسبه می‌شود. هزینه‌های مقاوم‌سازی، بازسازی، خسارت بیش از حد و هزینه‌ی کل در هر ۳ حالت نیز در جدول ۴ نشان داده شده است.

روند یاد شده به طور مشابه با فرض وقوع حتمی زلزله‌های ۶۲، ۳ و ۵۱ نیز انجام شده است و هزینه‌های مقاوم‌سازی مربوط به هر یک از دو تحلیل یقینی برای زلزله‌های ۶۲ و ۵۱ نیز در تصویر ۵ و ۶ نشان داده شده است. هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی برای زلزله‌ی ۳ برابر با صفر است و در این اشکال نشان داده نشده است. هزینه‌های بازسازی، خسارت بیش از حد و هزینه‌های کل نیز برای هر یک از تحلیل‌ها در جدول ۴ آمده است.

از آنجا که زلزله‌ی ۳ بسیار کوچک است و در نتیجه هزینه‌های بازسازی در صورت وقوع این زلزله کمتر است، بنابراین مدل بهینه‌سازی در این حالت پیشنهاد می‌کند که هزینه‌ای صرف مقاوم‌سازی نگردد و به جای آن هزینه‌ها صرف بازسازی پس از وقوع حتمی زلزله‌ی ۳ شود. حال آنکه وقوع زلزله‌های دیگر مانند زلزله‌های ۴۶ و ۵۱ در این حالت منجر به خسارت ۵۰ تا ۷۰ برابر وقوع زلزله‌ی ۳ می‌گردد. برای سایر زلزله‌ها نیز، در صورتی که با اطلاع کامل از وقوع آن زلزله بهینه‌سازی انجام شود و آن زلزله رخ دهد، خسارت تنها برای آن زلزله کمترین مقدار را خواهد داشت و اگر زلزله‌ی دیگری رخ دهد که بزرگ یا متوسط باشد خسارت وارده به مراتب بیشتر خواهد بود.

برای مقایسه‌ی روش حل تصادفی و روش حل یقینی، با فرض انجام دادن پیشنهادهای مقاوم‌سازی که روش حل تصادفی ارائه داده و وقوع سایر زلزله‌های ۴۶، ۶۲، ۳ و ۵۱، مقادیر هزینه‌های بازسازی، خسارت بیش از حد و هزینه‌های کل نیز برای هر یک از تحلیل‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. مقایسه‌ی هزینه‌های کل ایجاد شده با در نظر گرفتن برنامه‌ی مقاوم‌سازی مطابق آنچه برنامه‌ریزی تصادفی پیشنهاد می‌کند یا برای مثال برنامه‌ریزی بر اساس سناریوی زلزله‌ی ۶۲ نشان می‌دهد که در صورت وقوع هر یک از زلزله‌ها، برنامه‌ی تصادفی هزینه‌ی کل کمتری را منجر می‌شود، مگر زلزله‌ی ۶۲ رخ دهد. این روند کم و بیش برای سایر سناریوها نیز قابل مشاهده است.

تصویر ۵ (ب، ج، د) مقدار هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی را برای سه سناریوی زلزله نشان می‌دهد. این نتایج به شدت وابسته

جدول ۴: مقدار هزینه‌های ایجاد شده با در نظر گرفتن برنامه‌های مختلف مقاوم‌سازی بر مبنای زلزله سناریو و وقوع هر یک از سناریوهای دیگر ۳، ۴۶،۶۲ و ۵۱

تحلیل موردی	هزینه‌ی مقاوم‌سازی (میلیارد دلار)	هزینه‌ی بازسازی (میلیارد دلار)	خسارت اقتصادی بیش از حد (میلیارد دلار)	تابع هدف، هزینه‌های کل (میلیارد دلار)
بهینه‌سازی تصادفی				
تحلیل موردی تصادفی	۲/۴	۱۲/۵	۲۳/۴	۳۸/۳
زلزله‌ی ۳	۲/۴	۴/۴۷	۰	۶/۸۷
زلزله‌ی ۴۶	۲/۴	۲۹/۵	۱۱۹	۱۵۱
زلزله‌ی ۶۲	۲/۴	۱۱/۸	۱۳	۲۷/۲
زلزله‌ی ۵۱	۲/۴	۳۱/۳	۱۳۰	۱۶۴
زلزله‌ی ۴۶				
زلزله‌ی ۳	۲/۴	۴/۶۱	۰	۷/۰۱
زلزله‌ی ۴۶	۲/۴	۲۸/۸	۱۱۵	۱۴۶
زلزله‌ی ۶۲	۲/۴	۱۱/۸	۱۲/۹	۲۷/۱
زلزله‌ی ۵۱	۲/۴	۳۲/۶	۱۳۸	۱۷۳
زلزله‌ی ۶۲				
زلزله‌ی ۳	۲/۴	۴/۵۳	۰	۶/۹۳
زلزله‌ی ۴۶	۲/۴	۳۰/۴	۱۲۵	۱۵۷
زلزله‌ی ۶۲	۲/۴	۱۱/۶	۱۱/۹	۲۵/۹
زلزله‌ی ۵۱	۲/۴	۳۱/۸	۱۳۳	۱۶۷
زلزله‌ی ۳				
زلزله‌ی ۳	۰	۴/۷۶	۰	۴/۷۶
زلزله‌ی ۴۶	۰	۳۱/۴	۱۳۱	۱۶۲
زلزله‌ی ۶۲	۰	۱۲/۹	۱۹/۶	۳۲/۵
زلزله‌ی ۵۱	۰	۳۲/۸	۱۳۹	۱۷۲
زلزله‌ی ۵۱				
زلزله‌ی ۳	۲/۴	۴/۵۴	۰	۶/۹۴
زلزله‌ی ۴۶	۲/۴	۳۰/۱	۱۲۳	۱۵۵
زلزله‌ی ۶۲	۲/۴	۱۱/۹	۱۳/۵	۲۷/۷
زلزله‌ی ۵۱	۲/۴	۳۰/۷	۱۲۶	۱۶۰

به سناریوی زلزله است؛ با این حال برای سناریوهای ۴۶ و ۵۱ پراکندگی این نتایج بیشتر در نواحی مرکزی شهر تهران قرار دارد. در مورد زلزله‌ی بزرگ‌تر ۶۲ توزیع جغرافیایی هزینه‌های مقاوم‌سازی به شدت تحت تأثیر شتاب زلزله‌ی PGA است و نیمه‌های جنوب شرقی تهران را پوشش می‌دهد. همچنین هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی بر اساس تحلیل مدل بهینه‌سازی با فرض وقوع زلزله‌ی ۳ برابر با صفر است و بنابراین هیچ توزیعی در این حالت وجود ندارد.

تصویر ۶ (ب، ج، د) کل هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهاد شده را در برابر نوع سازه‌ی اولیه و سازه‌ی نهایی ساختمان‌ها برای ۳ سناریوی مختلف زلزله در شهر تهران، نشان می‌دهد. جدول ۳ نیز درصد هزینه‌های مقاوم‌سازی اختصاص یافته به هر نوع سازه‌ای را برای ۳ سناریوی مختلف زلزله ارائه می‌دهد. در تحلیل موردی مرتبط با وقوع سناریوی ۴۶ که در تصویر ۶ (ب) نشان داده شده است، بیشترین هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی همانند تحلیل موردی تصادفی صرف مقاوم‌سازی ساختمان‌های کوتاه مرتبه HLR با نوع سازه‌ی نیمه اسکلتی فلزی- بنایی می‌شود. ساختمان‌های بتنی مسلح میان مرتبه (CMR) و ساختمان‌های اسکلت فلزی میان مرتبه (SMR) به ترتیب پیشنهادهای مقاوم‌سازی بعدی خواهند بود. گزینه‌های بعدی مقاوم‌سازی ساختمان‌های بتنی مسلح کوتاه مرتبه (CLR) و اسکلت فلزی کوتاه مرتبه (SLR) است. همچنین در مورد ساختمان‌های HLR و CLR بخشی از ساختمان‌های مقاوم‌سازی شده به سطح بالاتری از طراحی لرزه‌ای (سطح مقاوم‌سازی شده ۲(c=۳)) به جای سطح مقاوم‌سازی ۱ (c=۲) تقویت می‌شوند. به نظر می‌رسد که در این تحلیل پیشنهادهای مقاوم‌سازی بیشتر تحت تأثیر رواج سازه‌های موجود (HLR) و آسیب‌پذیری سازه‌ها (CMR و CLR) باشد. در تحلیل موردی مرتبط با وقوع سناریوی ۶۲ که در تصویر ۶ (ج) نشان داده شده است، هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی روند متفاوتی دارد و بر خلاف تحلیل موردی تصادفی و زلزله‌ی ۴۶ به صورت برابر صرف مقاوم‌سازی ساختمان‌های با نوع سازه‌ی نیمه اسکلتی فلزی- بنایی کوتاه مرتبه HLR و ساختمان‌های اسکلت فلزی میان مرتبه (SMR) می‌گردد. سپس ساختمان‌های بتنی مسلح میان مرتبه و کوتاه مرتبه (CMR و CLR) برای مقاوم‌سازی پیشنهاد شده‌اند. در این تحلیل پیشنهادهای مقاوم‌سازی در درجه‌ی اول تحت تأثیر رواج سازه‌های موجود (SMR و HLR) در منطقه‌ی جنوب شرقی تهران و شتاب زلزله در این نواحی و در درجه‌ی دوم آسیب‌پذیری سازه‌ها (CMR و CLR) است. در تحلیل موردی مرتبط با وقوع سناریوی ۵۱ که در تصویر ۶ (د) نشان داده شده است، بیشترین هزینه‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی همانند تحلیل موردی تصادفی و زلزله‌ی ۴۶ صرف مقاوم‌سازی ساختمان‌های با نوع سازه‌ی نیمه اسکلتی فلزی- بنایی کوتاه مرتبه HLR می‌شود. ساختمان‌های بتنی مسلح میان مرتبه (CMR) و ساختمان‌های اسکلت فلزی میان مرتبه (SMR) به ترتیب پیشنهادهای مقاوم‌سازی بعدی خواهند بود. گزینه‌های بعدی مقاوم‌سازی ساختمان‌های بتنی مسلح کوتاه مرتبه (CLR)

جدول ۵: مقادیر هزینه‌های کل و ارزش پیش‌بینی صحیح برای چهار زلزله سناریو در صورت وقوع هر یک از چهار زلزله‌ی دیگر

زلزله‌ی پیش‌بینی شده	زلزله‌ی رخ داده	تابع هدف، هزینه‌های کل (میلیارد دلار)	ارزش پیش‌بینی صحیح(میلیارد دلار)
زلزله‌ی ۴۶	زلزله‌ی ۴۶	۱۴۶	
زلزله‌ی ۳	زلزله‌ی ۴۶	۱۶۲	۱۶/۱
زلزله‌ی ۶۲	زلزله‌ی ۴۶	۱۵۷	۱۱/۳
زلزله‌ی ۵۱	زلزله‌ی ۴۶	۱۵۵	۹/۰۳
برنامه‌ی تصادفی	زلزله‌ی ۴۶	۱۵۱	۵
زلزله‌ی ۳	زلزله‌ی ۳	۴/۷۶	
زلزله‌ی ۴۶	زلزله‌ی ۳	۷/۰۱	۲/۲۵
زلزله‌ی ۶۲	زلزله‌ی ۳	۶/۹۳	۲/۱۷
زلزله‌ی ۵۱	زلزله‌ی ۳	۶/۹۴	۲/۱۸
برنامه‌ی تصادفی	زلزله‌ی ۳	۶/۸۷	۲/۱۱
زلزله‌ی ۶۲	زلزله‌ی ۶۲	۲۵/۹	
زلزله‌ی ۳	زلزله‌ی ۶۲	۳۲/۵	۶/۶۴
زلزله‌ی ۴۶	زلزله‌ی ۶۲	۲۷/۱	۱/۱۵
زلزله‌ی ۵۱	زلزله‌ی ۶۲	۲۷/۷	۱/۸۵
برنامه‌ی تصادفی	زلزله‌ی ۶۲	۲۷/۲	۱/۳
زلزله‌ی ۵۱	زلزله‌ی ۵۱	۱۶۰	
زلزله‌ی ۳	زلزله‌ی ۵۱	۱۷۲	۱۲/۳
زلزله‌ی ۴۶	زلزله‌ی ۵۱	۱۷۳	۱۲/۹
زلزله‌ی ۶۲	زلزله‌ی ۵۱	۱۶۷	۷/۷۸
برنامه‌ی تصادفی	زلزله‌ی ۵۱	۱۶۴	۴

و اسکلت فلزی کوتاه مرتبه (SLR) است. ساختمان‌های بتنی بلند مرتبه نیز آخرین گزینه‌ی مقاوم‌سازی محسوب می‌شوند. همچنین در مورد ساختمان‌های HLR و CLR در مقایسه با زلزله‌ی ۴۶، بخش بیشتری از ساختمان‌های مقاوم‌سازی شده به سطح بالاتری از طراحی لرزه‌ای (سطح مقاوم‌سازی شده ۲ (c=۳)) به جای سطح مقاوم‌سازی ۱(c=۲) تقویت می‌شوند.

برای تمام حالت‌های فوق که فرض شده زلزله‌ی I رخ خواهد داد و همان زلزله رخ داده یا آنکه پیش‌بینی شده زلزله‌ی دیگر e رخ خواهد داد اما زلزله‌ی *I* رخ داده است، مقدار یا ارزش پیش‌بینی صحیح۱۴ از تفاضل هزینه‌ی کل (تابع هدف در حالت اول و هزینه‌ی کل محاسبه شده با انجام فرایند تخمین خسارت) به دست می‌آید. این مقادیر برای چهار زلزله سناریو در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در همه‌ی حالاتی که دقیقاً از وقوع زلزله‌ی I اطمینان وجود داشته و این زلزله رخ داده است، هزینه‌های کل کمتر از زمانی است که پیش‌بینی شده زلزله‌ی دیگری با اطمینان رخ می‌دهد اما زلزله‌ی I رخ داده است. داشتن اطلاع از واقعه‌ای در آینده می‌تواند منجر به تحلیل و تصمیم‌گیری صحیح‌تر گردد، حال آنکه در مورد زلزله چنین یقینی وجود ندارد و استفاده از مدل یقینی کار منطقی‌ای به نظر نمی‌رسد، زیرا همان‌طور که مقادیر جدول ۴ و ۵ نشان می‌دهد، پیشنهاد مقاوم‌سازی برای یک زلزله می‌تواند در اثر وقوع زلزله‌ی دیگر ناکافی و حتی غیر مؤثر باشد. از این رو، در جدول ۵ هزینه‌های ایجاد شده در صورت اعمال پیشنهادهای مقاوم‌سازی برنامه‌ریزی تصادفی و وقوع هر یک از زلزله‌های سناریو نیز آورده شده است. در این حالات نیز ارزش پیش‌بینی صحیح محاسبه شده است. این مقدار همچنان مثبت است و دانستن اینکه کدام سناریو دقیقاً پیش می‌آید و برنامه‌ریزی کردن برای آن به مراتب اقدام مناسب‌تری است. اما به راحتی می‌توان مشاهده کرد که مقدار ارزش پیش‌بینی صحیح در این حالت نسبت به بهینه‌سازی یقینی برای سناریوهای دیگر در اغلب مواقع کمتر است و این نشان‌دهنده‌ی برتری مدل تصادفی نسبت به در نظر گرفتن سایر سناریوهای یقینی است.

نتیجه‌گیری

توزیع و اختصاص بهینه‌ی منابع اقتصادی و اهمیت آن برای راهکارهای کاهش ریسک لرزه‌ای در این پژوهش ارائه گردید. به علاوه روند بهینه‌سازی در حکم ابزاری برای یافتن برنامه‌ی بهینه جهت اختصاص منابع اقتصادی به راهکارها و راهبرد کاهش ریسک به تفصیل توضیح داده شده است. 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. همچنین وجه تمایز این مدل با مدل‌های پیشین علاوه بر ارتقای مدل‌های

بهینه‌سازی یقینی به مدل‌های بهینه‌سازی احتمالی، برقراری توازن میان ریسک و سودمندی است. سپس بر مبنای مدل برنامه‌ریزی (بهینه‌سازی) تصادفی دو مرحله‌ای ارائه شده، مطالعه‌ی موردی (شهر تهران) در کنار نحوه‌ی تهیه‌ی 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 انتخاب آنکه چه سازه‌ای باید مقاوم‌سازی شود بیش از هر عامل دیگری به زلزله‌های محتمل و پهنه‌بندی شتاب زلزله، رواج نسبی گونه‌های مختلف ساختمان‌ها و آسیب‌پذیری آن‌ها در کنار محدودیت بودجه‌ی مقاوم‌سازی وابسته است.

همچنین در این پژوهش مدل تصادفی ارائه شده از دیدگاه قطعی نبودن وقوع زلزله‌های احتمالی در مقایسه با مدل‌های بهینه‌سازی یقینی از نظر عملی با تعریف و تحلیل‌های موردی تکمیلی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشانگر برتری مدل بهینه‌سازی تصادفی در مقایسه با روش‌های یقینی است. همان‌طور که مشخص است اطلاعات دقیقی از وقوع زلزله سناریو در دسترس نیست. مقایسه‌ی نتایج حاصل از برنامه‌های یقینی و تحلیل برنامه‌ی تصادفی بر اساس مقادیر «ارزش پیش‌بینی صحیح» نشان می‌دهد که در چنین شرایطی در اغلب موارد (برای سناریوهای محدودی که در نظر گرفته شده است) چنانچه برنامه‌ریزی مقاوم‌سازی بر مبنای مدل تصادفی اعمال شود، ارزش پیش‌بینی صحیح مقادیر کمتری نسبت به سایر سناریوها، غیر از سناریوی یقینی، دارد که نشان‌دهنده‌ی برتری برنامه‌ریزی تصادفی است.

پی‌نوشت

1. National Committee for Natural Disaster Reduction
2. Earthquake Hazard Mitigation Program
3. Earthquake Risk Reduction Strategy of Iran
4. Two – stage stochastic optimization program
5. Optimization model
6. Examination of the risk –return tradeoff
7. Monetary value
8. Net benefit of mitigation investments
9. Constraint
10. Equivalent
11. Present value
12. Non –negativity Requirements
13. Sensitivity analyses
14. Value of perfect forecast
15. Payback period
16. Census zone
17. Commune
18. District
19. Monte Carlo simulation (MCS)
20. Optimization –based Probabilistic Scenario
21. Poisson distribution
22. Not mitigated
23. Mitigated level 1
24. Mitigated level 2
25. Life Safety Performance Level
26. Collapse Prevention Performance Level
27. Gross domestic product (GDP)
28. Iranian Budget Law

منابع

1. Ghafory Ashtiany, M. (2006). *Earthquake Risk Reduction Achievement*. Proceedings of 1st International Conference on Integrated Natural Disaster Management, Tehran, Iran.

2. BHRC (1999). Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Standard no. 2800), Chapter 2, Edition 2, 31 –57, Building and Housing Research Center, Iran.

3. 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.

4. 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.

5. Government of the I.R. Iran –UNDP. (2005). *Strengthening Capacities for Disaster Risk Management in I.R.Iran*. Joint Five –Year National Program, Project document, UNDP Iran Country Program.

6. 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.

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

8. Vaziri, P, Davidson R, Nozick L, and 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.

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

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

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

12. 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.

13. 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

14. 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.

15. 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.

16. Gholipour Y; Bozorgnia Y; Berberian M; Rahnama M; Ghoreyshi M; Nazari T; Shoja Taaheri J; Shafiyee A (2008). Probabilistic seismic hazard analyses, Phase 1 Graeater Tehran Regions , final report, President Deputy Strategic Planning and Control ,College of Engineering University of Tehran. Table 6-1, available in http://iranhazard.mporg.ir/PageItem.aspx?p=Reports, 2008.

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

18. Zolfaghari (2010). *Definition of new Seismogenic Sources to Model Probabilistic Seismic Hazard for the City of Tehran*. 14 th Europian Conference of Earthquake Engineering (14ECEE).

19. Ghodrati Amiri, G.; Jalalian, M; 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.

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

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

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

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

24. 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.

25. 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.

26. Iran (2005a) National budget act of 1384, 2005. Available at: http://www.spac.ir/hoghoghi, Accessed 15 May 2008.

27. 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.