

بسمه تعالی



دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده مهندسی عمران

گزارش نهایی پروژه کارشناسی

عنوان

سامانه ارزیابی ریسک لرزه‌ای و جمع‌آوری اطلاعات ساختمان بر مبنای وب

نگارنده

امین قاسمی

استاد راهنما

دکتر مجتبی محصولی

آبان ۱۳۹۳

چکیده

در این پژوهش یک سامانه اینترنتی بمنظور تحلیل ریسک لرزه‌ای ساختمان‌ها طراحی و پیاده‌سازی شده است. این سامانه، ریسک لرزه‌ای ساختمان‌ها را به زبانی قابل فهم برای مالکان و تصمیم‌گیرندگان فاقد اطلاعات فنی لرزه‌ای ارائه می‌کند. ریسک ترکیبی از احتمال و پیامد است. پیامد مورد نظر در این پژوهش، خسارات مالی ناشی از هزینه تعمیر اجزای سازه‌ای ساختمان می‌باشد. بنابراین معیار ریسک در این پژوهش، میانگین خسارات لرزه‌ای سازه است که از جنس حاصل ضرب احتمال و هزینه می‌باشد.

این سامانه دارای یک معماری شی گرا بوده که باعث سهولت در نگهداری و گسترش آن می‌شود. برای مثال، روش تحلیل ریسک پیاده شده در این پژوهش به صورت یک شی طراحی شده است. روش‌های دیگر تحلیل ریسک نیز می‌توانند به صورت اشیا جدید به نرم‌افزار اضافه شوند. برای انجام یک تحلیل ریسک، واسط وب اطلاعات سازه‌ای ساختمان و موقعیت جغرافیایی آن را به عنوان ورودی از کاربر دریافت می‌کند. اطلاعات سازه‌ای شامل مواردی در خصوص سیستم باربری جانبی ساختمان و مشخصات فیزیکی سازه از قبیل تعداد طبقات و زیربنا می‌باشد. موقعیت جغرافیایی سازه نیز توسط کاربر بر روی نقشه جغرافیایی مشخص شده و مختصات آن نقطه در سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. واسط وب این اطلاعات را به بخش تحلیل ریسک تسلیم نموده تا خسارات لرزه‌ای و احتمالات آنها و در نهایت میانگین این خسارات محاسبه شوند. در نهایت، این نتایج توسط واسط وب در قالب نمودار و متن به کاربر نمایش داده شده و تفسیر می‌گردد. این نتایج شامل میانگین خسارت مالی سازه به شرط وقوع زلزله و نیز میانگین مجموع خسارات مالی در طول عمر ۵۰ ساله سازه است. در محاسبه میانگین دوم، عدم قطعیت در وقوع زلزله نیز در نظر گرفته شده است.

روش تحلیل ریسک مورد استفاده بر مبنای مدل‌های احتمال شرطی و انتگرال جمع احتمال می‌باشد. مدل‌های مزبور شامل تابع توزیع احتمال شدت زمین‌لرزه در محل ساختمان و مدل‌های شکنندگی خرابی برای انواع سیستم‌های سازه‌ای می‌باشند. روش مورد استفاده با توجه به کیفیت پایین تر ساخت و ساز در کشور، در این پژوهش اصلاح شده است. چشم‌انداز این پژوهش، بکارگیری روش‌های پیشرفته‌تر تحلیل ریسک و محاسبه ریسک بر مبنای پیامدهای دیگر زمین لرزه از جمله خسارات جانی می‌باشد.

فهرست مطالب

چکیده.....	أ
فهرست مطالب.....	ب
فهرست شکل ها.....	د
فهرست جدول ها.....	ه
فصل ۱: مقدمه.....	۱
۱-۱ اهداف و حیطه.....	۱
۲-۱ پیشینه.....	۴
۳-۱ ساختار گزارش.....	۱۱
فصل ۲: تحلیل خطر.....	۱۳
۱-۲ منحنی خطر.....	۱۳
۲-۲ روش شناسی تحلیل خطر.....	۱۷
فصل ۳: تحلیل ریسک.....	۱۸
۱-۳ روش ATC-13.....	۱۸
۲-۳ روش FEMA-NIBS.....	۲۱
۳-۳ روش تلفیقی.....	۲۹
فصل ۴: سامانه تحلیل ریسک CIRA.....	۳۱
۱-۴ دست نامه کاربران.....	۳۲
فصل ۵: نتیجه گیری.....	۳۶
۱-۵ خلاصه روش تحقیق.....	۳۶

۵-۲ مسیر تحقیقات آتی..... ۳۷

مراجع..... ۳۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱: تصویری نمادین از نتایج تحلیل ریسک ساختمان‌های یک منطقه. ۲
- شکل ۲: منحنی احتمال فراگذشت خسارت مالی. ۳
- شکل ۳: نقشه سه بعدی خسارت مالی ساختمان‌های منطقه ۱۷ تهران [۹]. ۷
- شکل ۴: نقشه احتمال فراگذشت ۲٪ در ۵۰ سال PGA در امریکا [۱۲]. ۸
- شکل ۵: نقشه زمین‌لرزه‌های هفت روز گذشته در سامانه PAGER [۱۳]. ۹
- شکل ۶: PGA نقاط مختلف در مقیاس $g\%$ ناشی از زمین‌لرزه‌ای در کالیفورنیا. ۹
- شکل ۷: نمایی از نرم‌افزار HASUS®. ۱۰
- شکل ۸: نمایی از نرم‌افزار Rt [۱۶]. ۱۱
- شکل ۹: منحنی خطر برای نقطه‌ای از تهران [۱۱]. ۱۴
- شکل ۱۰: نمودار تابع مکمل توزیع احتمال تجمعی (CCDF) بیشینه شتاب زمین. ۱۵
- شکل ۱۱: نمودار تابع توزیع احتمال تجمعی (CDF) بیشینه شتاب زمین. ۱۶
- شکل ۱۲: نمودار تابع چگالی احتمال (PDF) بیشینه شتاب زمین. ۱۶
- شکل ۱۳: منحنی خطر لرزه‌ای برای یک نقطه از شهر تهران [۱۰]. ۱۷
- شکل ۱۴: فلوچارت روش ارزیابی خرابی زلزله FEMA-NIBS [۳]. ۲۲
- شکل ۱۵: نمونه‌ای از منحنی شکنندگی برای چهار حالت خرابی تعریف شده توسط FEMA-NIBS [۳]. ۲۳
- شکل ۱۶: تصویر صفحه نخست سامانه CIRA. ۳۳
- شکل ۱۷: تصویر صفحه خروجی نتایج سامانه CIRA. ۳۵

فهرست جدول‌ها

جدول ۱: نمونه‌ای از ماتریس خرابی-احتمال [۲].....	۲۰
جدول ۲: سطوح خرابی هفت گانه ATC-13 به همراه ضریب خرابی متناظر هر سطح [۲].....	۲۰
جدول ۳: تقسیم‌بندی انواع ساختمان‌ها در FEMA-NIBS [۳].....	۲۵
جدول ۴: ماتریس ۳×۳ تعیین سطح آیین‌نامه با توجه به سطح طراحی لرزه‌ای و کیفیت ساخت [۳].....	۲۶
جدول ۵: پارامترهای منحنی شکنندگی برای ساختمان W1؛ سطح طراحی لرزه‌ای High-Code [۳].....	۲۸
جدول ۶: نسبت‌های خرابی میانگین متناظر با حالت‌های خرابی در FEMA-NIBS [۳].....	۳۰
جدول ۸: تعیین سطح آیین‌نامه لرزه‌ای بر اساس سال ساخت (مورد استفاده در پروژه).....	۳۴

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ اهداف و حیطه

هدف نهایی در این پروژه، طراحی و پیاده‌سازی یک سامانه تحت وب بمنظور تحلیل ریسک لرزه‌ای ساختمان‌ها و تهیه یک بانک اطلاعاتی از نتایج این تحلیل ریسک در مناطق شهری می‌باشد. ریسک در این چارچوب، به معنای احتمال فراگذشت خسارت مالی و تلفات جانی است. یکی از مهم‌ترین دلایل خسارت مالی و تلفات جانی به هنگام وقوع زلزله، عدم آگاهی کافی مالکان و تصمیم‌گیرندگان از مفهوم ریسک لرزه‌ای و میزان آسیب‌پذیری ساختمان خود در برابر این مخاطرات است. از این‌رو، سامانه پیش رو به منظور افزایش آگاهی عمومی در مورد ریسک لرزه‌ای از طریق ارائه نتایج تحلیل ریسک لرزه‌ای به مالکان و تصمیم‌گیرندگان طراحی شده است. این افزایش آگاهی منجر به افزایش تمایل جامعه برای اقدام در جهت کاهش ریسک لرزه‌ای مثلاً از طریق مقاوم سازی سازه‌ها می‌باشد.

اولین هدف بلندمدت این پژوهش وارد ساختن مفاهیم خطر و ریسک لرزه‌ای به زندگی روزمره عموم مردم و نیز سازوکار مهندسی در کشور می‌باشد. بیان پیامدهای زلزله در قالب پارامترهایی چون جابجایی، شتاب و نیروها برای عموم مردم قابل درک نیست. در عوض، خرابی، خسارت مالی و تلفات جانی و احتمالات زبان مشترک این سامانه و جامعه مخاطب آن می‌باشد. به کمک این زبان مشترک می‌توان مفهوم ریسک لرزه‌ای را برای مخاطب عام روشن نمود. نتایج تحلیل ریسک لرزه‌ای ساختمان محل سکونت یا کار مخاطبان این سامانه درک صحیحی از میزان آسیب‌پذیری ساختمان مورد نظر را به آن‌ها نشان می‌دهد. چشم‌انداز این پروژه بگونه‌ای است که کاربران بتوانند با استفاده از خروجی‌های نمایش داده شده، در جهت بهسازی لرزه‌ای و یا بازسازی بنای خود تصمیم‌گیری نمایند.

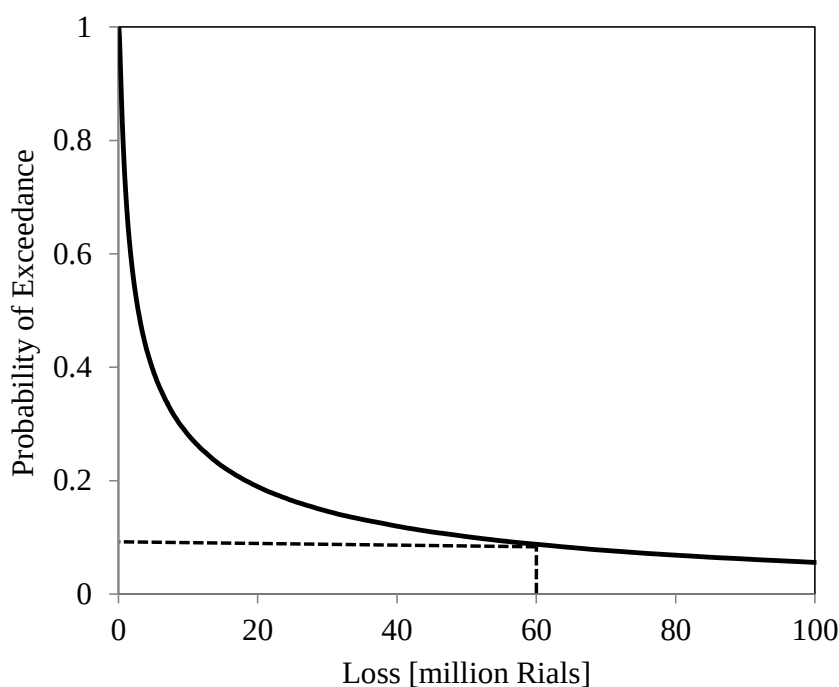
هدف بلندمدت دیگر این پژوهش، ارائه نتایج تحلیل ریسک ساختمان‌ها در قالب یک بانک اطلاعاتی به افراد و سازمان‌های تصمیم‌گیرنده می‌باشد. توجه آسیب‌پذیر بودن ساختمان‌های یک منطقه شهری، بعنوان نمونه، می‌تواند در جهت ترغیب سازمان‌های تصمیم‌گیرنده مانند شهرداری‌ها به وضع قوانین و اعطای

تسهیلات به منظور بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های آن منطقه، گام بسیار بلندی باشد. ماهیت این بانک اطلاعاتی بدین صورت است که در هر ورودی آن، اطلاعات وارد شده از سوی کاربر مانند موقعیت جغرافیایی ساختمان و ویژگی‌های سازه‌ای که در ادامه مورد معرفی خواهند شد، به همراه نتایج حاصل از تحلیل ریسک، ذخیره می‌گردد. این بانک اطلاعاتی می‌تواند بصورت گرافیکی، شمایی کلی از وضعیت آسیب‌پذیری ساختمان‌های یک منطقه یا حتی یک شهر را ارائه دهد. بعنوان مثال، تصویری مانند شکل ۱ می‌تواند نمونه‌ای شماتیک از این خروجی گرافیکی باشد که در آینده این پژوهش قابل دسترسی است. به کمک این اطلاعات می‌توان آسیب‌پذیرترین ساختمان‌های یک منطقه یا یک شهر را شناسایی و نسبت به قرار دادن آن‌ها در اولویت بهسازی و یا نوسازی اقدام نمود.



شکل ۱: تصویری نمادین از نتایج تحلیل ریسک ساختمان‌های یک منطقه.

ارائه منحنی کامل احتمال فراگذشت خسارت مالی لرزه‌ای از جمله چشم‌اندازهای این پروژه می‌باشد. شکل ۲، نمونه‌ای از این منحنی را به نمایش می‌گذارد. این منحنی می‌تواند بیانگر احتمال فراگذشت خسارت مالی در اثر وقوع زلزله و یا در طول یک بازه زمانی معین مانند ۱۰ سال باشد. محور افقی این نمودار نشانگر میزان خسارت مالی وارده بر ساختمان برحسب میلیون تومان است. هر نقطه متناظر روی محور عمودی، احتمال وقوع میزان خسارت مالی برابر و یا بیشتر از خسارت متناظر محور افقی را معرفی می‌کند. بعنوان نمونه در شکل ۲، احتمال آن‌که ساختمان دچار خسارت مالی معادل ۶۰ میلیون تومان و یا بیشتر از آن شود، حدود ۰/۱ می‌باشد.



شکل ۲: منحنی احتمال فراگذشت خسارت مالی.

از دیگر افق‌های بلندمدت این پروژه می‌توان به قابلیت کارآفرینی و درآمدزایی آن اشاره کرد. با توجه به امکان ارائه دامنه وسیعی از اطلاعات و نتایج تحلیل ریسک به کاربر، می‌توان سطوح بالاتری از نتایج را در ازای دریافت هزینه در اختیار قرار وی قرار داد. این قابلیت پروژه می‌تواند امکان بازگشت حداقل هزینه‌های انجام گرفته شامل راه‌اندازی پایگاه اینترنتی و بانک اطلاعاتی و همچنین انجام محاسبات سنگین با اتصال به کلاستر پردازش موازی را فراهم نماید.

بمنظور نیل به اهداف و افق‌های پیش روی این پروژه بلندمدت، فاز نخست آن با هدف راه‌اندازی سامانه اینترنتی تحلیل ریسک و در قالب یک پروژه کارشناسی انجام می‌پذیرد. این سامانه در این مرحله، با بکارگیری یکی از روش‌های موجود برای تحلیل ریسک، میانگین خسارت مالی ساختمان هم به شرط وقوع زلزله و هم با در نظر گرفتن عدم قطعیت در وقوع زلزله را به کاربر نمایش می‌دهد. روش مزبور در فصل‌های آتی شرح داده خواهد شد. سپس، نتایج حاصل از تحلیل ریسک در پایگاه اطلاعاتی ذخیره می‌گردد. بمنظور ایجاد سهولت در توسعه و نگهداری سامانه، مثلاً برای افزودن روش‌های تحلیل ریسک بروزتر به آن، برنامه نوشته شده ساختاری شیء‌گرا^۱ دارد. این ساختار به توسعه‌دهندگان آن اجازه خواهد داد تا بدون نیاز به ایجاد تغییر در متن اصلی برنامه، تغییرات مورد نیاز خود را بصورت اشیای^۲ جدید به آن بیفزایند.

^۱ Object-oriented

^۲ Objects

این پژوهش از دو بخش اصلی تشکیل شده است: بخش نخست، مطالعه و بررسی روش‌های تحلیل ریسک موجود، بکارگیری ترکیبی از این روش‌ها و انطباق آن با نوع ساخت‌وسازهای محدوده ارائه این خدمت می‌باشد. این بخش علمی پروژه را تشکیل می‌دهد. بخش دوم، طراحی و پیاده‌سازی یک سایت اینترنتی با امکان انجام تحلیل ریسک و ذخیره‌سازی داده در بانک اطلاعاتی است. این پایگاه اینترنتی به کاربر اجازه می‌دهد تا با وارد کردن مشخصات مورد نیاز تحلیل ریسک، نتایج علمی و در عین حال ملموس و قابل درک از آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان خود را مشاهده کند. این نتایج تحلیل ریسک به مرور زمان در بانک اطلاعاتی ذخیره گردیده و قابل گزارش‌گیری در هر لحظه می‌باشند. بدلیل عدم وجود فراگیر توابع توزیع شدت زلزله در سایر مناطق ایران، منطقه جغرافیایی تحت پوشش این پژوهش محدود به شهر تهران می‌شود.

۲-۱ پیشینه

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، این پروژه را می‌توان به دو حیطه تقریباً مجزا تقسیم نمود: نخست، بکارگیری یک روش تحلیل ریسک و انطباق آن با نوع ساخت‌وسازهای تهران و دوم، طراحی و پیاده‌سازی یک سامانه تحت وب بمنظور انجام تحلیل ریسک. بر اساس این تقسیم‌بندی، پیشینه پروژه را می‌توان در دو زمینه بررسی نمود: ابتدا بررسی تحقیقات صورت پذیرفته در زمینه‌های تحلیل خطر، تحلیل ریسک و ایجاد یک مدل خرابی برای نوع ساخت و سازهای ایران (و یا هر نقطه‌ای از ایران مانند تهران) و سپس، بررسی پیشینه نرم‌افزارها و سامانه تحلیل خطر و تحلیل ریسک لرزه‌ای. لازم به ذکر است که ایجاد یک مدل خرابی در حیطه این پروژه نبوده و صرفاً در این پژوهش از نتایج سایر تحقیقات علمی مرتبط استفاده خواهد شد.

نخستین تلاش‌ها در جهت انجام تحلیل خطر احتمالاتی به دهه ۱۹۶۰ میلادی باز می‌گردد. مقاله Cornell [۱]، آغازگر مسیر تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی^۱ قرار گرفت. نتایج این مقاله بصورت پارامترهای حرکت زمین، مانند پیشینه شتاب زمین بر حسب دوره بازگشت میانگین بود. نمودار حاصل از این پژوهش به نام منحنی خطر شناخته شد. این منحنی که در قالب احتمال شرطی بیان گردید، نشانگر نرخ فراگذشت مقادیر مختلف پیشینه شتاب زمین برای یک نقطه می‌باشد. این زمینه تحقیقاتی در ادامه مورد توجه بسیاری از دیگر محققان قرار گرفت و تحقیقات آن‌ها موجب پیشرفت‌های شگرفی در این زمینه گردید.

در سال ۱۹۸۰، ATC-13 [۲] روشی را برای محاسبه خسارت مالی حاصل از خرابی در ساختمان‌ها ارائه داد. مبنای این روش، محاسبه خرابی به شرط مقادیر مختلف مقیاس مرکالی اصلاح شده^۲ (MMI) برای شدت زلزله می‌باشد. خروجی حاصل از روش ATC-13 یک ضریب خرابی میانگین^۳ است. طبق تعریف ATC-13،

^۱ Probabilistic seismic hazard analysis

^۲ Modified Mercalli Intensity

^۳ Mean damage factor

ضریب خرابی به نسبت متوسط هزینه بازسازی سازه به هزینه جایگزینی سازه اطلاق می‌شود. در این تعریف، منظور از هزینه بازسازی هزینه لازم جهت بازگرداندن ساختمان به وضعیت قبل از خرابی خود است. همچنین هزینه جایگزینی برابر هزینه جایگزینی سازه با یک ساختمان هم‌نوع و مشابه خود می‌باشد. به همین منظور، ATC-13 ساختمان‌ها را بر اساس سیستم سازه‌ای تقسیم‌بندی و برای هر دسته یک «ماتریس خرابی-احتمال»^۱ بر مبنای نظر کارشناسان ارائه کرد. هر یک از اعداد این ماتریس، احتمال قرار گرفتن در یک حالت خرابی^۲ مشخص به شرط شدت زلزله را ارائه می‌دهد. با استفاده از قانون جمع احتمال می‌توان با جمع کردن حاصل ضرب احتمال‌های شرطی هر یک از حالت‌های خرابی در احتمال وقوع MMIها، احتمال هر حالت خرابی را بدست آورد.

در اواخر دهه ۱۹۹۰ میلادی، مدل‌های تحلیلی برای پیش‌بینی خرابی لرزه‌ای گسترش یافتند. آژانس مدیریت بحران آمریکا^۳ (FEMA) با همکاری انجمن ملی علوم ساختمان آمریکا^۴ (NIBS)، روش جدیدی در تخمین تلفات لرزه‌ای ارائه کردند [۳]. این روش جدید در نرم‌افزار HAZUS[®] مورد استفاده قرار گرفت. در این روش با استفاده از روش طیف ظرفیت^۵ [۴]، پاسخ جابجایی و شتاب سازه محاسبه می‌شود. خرابی نیز با استفاده از منحنی‌های شکنندگی^۶ محاسبه می‌شود. این منحنی‌ها احتمال فراگذشت خرابی از یک حالت خرابی مشخص را به شرط پاسخ سازه بدست می‌دهند.

در سال ۲۰۰۰، مرکز تحقیقات مهندسی زلزله پاسیفیک^۷ (PEER) روش جدیدی برای ارزیابی ریسک لرزه‌ای ارائه داد. این روش ابتدا توسط Cornel و Krawinkler [۵] و سپس توسط Moehle و Deierlein [۶] با جزئیات بیشتر و کامل‌تر ارائه شد. نتیجه این روش بدست آوردن منحنی کامل توزیع احتمال هزینه بازسازی است و برخلاف روش‌های ATC-13 و FEMA-NIBS، محدود به هزینه مورد انتظار نیست. مدل‌های استفاده شده در این روش شکل احتمال شرطی دارند. در هسته این روش، قانون جمع احتمال به شکل یک انتگرال سه‌گانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. توزیع‌های احتمالاتی درون این انتگرال موارد زیر را شامل می‌شوند: الف) توزیع شدت زلزله، ب) توزیع پاسخ سازه به شرط شدت زلزله ورودی، پ) توزیع خرابی به شرط پاسخ سازه و ت) توزیع خسارت به شرط خرابی.

^۱ Damage probability matrix

^۲ Damage state

^۳ U.S Federal Emergency Management Agency

^۴ U.S National Institute of Building Science

^۵ Capacity spectrum method

^۶ Fragility curves

^۷ Pacific Earthquake Engineering Research

تمامی روش‌های ذکر شده در بالا مدل‌های احتمالاتی را در قالب توابع توزیع احتمال شرطی بیان می‌کنند. به موازات این روش‌ها، روش‌های قابلیت اعتماد سازه مورد تحقیقات وسیعی بوده‌اند. قابلیت اعتماد سازه بر گسترش و بکارگیری روش‌های قابلیت اعتماد تمرکز می‌کند. این روش‌ها وسیله‌ای برای محاسبه احتمال وقوع رویدادهای مورد نظر می‌باشند. در حقیقت، به کمک این روش‌ها می‌توان بصورت دقیق احتمال رویدادهای نادری را بدست آورد که در ارزیابی ریسک لرزه‌ای حائز اهمیت می‌باشند. در سال ۲۰۱۳، Mahsuli و Haukaas [۷]، [۸] رویکرد جدیدی را برای ارزیابی ریسک سازه‌ها و زیرساخت‌ها^۱ تحت خطرات چندگانه ارائه کردند. در این رویکرد، از روش‌های قابلیت اعتماد و مدل‌های احتمالاتی متعدد برای محاسبه ریسک استفاده می‌شود.

در دهه اخیر، ارزیابی ریسک لرزه‌ای شهر تهران مورد مطالعه محققان بوده است. Mansouri و همکاران یک مدل تلفات لرزه‌ای را برای تهران توسعه دادند [۹]. مورد مطالعاتی آن‌ها منطقه ۱۷ تهران بود. در این پژوهش از دو نقشه متفاوت خطر لرزه‌ای استفاده شده است: (۱) نقشه‌های ریزمنطقه‌بندی^۲ احتمالاتی منتشر شده توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال و (۲) نقشه‌های ریزمنطقه‌بندی زلزله‌ای به بزرگای ۶/۷ در مقیاس گشتاوری تحت سناریوی گسل ری، منتشر شده توسط آژانس بین‌المللی همکاری ژاپن^۳ (JICA). به منظور دستیابی به توزیع انواع ساختمان‌های این منطقه نیز از نتایج تحقیقات مشترک پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و JICA استفاده شد. Mansouri و همکاران از چهار تابع آسیب‌پذیری سازه‌ای^۴ به شرح زیر استفاده کردند:

الف) تابع آسیب‌پذیری لرزه‌ای گزارش JICA برای چهار نوع ساختمان با سیستم سازه‌ای مشخص

ب) تابع آسیب‌پذیری لرزه‌ای با استفاده از روش ATC-13

پ) تابع آسیب‌پذیری سازه‌ای بدست آمده برای شهر کاستاریکا

ت) تابع آسیب‌پذیری مورد استفاده در نرم‌افزار HAZUS®

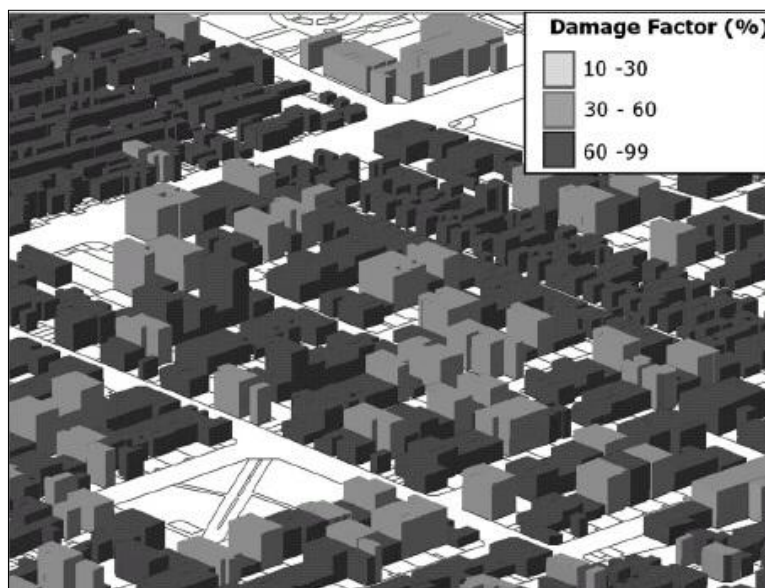
شکل ۳ نتیجه حاصل از این پژوهش می‌باشد و خسارت مالی ساختمان‌های بخشی از شهر را نشان می‌دهد.

^۱ Infrastructure

^۲ Micro-zonation

^۳ Japan International Cooperation Agency

^۴ Structural vulnerability function



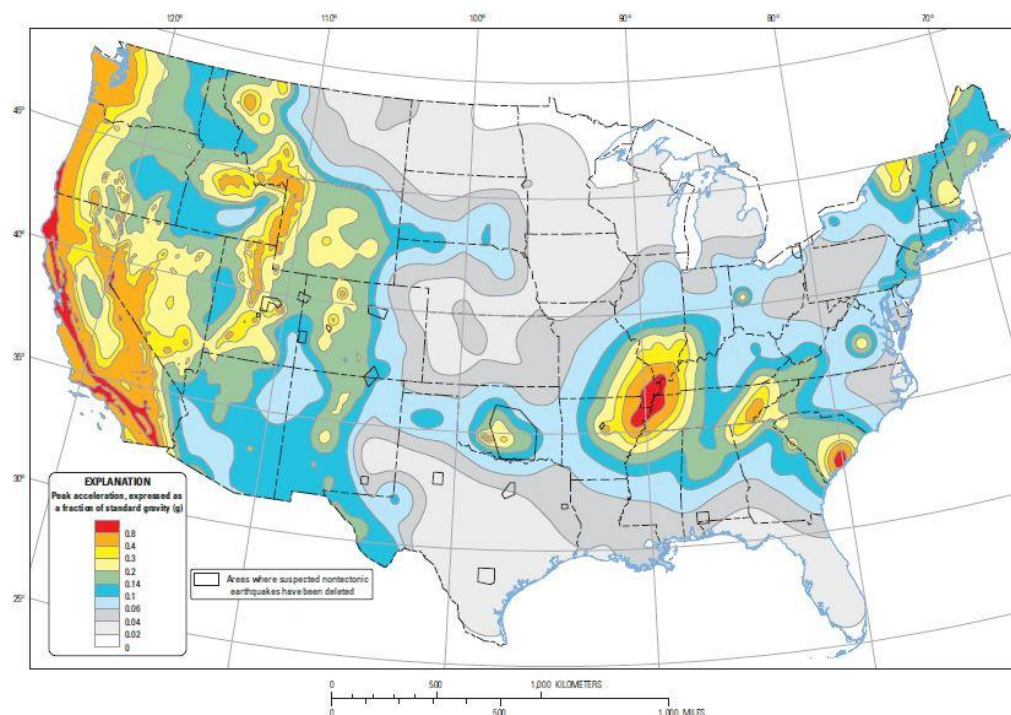
شکل ۳: نقشه سه بعدی خسارت مالی ساختمان های منطقه ۱۷ تهران [۹].

علاوه بر پژوهش Mansouri و همکاران که به آن اشاره شد، Ghodrati و همکاران [۱۰] نیز پژوهشی با عنوان «ارزیابی خطر لرزه ای کلان شهر تهران» منتشر نموده اند که در آن یک منحنی خطر برای نقطه ای از شهر تهران ایجاد شده است. هم چنین پژوهش Gholipour و همکاران [۱۱] با عنوان «تحلیل خطر لرزه ای ایران- فاز یک محدوده تهران بزرگ» به تحلیل خطر لرزه ای شهر تهران پرداخته و تعداد سه منحنی خطر لرزه ای برای نقاط مختلف تهران ارائه کرده است.

نخستین تلاش ها برای ارائه خدمات تحلیل ریسک و تحلیل خطر در قالب نرم افزاری توسط اداره زمین شناسی امریکا^۱ (USGS) انجام گرفت [۱۲]. برنامه خطرات زمین لرزه USGS، بخشی از برنامه ملی کاهش خطرات زلزله در امریکا، مصوب سال ۱۹۷۷ در کنگره این کشور بوده است. بهمین منظور، USGS تلاش های خود را در جهت ارائه گستره وسیعی از خدمات لرزه ای متمرکز کرده است. از جمله خدمات حال حاضر این اداره که بصورت اینترنتی ارائه می شود می توان به ارائه نقشه های فعالیت لرزه ای سراسر دنیا بویژه امریکا، ارائه نقشه های منطقه ای از منحنی های خطر امریکا، نقشه های احتمال فراگذشت زلزله با شدت یا بزرگای مشخص، منحنی های خطر سرتاسر امریکا به همراه طیف یکنواخت پاسخ خطر^۲ اشاره نمود شکل ۴ نمونه ای از نقشه های ارائه شده در سایت USGS است. این شکل بیانگر PGA متناظر با احتمال فراگذشت ۲٪ در ۵۰ سال در سرتاسر امریکا می باشد.

^۱ United States Geological Survey

^۲ Uniform hazard response spectrum



شکل ۴: نقشه PGA متناظر با احتمال فراگذشت ۲٪ در ۵۰ سال در امریکا [۱۲].

ارزیابی سریع از زمین‌لرزه‌های جهانی بمنظور اقدام^۱ (PAGER)، یکی از سیستم‌های ارائه شده توسط USGS می‌باشد [۱۳]. این سیستم با انجام ارزیابی بسیار سریع از زمین‌لرزه‌های رخ داده در سراسر دنیا در مدت کمتر از ۳۰ دقیقه، پس‌لرزه‌ها و سطوح خرابی را پیش‌بینی می‌نماید. این پیش‌بینی‌ها که مدام در حال بروزرسانی هستند، تنها شامل خرابی‌های مستقیم ناشی از زلزله شده و اثرات ثانویه آن مانند رانش زمین، سیل، سونامی، روان‌گرایی^۲ و ... را در بر نمی‌گیرد. شکل ۵ نقشه زمین‌لرزه‌های یک بازه هفت روزه را در سایت PAGER نشان می‌دهد. PAGER تمامی زمین‌لرزه‌ها را بر اساس میزان خرابی ناشی از آن‌ها در رنگ‌های مختلف به نمایش می‌گذارد.

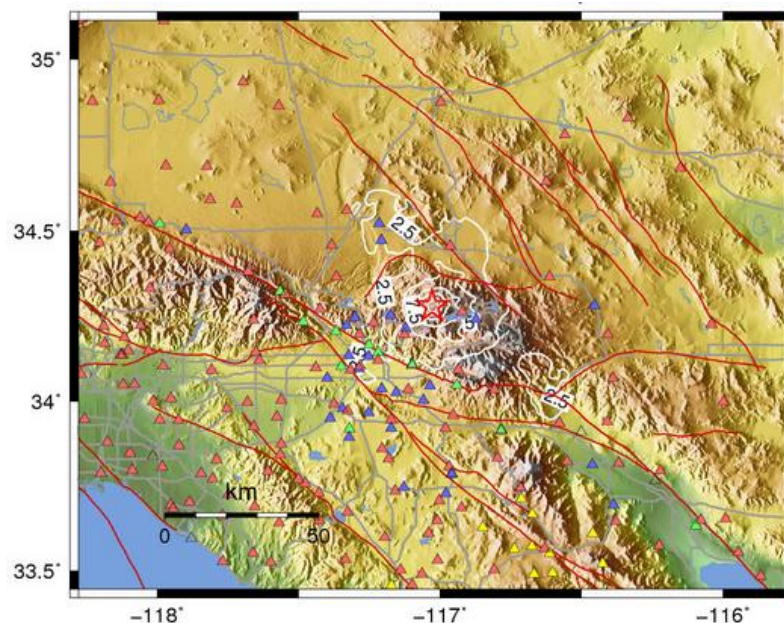
^۱ Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response

^۲ Liquefaction



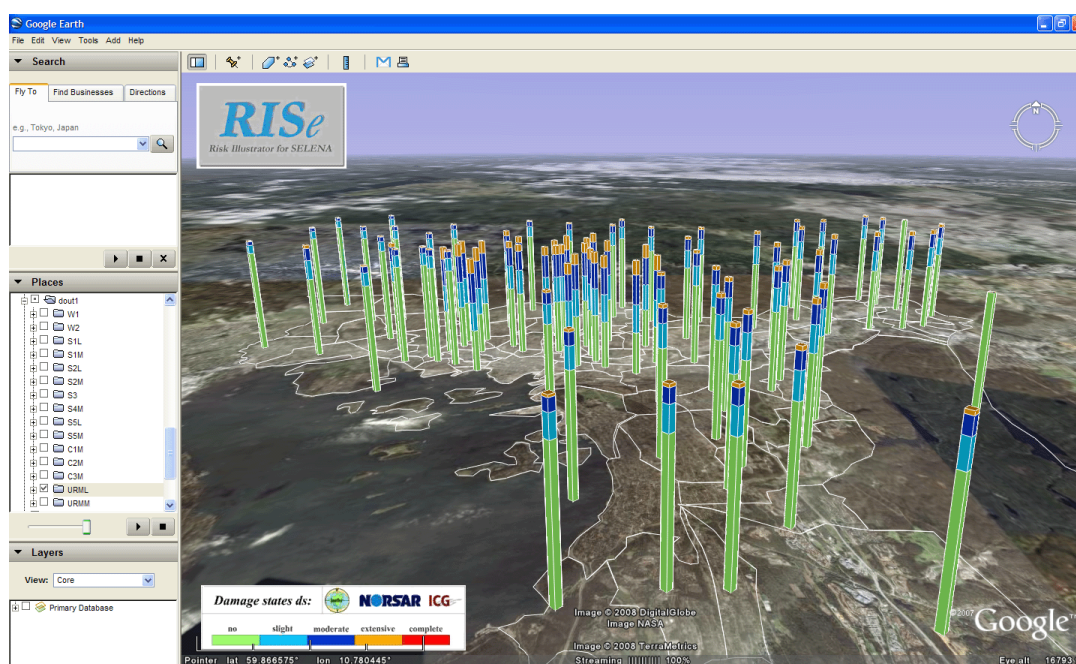
شکل ۵: نقشه زمین‌لرزه‌های یک بازه هفت روزه در سامانه PAGER [۱۳].

ShakeMap[®] نرم‌افزار دیگری از USGS است [۱۴]. این نرم‌افزار بر اساس شبکه لرزه‌ای امریکا پیاده‌سازی شده است. سایت‌های ShakeMap نقشه‌هایی نزدیک به واقعیت از حرکت زمین و شدت زمین‌لرزه پس از زلزله‌ای قابل توجه را ارائه می‌کند. این نقشه‌ها توسط سازمان‌های دولتی و خصوصی امریکا استفاده می‌شود. عمده استفاده نقشه‌های ShakeMap در موارد ایجاد آمادگی عمومی برای مدیریت بحران و عکس‌العمل مناسب پس از وقوع زمین‌لرزه، می‌باشد. شکل ۶ نمونه‌ای از نقشه‌های ShakeMaps است که در آن PGA ناشی از وقوع زلزله‌ای در کالیفورنیا را نشان می‌دهد.



شکل ۶: PGA نقاط مختلف در مقیاس %g ناشی از زمین‌لرزه‌ای در کالیفورنیا.

نرم افزار HAZUS[®] خروجی روش تحلیل ریسک FEMA-NIBS برای تخمین خرابی‌های بالقوه ناشی از زمین‌لرزه، سیل و طوفان می‌باشد [۱۵]. همان‌گونه که در پیشینه مختصراً توضیح داده شد، این نرم‌افزار با استفاده از فن‌آوری سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی^۱ (GIS)، تأثیرات فیزیکی، اقتصادی و اجتماعی بلایای طبیعی را برآورد می‌کند. این نرم‌افزار عمدتاً بعنوان ابزاری برای تعیین خسارات و اقتصادی‌ترین روش‌های حداقل رساندن این مخاطرات استفاده می‌شود. شکل ۷ نمایی از نرم‌افزار HAZUS[®] را نشان می‌دهد. در این تصویر احتمال قرارگیری در هر یک از حالت‌های خرابی پنج‌گانه FEMA-NIBS بصورت نمودار میله‌ای برای ساختمان‌های یک منطقه به نمایش درآمده است. این پنج حالت عبارتند از: بدون خرابی، خرابی خفیف، خرابی متوسط، خرابی شدید و خرابی کامل.



شکل ۷: نمایی از نرم‌افزار HASUS[®].

مدل جهانی زلزله^۲ (GEM)، عنوان انجمنی بین‌المللی است که در سال ۲۰۰۶ تحت نظر انجمن علوم جهانی سازمان همکاری و توسعه اقتصادی^۳ (OECD)، فعالیت خود را آغاز نمود. هدف نهایی این همکاری، تلاش در جهت توسعه، استفاده و به‌اشتراک گذاری ابزارها و منابع برای ارزیابی شفاف تر ریسک لرزه‌ای است. از جمله خروجی‌های GEM می‌توان به نرم‌افزار OpenQuake Engine[®] اشاره نمود. این نرم‌افزار متن-باز^۴

^۱ Geographical Information Systems

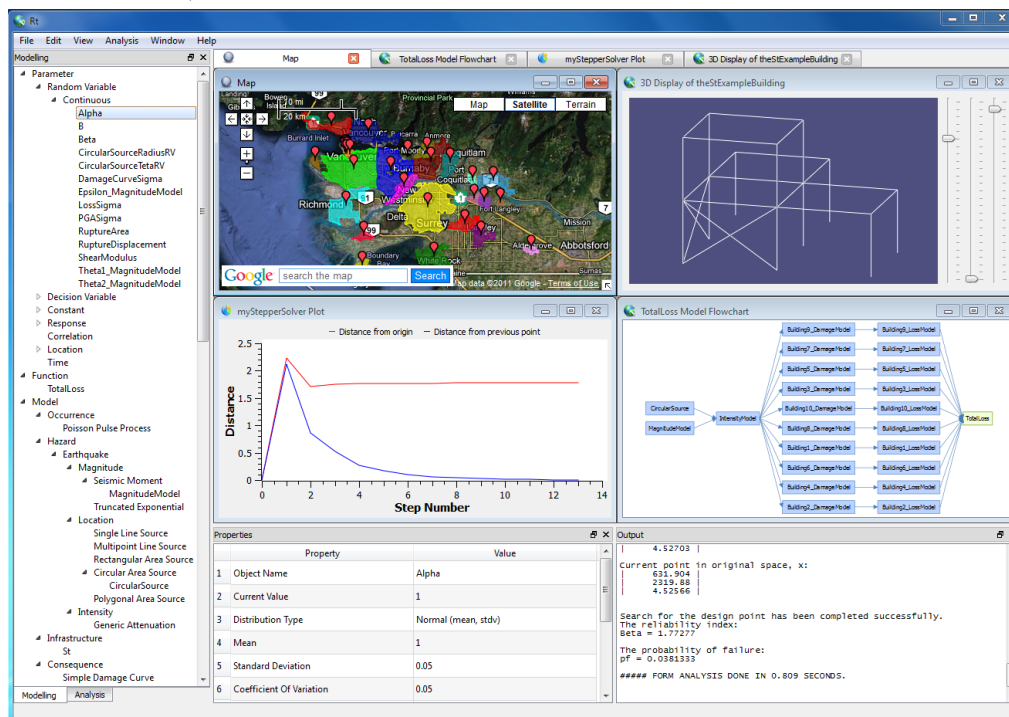
^۲ Global Earthquake Model

^۳ Organization of Economic Cooperation and Development

^۴ Open source

که نسخه آزمایشی آن منتشر شده است، ابزاری برای محاسبه خطر و ریسک زلزله است. استفاده از این نرم افزار بصورت آنلاین نیز امکان پذیر است.

Rt نام نرم افزاری رایانه ای برای تحلیل قابلیت اعتماد و بهینه سازی با استفاده از مدل های متعدد احتمالاتی است [۱۶]. تفاوت عمده این نرم افزار با سایر نرم افزارهای نام برده در رویکرد تحلیل ریسک آن است. مبنای تحلیل ریسک Rt روش های قابلیت اعتماد و مدل های احتمالاتی متعدد است. این نرم افزار، به صورت شیء گرا طراحی شده و بنابر این به سهولت قابل توسعه و نگهداری است. شکل ۸ نمایی از نرم افزار Rt را نشان می دهد.



شکل ۸: نمایی از نرم افزار Rt [۱۶].

۳-۱ ساختار گزارش

فصل ۲ اشاره کوتاهی به موضوع تحلیل خطر دارد. با توجه به این که انجام تحلیل خطر لرزه ای خارج از چارچوب این پروژه می باشد، در این فصل به ارائه توضیحاتی در خصوص نحوه بدست آوردن تابع چگالی احتمال بیشینه شتاب زمین از روی منحنی خطر، اکتفا می شود.

در فصل ۳ روش تحلیل ریسک موضوع بحث و بررسی قرار می گیرد. در این فصل ابتدا با توجه به شرح تاریخچه روش های تحلیل ریسک در مقدمه، به دو روش نسبتاً مشابه اشاره می شود. در خصوص هر یک از این روش ها فرآیند دقیق تحلیل ریسک لرزه ای و ملزومات و خروجی های آن ها تشریح می گردد. سپس فرآیند تحلیل ریسک مورد استفاده در سامانه تحت وب ایجاد شده توضیح داده می شود.

سامانه تحلیل ریسک CIRA^۱، موضوع فصل ۴ گزارش می‌باشد. این فصل دربرگیرنده قسمت دست‌نامه^۲ کاربران می‌باشد. در این بخش نحوه استفاده از CIRA توسط کاربر بصورت گام‌به‌گام توضیح داده می‌شود.

^۱ Civil Infrastructure Risk Analysis

^۲ Manual

فصل ۲: تحلیل خطر

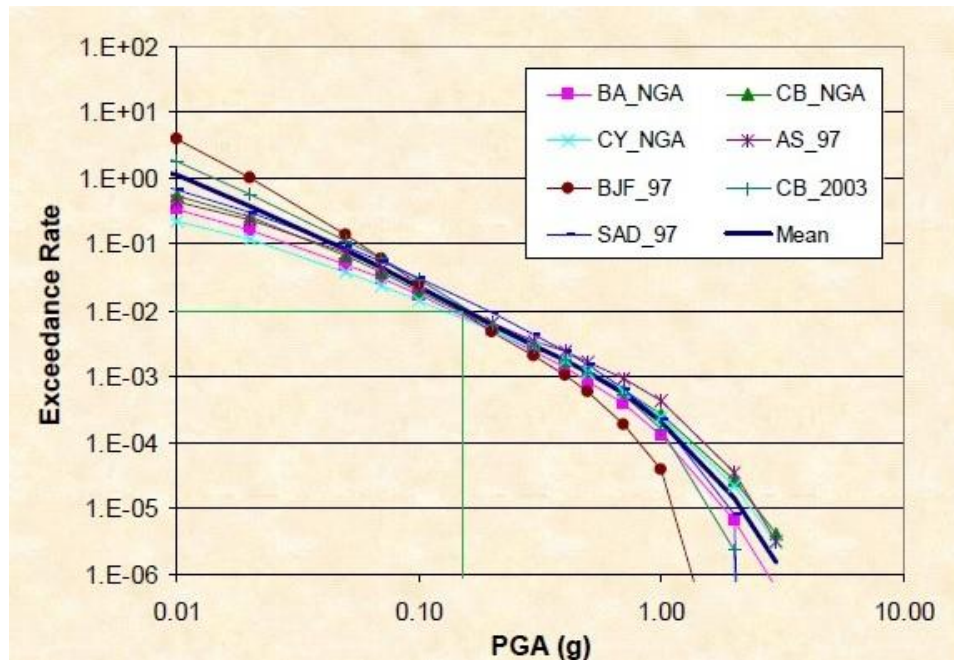
به طور کلی ارزیابی ریسک لرزه‌ای یک سازه، نیازمند بکارگیری یک رویکرد تحلیل خطر برای محاسبه توزیع احتمال شدت زلزله در محل سازه و یک رویکرد تحلیل ریسک جهت محاسبه توزیع احتمال خرابی می‌باشد. تابع چگالی احتمال شدت زلزله بعنوان ورودی روش تحلیل ریسک قلمداد می‌شود. در این فصل ابتدا به مفهوم منحنی خطر لرزه‌ای اشاره می‌شود. سپس نحوه بدست آوردن تابع چگالی احتمال بیشینه شتاب زمین با استفاده از منحنی خطر توضیح داده خواهد شد. در انتها نیز به روش بکاررفته در این پروژه بمنظور استفاده از توابع چگالی احتمال چند نقطه از شهر برای دست‌بازی به تابع چگالی احتمال نقطه‌ای خاص، اشاره خواهد شد.

۲-۱ منحنی خطر

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، منحنی خطر لرزه‌ای بیانگر نرخ فراگذشت بیشینه شتاب زمین در یک نقطه می‌باشد. این منحنی‌ها توسط یکی از روش‌های تحلیل خطر مانند PSHA^۱ [۱۷] و یا روش قابلیت اعتماد [۷]، [۸] محاسبه می‌شوند. از آن‌جا که تولید منحنی خطر خارج از حیطه این پروژه می‌باشد، استفاده از منحنی‌های خطر منتشر شده برای شهر تهران در دستور کار قرار دارد.

شکل ۹ یک نمونه منحنی خطر را نشان می‌دهد که برای نقطه‌ای از تهران ایجاد شده است. محور افقی این نمودار بیانگر بیشینه شتاب زمین و محور قائم آن نشانگر نرخ فراگذشت است. هر نقطه از این منحنی بیانگر نرخ فراگذشت زلزله با بیشینه شتاب متناظر در یک سال می‌باشد. برای مثال، نرخ فراگذشت برای زلزله‌ای با بیشینه شتاب $0.3g$ معادل 0.01 می‌باشد. به عبارت دیگر، زلزله‌هایی با شدت $0.3g$ یا شدیدتر به طور متوسط 0.01 مرتبه در سال (یک مرتبه در ۱۰۰ سال) روی می‌دهند.

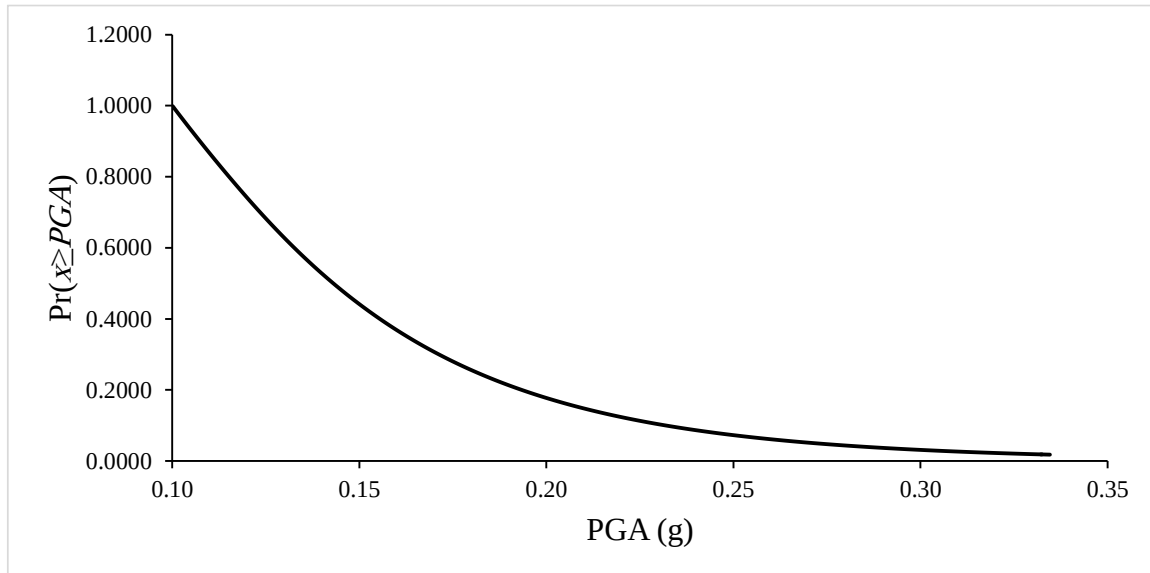
^۱ Probabilistic seismic hazard analysis



شکل ۹: منحنی خطر برای نقطه‌ای از تهران [۱۱].

بمنظور دست‌یابی به تابع چگالی احتمال فراگذشت بیشینه شتاب زمین، ابتدا می‌بایست تابع مکمل توزیع احتمال تجمعی^۱ (CCDF) بیشینه شتاب زمین را از روی منحنی خطر بدست آوریم. به همین منظور، ابتدا یک حد پایین برای مقادیر بیشینه شتاب در نظر می‌گیریم. این حد پایین به گونه‌ای انتخاب می‌شود تا زلزله‌هایی که منجر به خرابی محسوس در ساختمان‌ها نمی‌شوند را از محاسبات کنار بگذارد. سپس مقادیر نمودار را به نرخ فراگذشت متناظر با حد پایین انتخاب شده تقسیم می‌کنیم. این منحنی نرمال‌شده نشانگر احتمال وقوع زلزله با PGA بزرگتر یا مساوی هر مقدار مورد نظر را نشان می‌دهد. نمونه‌ای از این منحنی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق این شکل، احتمال وقوع زلزله‌ای با شدت 0.1 g یا بیشتر برابر با ۱ است. بنابراین، منحنی مذکور بیانگر تابع توزیع احتمال شدت به شرط وقوع زلزله‌ای با PGA بزرگتر از 0.1 g است. نرخ فراگذشت استخراج شده نیز بیانگر نرخ وقوع زلزله‌هایی با شدت حداقل 0.1 g می‌باشد. به کمک نرخ فراگذشت حد پایینی PGA که منحنی خطر به آن تقسیم گردید، می‌توان خروجی‌های تحلیل ریسک مشروط به وقوع زلزله را به خروجی‌های تحلیل ریسک مربوط به یک بازه زمانی مشخص، تبدیل نمود. نحوه استفاده از این عدد و توضیحات بیشتر در خصوص خروجی‌های تحلیل ریسک در قسمت ۳-۳-۱ بیان گردیده است.

^۱ Complementary Cumulative Distribution Function



شکل ۱۰: نمودار تابع مکمل توزیع احتمال تجمعی (CCDF) بیشینه شتاب زمین.

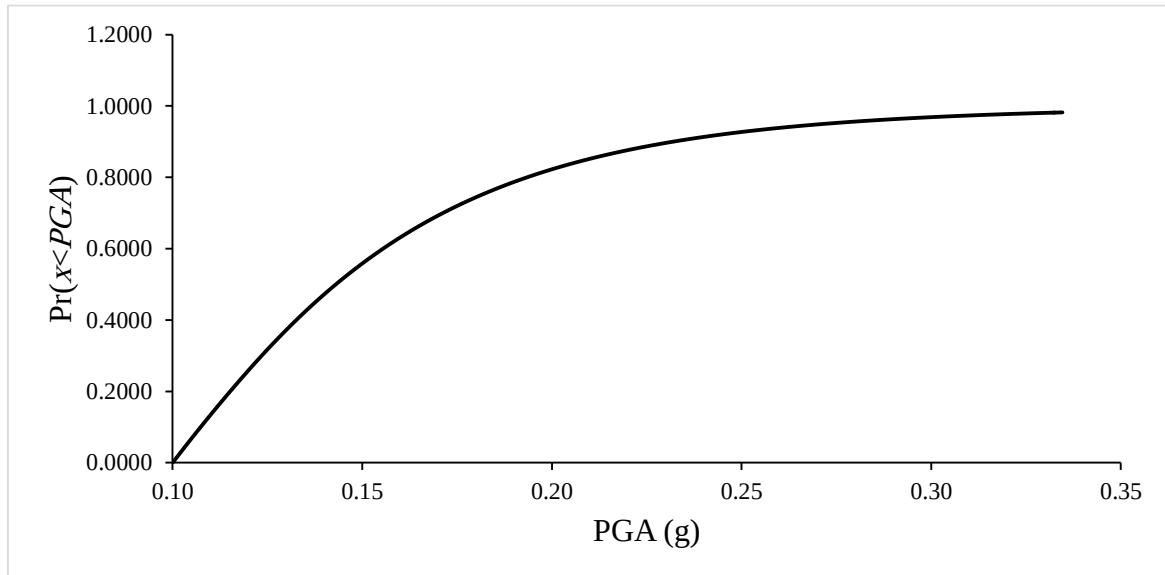
با استفاده از تابع CCDF، می‌توان تابع توزیع تجمعی احتمال بیشینه شتاب زمین^۱ (CDF) را بدست آورد. تابع CDF، بیانگر احتمال وقوع بیشینه شتاب کمتر از مقدار PGA است. معادله (۱) نحوه محاسبه مقادیر تابع CDF از روی مقادیر تابع CCDF را نشان می‌دهد.

$$(۱) \quad F(x) = P(x < PGA) = 1 - P(x \geq PGA) = 1 - G(x)$$

در این معادله $F(x)$ تابع CDF و $G(x)$ تابع CCDF می‌باشند. شکل ۱۱ نمودار تابع CDF بیشینه شتاب زمین را نشان می‌دهد. این منحنی کاملاً مشابه منحنی تابع CCDF می‌باشد؛ با این تفاوت که اعداد محور قائم آن بیانگر احتمال وقوع زلزله‌ای با شدت کمتر از مقدار PGA متناظر را نشان می‌دهد. بعبارت دیگر در شکل ۱۱، احتمال وقوع زلزله‌ای که بیشینه شتاب آن کمتر از $0.1g$ باشد برابر صفر است. با توجه به این که مقدار تابع CDF در هر نقطه برابر سطح زیر منحنی تابع توزیع احتمال تا آن نقطه می‌باشد، تابع چگالی احتمال بیشینه شتاب زمین، از رابطه زیر بدست می‌آید:

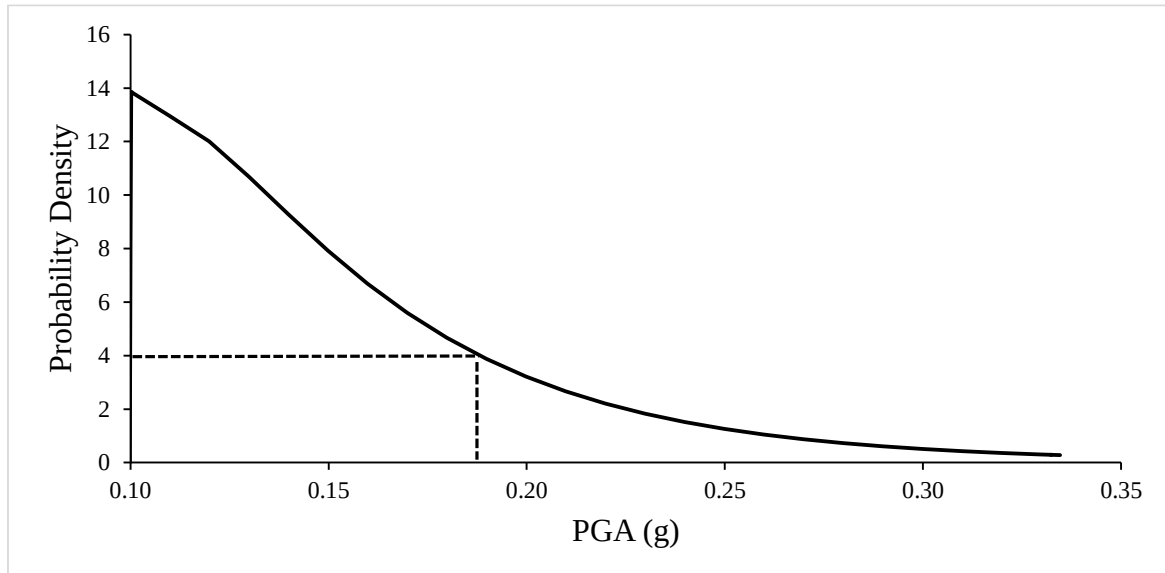
$$(۲) \quad f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$$

^۱ Cumulative Distribution Function



شکل ۱۱: نمودار تابع توزیع احتمال تجمعی (CDF) بیشینه شتاب زمین.

در معادله (۲)، $f(x)$ بیانگر تابع چگالی احتمال^۱ (PDF) بیشینه شتاب زمین می‌باشد. شکل ۱۲ نمودار تابع چگالی احتمال بیشینه شتاب زمین را نشان می‌دهد. محور افقی نمودار مانند نمودارهای CDF و CCDF بیانگر بیشینه شتاب زمین است، اما محور قائم آن نشانگر چگالی احتمال وقوع زلزله با شدت PGA متناظر می‌باشد. در شکل ۱۲، چگالی احتمال وقوع زمین‌لرزه‌ای با PGA معادل ۰/۱۹ برابر با ۴ می‌باشد.



شکل ۱۲: نمودار تابع چگالی احتمال (PDF) بیشینه شتاب زمین.

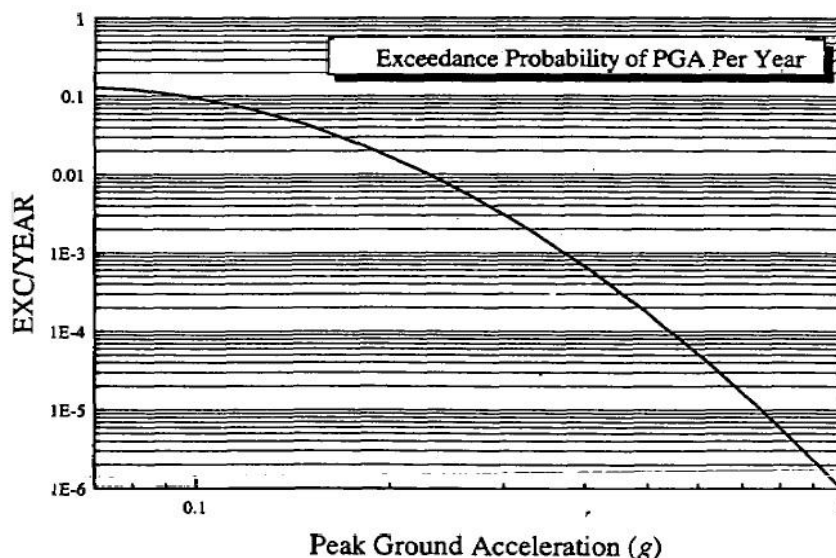
^۱ Probability Distribution Function

۲-۲ روش‌شناسی تحلیل خطر

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، انجام تحلیل خطر لرزه‌ای بمنظور دستیابی به منحنی خطر، از چارچوب این پروژه فراتر می‌باشد. از این‌رو آنچه تحت عنوان روش‌شناسی تحلیل خطر مطرح می‌گردد، نحوه استفاده از منحنی‌های خطر موجود در منابع معتبر علمی است.

مطلوب‌نهایی در این سامانه، استفاده از بهترین برآورد از منحنی خطر برای ساختمان مورد ارزیابی ریسک لرزه‌ای می‌باشد. از آن‌جا که در این پروژه موقعیت جغرافیایی ساختمان‌ها به شهر تهران محدود شده است، می‌بایست تعداد زیادی منحنی خطر برای نقاط مختلف شهر تهران در دسترس باشند. این منحنی‌ها برای شبکه‌ای متراکم از نقاط مختلف شهر از پیش تعیین گردیده و در سرور ذخیره می‌شوند. سپس با توجه به موقعیت ساختمان، سیستم نزدیک‌ترین منحنی خطر را مبنای تحلیل ریسک قرار می‌دهد.

با توجه به تحقیقات انجام پذیرفته در ادبیات فنی، در حال حاضر تعداد منحنی‌های خطر تولیدشده برای شهر تهران که بصورت رسمی انتشار یافته‌اند، بسیار اندک می‌باشد. به همین منظور، تخصیص تعداد زیادی منحنی به شبکه نقاط از پیش تعیین شده، عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد. از این‌رو در فاز نخست این پروژه، از ۴ منحنی خطر موجود در ادبیات فنی استفاده می‌شود. ارزیابی منحنی خطر برای محل ساختمان مورد نظر نیز به این صورت است که منحنی خطر نزدیک‌ترین نقطه موجود در سرور، به آن اختصاص داده می‌شود. علی‌رغم ایرادات فراوان علمی وارد به این برآورد، در حال حاضر راهی بجز انجام آن نیست. منحنی‌های مورد استفاده در این مرحله مربوط به تحقیقات Gholipour و همکاران [۱۱] (سه منحنی) و Ghodrati و همکاران [۱۰] (یک منحنی) می‌شود. شکل ۱۳ یک نمونه از منحنی‌های خطر استفاده شده در سامانه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: منحنی خطر لرزه‌ای برای یک نقطه از شهر تهران [۱۰].

فصل ۳: تحلیل ریسک

هدف از تحلیل ریسک در این سامانه، ارائه میانگین احتمال فراگذشت خرابی و یا تلفات لرزه‌ای می‌باشد. این میانگین در دو صورت به شرط وقوع زلزله و در طول یک بازه زمانی می‌باشد. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، دو روش PEER و قابلیت اعتماد قادر به ارائه این خروجی می‌باشند. اما استخراج این میانگین با استفاده از روش‌های FEMA-NIBS و ATC-13 به تنهایی میسر نمی‌باشد. برای این منظور می‌بایست خروجی این روش با استفاده از سایر روش‌های ادبیات فنی ترکیب شود. با توجه به حجم سنگین محاسبات روش‌های PEER و قابلیت اعتماد، در این پروژه کارشناسی با استفاده از روش FEMA-NIBS و ترکیب آن با مقالات موجود در ادبیات فنی، تمرکز می‌شود. در این فصل، ابتدا روش ATC-13 به عنوان اولین ضوابط آیین‌نامه‌ای برای تحلیل ریسک لرزه‌ای بیان می‌شود. علی‌رغم عدم استفاده از این روش در پژوهش پیش‌رو، از آنجا که ATC-13 مبنای بسیاری از ضوابط ارائه شده در سال‌های بعدی می‌باشد، ارائه تصویری از آن در این فصل ضروری می‌نماید. در ادامه، روش FEMA-NIBS که تکامل یافته روش ATC-13 و پایه روش مورد استفاده در این پژوهش است، ارائه می‌شود. در پایان، تلفیق روش FEMA-NIBS با ادبیات فنی که منجر به تولید میانگین خسارت مالی در دو صورت بیان‌شده می‌گردد، تبیین می‌شود.

۳-۱ روش ATC-13

نخستین روشی که بمنظور تحلیل ریسک لرزه‌ای مورد مطالعه این پژوهش قرار گرفت، روش ارائه شده توسط شورای فناوری‌های کاربردی امریکا^۱ موسوم به ATC-13 [۲] بود. این روش که نخستین بار در سال ۱۹۸۵ و تحت نظارت آژانس فدرال مدیریت بحران امریکا^۲ ارائه شد، پیرامون جمع‌آوری داده‌های ارزیابی خرابی برای ایالت کالیفرنیا بود.

^۱ Applied Technology Council

^۲ Federal Emergency Management Agency

همانگونه که در مقدمه بصورت خلاصه اشاره شد، مبنای تحلیل ریسک روش ATC-13، قانون جمع احتمال می‌باشد. بر طبق این روش، با داشتن ماتریس احتمال-خرابی و منحنی خطر لرزه‌ای، امکان محاسبه احتمال قرار گرفتن در هر یک از حالت‌های خرابی میسر می‌باشد. در این جا لازم است توضیح مجددی در خصوص این مفاهیم ارائه گردد.

ATC-13 تمامی ساختمان‌ها را با توجه به نوع مصالح و سیستم باربری آن‌ها، در ۴۰ دسته تقسیم می‌کند. در ادامه برای هر یک از این گروه‌ها، یک ماتریس احتمال-خرابی ارائه می‌دهد. درایه های این ماتریس، $P(DS_j|I_i)$ ، بیانگر احتمال قرارگیری سازه در حالت خرابی، $P(DS_j)$ ، به شرط شدت I_i می‌باشد. منظور از حالت خرابی^۱ در این روش، متغیری کیفی برای بیان میزان خرابی سازه است. با توجه به شدت خرابی سازه، می‌توان آن را در یکی از هفت سطح خرابی تعریف شده دسته‌بندی کرد. مقیاس شدت زلزله در این روش نیز مرکالی اصلاح شده (MMI) می‌باشد.

با داشتن منحنی خطر و ماتریس احتمال-خرابی، قانون جمع احتمال، احتمال قرارگیری سازه در هر حالت خرابی را به صورت زیر تعیین می‌کند:

$$(۳) \quad P(DS_j) = \sum_{i=VI}^{XII} P(DS_j | I_i) P(I_i)$$

در معادله (۳)، $P(I_i)$ بیانگر مقدار چگالی احتمال زلزله با شدت i در مقیاس MMI می‌باشد. این مقدار چگالی احتمال از PDF شدت وقوع زلزله بدست می‌آید. نمونه ای از ماتریس احتمال-خرابی برای یک سازه ساختمانی دیوار برشی بتنی مسلح با ارتفاع کوتاه در جدول ۱ نمایش داده شده است. خانه های خالی این جدول متناظر با سطوح احتمال قابل صرف نظر می باشند. توجه شود که در معادله (۳)، تنها شدت های VI تا XII در محاسبه استفاده شده اند، زیرا فرض شده است که شدت های کوچک تر از آن منجر به خرابی محسوسی در سازه نمی شوند. ماتریس های احتمال-خرابی پیشنهاد شده در ATC-13 برای نوع ساخت و ساز کالیفرنیا تهیه شده‌اند. به منظور استفاده از این اطلاعات برای ساختمان های شهر تهران، می‌توان از روش‌ها موجود در ادبیات فنی برای در نظر گیری کیفیت پایین تر ساخت و ساز استفاده نمود که در ادامه به تفصیل مورد بحث قرار خواهد گرفت.

^۱ Damage state

جدول ۱: نمونه‌ای از ماتریس خرابی-احتمال [۲].

Damage States	Modified Mercalli Intensity						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
None	18.1	-	-	-	-	-	-
Slight	69.8	17.8	0.6	-	-	-	-
Light	12.1	82.2	97.7	71.8	14.6	0.3	-
Moderate	-	-	-	28.2	83.2	68.8	29.4
Heavy	-	-	-	-	2.2	30.9	70.4
Major	-	-	-	-	-	-	0.2
Destroyed	-	-	-	-	-	-	-

در ATC-13، هر حالت خرابی متناظر با یک نسبت خرابی می باشد. همانطور که پیشتر اشاره شد، نسبت خرابی عبارت است نسبت هزینه بازسازی به هزینه جایگزینی سازه. در مجموع هفت حالت خرابی در این ضوابط در نظر گرفته شده که به همراه نسبت خرابی نظیر آنها، η_i ، در جدول ۲ نمایش داده شده اند. با در دست داشتن احتمال قرارگیری در هر حالت خرابی از معادله (۳) و نیز نسبت‌های خرابی نظیر هر حالت از جدول ۲، می توان نسبت خرابی مورد انتظار^۱ برای ساختمان را این گونه محاسبه نمود:

$$(۴) \quad \eta = \sum_{j=1}^7 P(DS_j) \eta_i$$

در پایان، با ضرب کردن نسبت خرابی مورد انتظار، η ، که از معادله (۴) بدست می آید، در ارزش سازه، هزینه خرابی مورد انتظار سازه محاسبه می گردد.

جدول ۲: سطوح خرابی هفت گانه ATC-13 به همراه ضریب خرابی متناظر هر سطح [۲].

Damage State	Damage Ratio (η_i)
1-None	0.000
2- Slight	0.005
3- Light	0.050
4- Moderate	0.200
5- Heavy	0.450
6- Major	0.850
7- Destroyed	1.000

^۱ Expected damage ratio

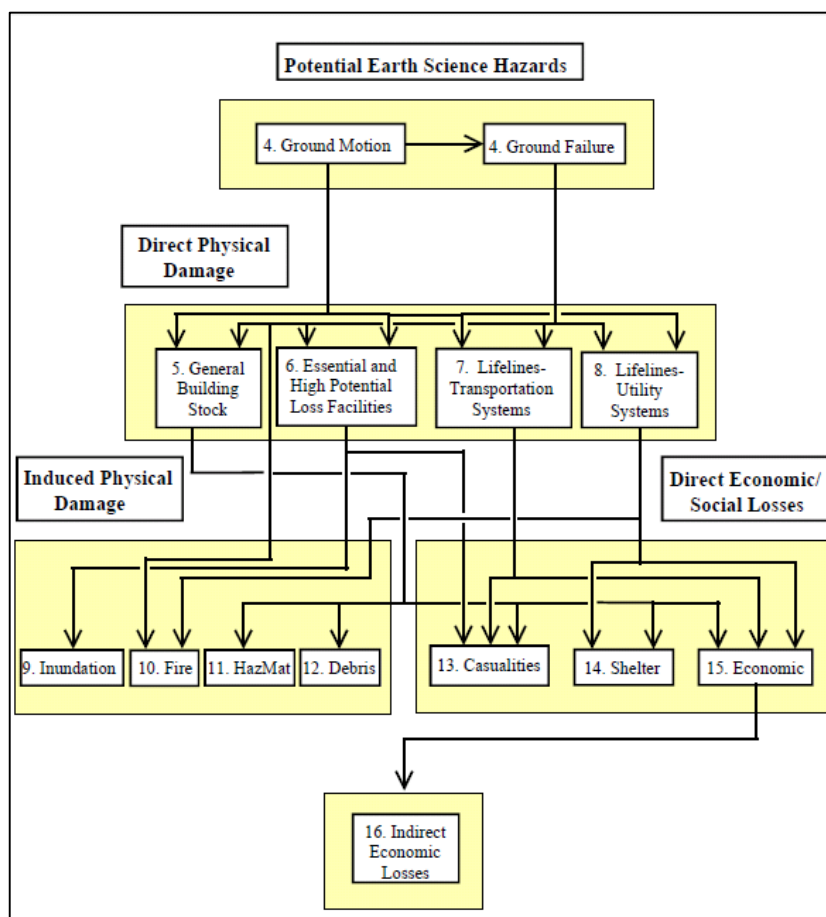
۳-۲ روش FEMA-NIBS

روش بعدی تحلیل ریسک که در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته است، روش «ارزیابی خرابی تحت خطرات چندگانه»^۱، ارائه شده توسط آژانس مدیریت بحران مرکزی امریکا (FEMA) و تحت همکاری انستیتو ملی علوم ساختمان امریکا^۲ (NIBS) می‌باشد [۳]. این روش که خروجی آن بصورت نرم‌افزار HAZUS® در سال ۲۰۰۳ ارائه گردید، نسبت به روش ATC-13 پیشرفته‌تر می‌باشد.

شکل ۱۴، فلوچارت کلی روش تحلیل ریسک لرزه‌ای FEMA-NIBS را نشان می‌دهد. در این روش، ابتدا خطرات بالقوه زمین شناسایی و تعیین می‌شوند. این خطرات همان خرابی‌های زمین هستند که در اثر حرکات زمین بوجود می‌آیند. با تعیین حرکات و خطرات زمین، روش تحلیل ریسک FEMA-NIBS، امکان بدست آوردن خرابی‌های فیزیکی مستقیم را فراهم می‌سازد. این خرابی‌ها شامل خرابی‌های ایجاد شده در تمامی اجزای ساختمان از جمله اجزای حساس به جابجایی و اجزای حساس به شتاب می‌باشد. لازم به ذکر است که روش FEMA-NIBS بسیار فراتر از حیطه ساختمان و خرابی‌های وارد بر آن در زلزله بوده و شامل تمامی زیرساخت‌های شهری از جمله خطوط انتقال، سد، سیستم‌های حمل‌ونقل و... می‌باشد. در ادامه این روش خرابی‌های ثانویه ناشی از زلزله مانند آتش‌سوزی، آوارریزی، ازدحام ناگهانی جمعیت و... مورد تحلیل قرار می‌گیرند. خرابی‌های مستقیم و غیرمستقیم اقتصادی و اجتماعی نیز، خروجی نهایی روش FEMA-NIBS است. با توجه به تمرکز این پروژه بر تحلیل خطر لرزه‌ای ساختمان‌ها، موارد مربوط به ساختمان‌ها روش FEMA-NIBS مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. هم‌چنین از بین این موارد، تنها خطرات شامل خرابی‌های مستقیم ناشی از زلزله مدنظر می‌باشد؛ چرا که بررسی سایر مخاطرات در حیطه فاز نخست این پژوهش نیست.

^۱ Multi-hazard loss estimation methodology

^۲ National Institute of Building Science



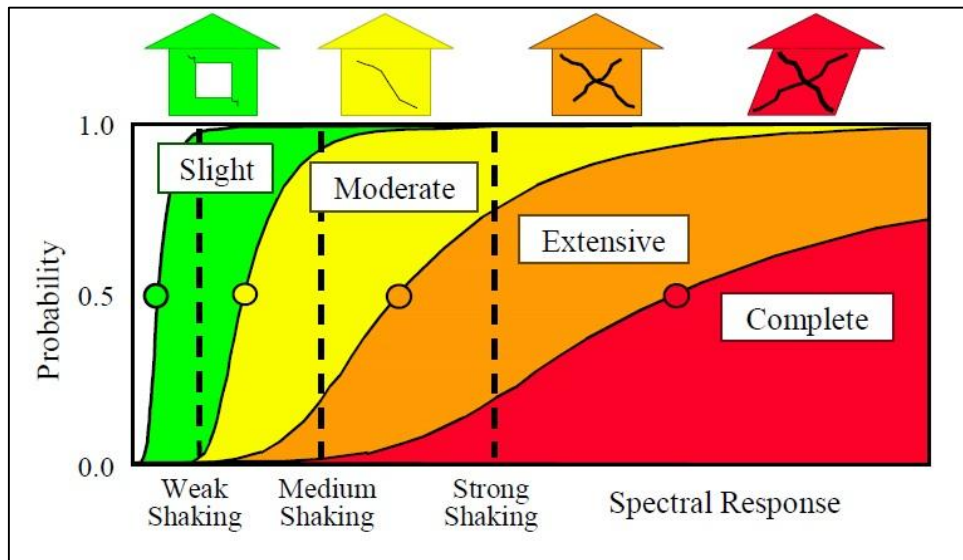
شکل ۱۴: فلوچارت روش ارزیابی خرابی زلزله FEMA-NIBS [۳].

در روش FEMA-NIBS، توابع خرابی ساختمان در قالب منحنی‌های شکنندگی^۱ لاگ‌نرمال^۲ می‌باشند. این منحنی‌ها نشان‌دهنده احتمال قرار گرفتن در یک حالت خرابی و یا فراگذشت از آن، برای یک پارامتر تقاضا از خطرات بالقوه علوم زمین (PESH)^۳، مانند جابجایی طیف پاسخ، می‌باشد. تعریف حالت خرابی در این روش، مشابه روش ATC-13 می‌باشد، با این تفاوت که FEMA-NIBS چهار حالت خرابی برای ساختمان در نظر می‌گیرد. شکل ۱۵ یک نمونه شماتیک از منحنی شکنندگی تعریف شده در FEMA-NIBS برای چهار حالت خرابی تعریف شده را نشان می‌دهد.

^۱ Fragility curves

^۲ Lognormal

^۳ Potential earth science hazards



شکل ۱۵: نمونه‌ای از منحنی شکنندگی برای چهار حالت خرابی تعریف شده توسط FEMA-NIBS [۳].

هر منحنی شکنندگی بوسیله یک مقدار میانه^۱ از پارامتر تقاضای PESH که با آستانه حالت خرابی مطابق است، و هم چنین تغییرپذیری متناظر با حالت خرابی، تعریف می‌شود. احتمال شرطی قرار گرفتن و یا فراگذشت از یک حالت خرابی مشخص، ds ، به شرط PGA و یا هر پارامتر تقاضای PESH دیگر، از معادله زیر بدست می‌آید:

$$(۵) \quad P(ds_j | PGA) = \Phi \left(\frac{1}{\beta_j} \ln \left(\frac{PGA}{m_j} \right) \right)$$

در معادله (۵)، مقدار میانه پارامتر PGA است که در آن ساختمان به آستانه حالت خرابی ds_j می‌رسد. هم چنین β_j انحراف معیار لگاریتم طبیعی بیشینه شتاب زمین برای حالت خرابی ds_j و Φ تابع توزیع تجمعی استاندارد نرمال^۲ می‌باشد. پارامترهای β_j و m_j بر اساس نوع تقسیم‌بندی ساختمان، سطح طراحی لرزه‌ای آیین‌نامه‌ای و پارامتر تقاضای PESH توسط FEMA-NIBS ارائه می‌شوند. توضیح نوع تقسیم‌بندی ساختمان‌ها و سطح طراحی لرزه‌ای آیین‌نامه‌ای در ادامه آورده شده است.

تقسیم‌بندی ساختمان‌ها در FEMA-NIBS بر اساس جنس مصالح اجزای سازه‌ای، سیستم باربری و ارتفاع ساختمان می‌باشد. بر این اساس تمامی ساختمان‌ها در یکی از دسته‌های ۳۶ گانه این تقسیم‌بندی قرار خواهند گرفت. جدول ۳ تقسیم‌بندی انواع ساختمان‌ها در FEMA-NIBS را نشان می‌دهد. توضیح کیفی ویژگی‌های چهار حالت خرابی خفیف، متوسط، گسترده و کامل^۳، در اثر وقوع در هر یک از دسته‌بندی‌های ۳۶ گانه

^۱ Median value

^۲ Standard normal cumulative distribution function

^۳ Slight, moderate, extensive and complete

ساختمانی، در FEMA-NIBS به تفصیل بیان شده است. بر اساس این تعاریف می توان بعنوان نمونه، درک شهودی از حالت خرابی گسترده در ساختمان فولادی قاب خمشی بلندمرتبه داشت.

جدول ۳: تقسیم‌بندی انواع ساختمان‌ها در FEMA-NIBS [۳].

No.	Label	Description	Height			
			Range		Typical	
			Name	Stories	Stories	Stories
1	W1	Wood, Light Frame (< 5,000 sq. ft.)	-	1-2	1	14
2	W2	Wood, Commercial and Industrial (> 5,000 sq. ft.)	-	-	2	24
3	S1M	Steel Moment Braced	Low-Rise	1-3	2	24
4	S1L		Mid-Rise	4-7	5	60
5	S1H		High-Rise	8+	13	156
6	S2M	Steel Braced Frame	Low-Rise	1-3	2	24
7	S2L		Mid-Rise	4-7	5	60
8	S2H		High-Rise	8+	13	156
9	S3	Steel Light Frame	-	All	1	15
10	S4L	Steel Frame with Cast-in-Place Concrete Shear Walls	Low-Rise	1-3	2	24
11	S4M		Mid-Rise	4-7	5	60
12	S4H		High-Rise	8+	13	156
13	S5L	Steel Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1-3	2	24
14	S5M		Mid-Rise	4-7	5	60
15	S5H		High-Rise	8+	13	156
16	C1L	Concrete Moment Frame	Low-Rise	1-3	2	20
17	C1M		Mid-Rise	4-7	5	50
18	C1H		High-Rise	8+	12	120
19	C2M	Concrete Shear Wall	Low-Rise	1-3	2	20
20	C2L		Mid-Rise	4-7	5	50
21	C2H		High-Rise	8+	12	120
22	C3L	Concrete Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1-3	2	20
23	C3M		Mid-Rise	4-7	5	50
24	C3H		High-Rise	8+	12	120
25	PC1	Precast Concrete Tilt-Up Walls	-	All	1	15
26	PC2L	Precast Concrete Frame with Concrete Shear Walls	Low-Rise	1-3	2	20
27	PC2M		Mid-Rise	4-7	5	50
28	PC2H		High-Rise	8+	12	120
29	RM1L	Reinforced Masonry Bearing Walls with Wood or Metal Deck Diaphragms	Low-Rise	1-3	2	20
30	RM1M		Mid-Rise	4+	5	50
31	RM2L	Reinforced Masonry Bearing Walls with Precast Concrete Diaphragms	Low-Rise	1-3	2	20
32	RM2M		Mid-Rise	4-7	5	50
33	RM2H		High-Rise	8+	12	120
34	URM1L	Unreinforced Masonry Bearing Walls	Low-Rise	1-3	1	15
35	URM1M		Mid-Rise	4+	3	35
36	MH	Mobile Homes	-	All	1	10

FEMA-NIBS ساختمان‌ها را بر اساس آیین‌نامه لرزه‌ای مبنای طراحی، به چهار گروه Low-Pre-Code، Moderate-Code و High-Code تقسیم می‌کند. با توجه به این که تغییرات آیین‌نامه‌های لرزه‌ای امریکا در سال‌های مشخصی رخ داده است، ملاک این دسته‌بندی می‌تواند سال ساخت باشد. هم‌چنین این آیین‌نامه به کاربران حرفه‌ای اجازه می‌دهد تا انتخاب سطح آیین‌نامه‌ای لرزه‌ای ساختمان را بر اساس سطح لرزه‌ای تعیین شده با توجه به سال ساخت و هم‌چنین کیفیت ساخت تعیین نمایند. این قابلیت بصورت یک ماتریس 3×3 در FEMA-NIBS ارائه گردیده است. جدول ۴ رابطه توأمان کیفیت ساخت یا همان سطح عملکرد لرزه‌ای با سطح طراحی لرزه‌ای بر سطح آیین‌نامه مد نظر FEMA-NIBS را نشان می‌دهد. بر طبق این جدول، بعنوان مثال ساختمانی که با توجه به سال ساخت و آیین‌نامه لرزه‌ای مورد استفاده در طراحی در سطح طراحی لرزه‌ای High-Code قرار می‌گرفته است، با توجه به کیفیت پایین ساخت آن (Inferior)، نهایتاً در سطح آیین‌نامه‌ای Moderate-Code به شمار می‌رود.

جدول ۴: ماتریس 3×3 تعیین سطح آیین‌نامه با توجه به سطح طراحی لرزه‌ای و کیفیت ساخت [۳].

Seismic Design Level	Seismic Performance Level		
	Superior	Ordinary	Inferior
High	High Code	High-Code	Moderate-Code
Moderate	Moderate-Code	Moderate-Code	Low-Code
Low	Low-Code	Low-Code	Pre-Code

همان‌گونه که پیشتر اشاره گردید، با مشخص شدن نوع ساختمان (جدول ۳) و هم‌چنین سطح آیین‌نامه‌ای لرزه‌ای بنا (جدول ۴)، می‌توان به پارامترهای میانه β_j و m_j مورد نیاز رسم منحنی شکنندگی دست پیدا کرد. منحنی‌های شکنندگی FEMA-NIBS که بر مبنای بیشینه شتاب زمین (PGA) می‌باشند، تنها برای خرابی سازه‌ای ایجاد شده‌اند. بطور کلی FEMA-NIBS خرابی‌های ساختمان در اثر وقوع زلزله را در ۳ دسته تقسیم می‌کند: (۱) خرابی اجزای سازه‌ای^۱؛ (۲) خرابی اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب^۲ و (۳) خرابی اجزای غیرسازه‌ای حساس به جابجایی^۳. پارامترهای منحنی شکنندگی که بر اساس توابع خرابی اجزای غیرسازه‌ای هستند، در مقیاس شتاب طیفی (S_d) و جابجایی طیفی (S_a) ارائه شده‌اند. استفاده از این منحنی‌ها خارج از چارچوب این سامانه در فاز نخست می‌باشد. اما منحنی‌های شکنندگی مربوط به خرابی اجزای سازه‌ای در مقیاس PGA ارائه گردیده‌اند. در نتیجه سطوح خرابی در نظر گرفته شده و نسبت‌های خرابی متناظر با آن‌ها

^۱ Structural components

^۲ Nonstructural acceleration-sensitive components

^۳ Nonstructural drift-sensitive components

تنها مربوط به خرابی اجزای سازه‌ای (اسکلت ساختمان) در اثر وقوع زلزله می‌شود. جدول ۵ نمونه‌ای از جداول FEMA-NIBS است که پارامترهای میانه و تغییرپذیری منحنی شکنندگی ساختمانی با سطح لرزه‌ای High-Code را ارائه داده است. به کمک این جدول می‌توان منحنی شکنندگی هر یک از چهار سطح خرابی تعریف شده در FEMA-NIBS را برای تمامی انواع ۳۶ گانه ساختمان‌ها رسم نمود.

جدول ۵: پارامترهای منحنی شکنندگی برای ساختمان W1؛ سطح طراحی لرزه‌ای High-Code [۳].

Building Type	Median Equivalent-PGA (g) and Log standard Deviation (Beta)							
	Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
W1	0.26	0.64	0.55	0.64	1.28	0.64	2.01	0.64
W2	0.26	0.64	0.56	0.64	1.15	0.64	2.08	0.64
S1L	0.19	0.64	0.31	0.64	0.64	0.64	1.49	0.64
S1M	0.14	0.64	0.26	0.64	0.62	0.64	1.43	0.64
S1H	0.1	0.64	0.21	0.64	0.52	0.64	1.31	0.64
S2L	0.24	0.64	0.41	0.64	0.76	0.64	1.46	0.64
S2M	0.14	0.64	0.27	0.64	0.73	0.64	1.62	0.64
S2H	0.11	0.64	0.22	0.64	0.65	0.64	1.6	0.64
S3	0.15	0.64	0.26	0.64	0.54	0.64	1	0.64
S4L	0.24	0.64	0.39	0.64	0.71	0.64	1.33	0.64
S4M	0.16	0.64	0.28	0.64	0.73	0.64	1.56	0.64
S4H	0.13	0.64	0.25	0.64	0.69	0.64	1.63	0.64
S5L	-	-	-	-	-	-	-	-
S5M	-	-	-	-	-	-	-	-
C3H	-	-	-	-	-	-	-	-
C1L	0.21	0.64	0.35	0.64	0.7	0.64	1.37	0.64
C1M	0.15	0.64	0.27	0.64	0.73	0.64	1.61	0.64
C1H	0.11	0.64	0.22	0.64	0.62	0.64	1.35	0.64
C2L	0.24	0.64	0.45	0.64	0.9	0.64	1.55	0.64
C2M	0.17	0.64	0.36	0.64	0.87	0.64	1.95	0.64
C2H	0.12	0.64	0.29	0.64	0.82	0.64	1.87	0.64
C3L	-	-	-	-	-	-	-	-
C3M	-	-	-	-	-	-	-	-
C3H	-	-	-	-	-	-	-	-
PC1	0.2	0.64	0.35	0.64	0.72	0.64	1.25	0.64
PC2L	0.24	0.64	0.36	0.64	0.69	0.64	1.23	0.64
PC2M	0.17	0.64	0.29	0.64	0.67	0.64	1.51	0.64
PC2H	0.12	0.64	0.23	0.64	0.63	0.64	1.49	0.64
RM1L	0.3	0.64	0.46	0.64	0.93	0.64	1.57	0.64
RM1M	0.2	0.64	0.37	0.64	0.81	0.64	1.9	0.64
RM2L	0.26	0.64	0.42	0.64	0.87	0.64	1.49	0.64
RM2M	0.17	0.64	0.33	0.64	0.75	0.64	1.83	0.64
RM2H	0.12	0.64	0.24	0.64	0.67	0.64	1.78	0.64
URML	-	-	-	-	-	-	-	-
URMM	-	-	-	-	-	-	-	-
MH	0.11	0.64	0.18	0.64	0.31	0.64	0.6	0.64

۳-۳ روش مورد استفاده در این پژوهش

با توجه به آنچه در خصوص روش FEMA-NIBS بیان گردید، امکان دستیابی به منحنی کامل احتمال فراگذشت خرابی توسط این روش به تنهایی میسر نمی‌باشد. از این رو در این پژوهش به ارائه میانگین احتمال فراگذشت خسارت به شرط وقوع زلزله (بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت وقوع زلزله) و در یک مدت زمان مشخص (با در نظر گرفتن عدم قطعیت وقوع زلزله)، اکتفا می‌شود. در این قسمت روش تحلیل ریسک مورد استفاده در این سامانه تحت وب به تفصیل بیان می‌گردد. نحوه استفاده از تابع چگالی احتمال بدست آمده از منحنی خطر لرزه‌ای در روش تحلیل ریسک FEMA-NIBS و استخراج میانگین خسارت مالی موضوع این قسمت از گزارش است.

در فصل تحلیل ریسک دو روش تحلیل ریسک ATC-13 و FEMA-NIBS مورد ارزیابی قرار گرفت. روش FEMA-NIBS، روشی کامل تر و جدیدتر نسبت به ATC-13 می‌باشد. خروجی ATC-13، ماتریس احتمال-خرابی است که محدود به احتمال وقوع حالت‌های خرابی به شرط زلزله با شدت ۷ تا ۱۲ در مقیاس MMI را می‌شود. این موضوع در حالی است که روش FEMA-NIBS منحنی احتمال فراگذشت هر حالت خرابی به شرط وقوع زلزله برای بازه‌ای پیوسته از شدت در مقیاس PGA را ارائه می‌دهد. در حقیقت روش FEMA-NIBS نسبت به ATC-13، از دو مزیت بزرگ برخوردار است: نخست ارائه منحنی کامل احتمال فراگذشت شدت زلزله که در واقع امکان انتگرال گیری عددی بجای استفاده از جمع گسسته را فراهم می‌سازد و دوم، ارائه شدت زلزله در مقیاس PGA که مقیاسی جدیدتر و علمی‌تر از MMI است. این دو مزیت مهم کافی است تا در فاز نخست پروژه، پیاده‌سازی روش ATC-13 منتفی گردیده و صرفاً به مطالعه آن اکتفا شود. در حقیقت نخستین روش تحلیل ریسکی که مبنای این پژوهش قرار گرفته است، روش FEMA-NIBS می‌باشد.

با انتخاب روش FEMA-NIBS بمنظور پایه تحلیل ریسک لرزه‌ای، لازم است با توجه به خروجی‌های مدنظر پروژه، راه‌های دستیابی به آن‌ها بصورت شفاف بیان گردد. طبق آنچه تحت عنوان خروجی‌های مدنظر این سامانه در این مرحله عنوان گردید، ارائه میانگین خسارت مالی با و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت وقوع زلزله، دو خروجی مدنظر از تحلیل ریسک ساختمان‌ها می‌باشد. در ادامه روش دستیابی به این خروجی‌های مورد نظر بیان می‌گردد.

۳-۳-۱ محاسبه میانگین خسارت مالی

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، روش FEMA-NIBS منحنی شکنندگی چهار حالت خرابی تعریف شده را برای تمامی ساختمان‌های ۳۶ گانه خود ارائه می‌کند. بمنظور محاسبه میانگین خرابی ساختمان، باید

احتمال فراگذشت هر حالت خرابی بدست آید. با استفاده از قانون جمع احتمال، احتمال هر حالت خرابی از معادله زیر بدست می آید:

$$(۶) \quad P(DS_j) = \int P(DS_j | PGA) \cdot f(PGA) dPGA$$

در این رابطه $P(DS_j)$ احتمال فراگذشت حالت خرابی j است. هم چنین $P(DS_j | PGA)$ احتمال فراگذشت حالت خرابی j به شرط PGA و $f(PGA)$ تابع چگالی احتمال PGA می باشد. لازم به یادآوری است که نحوه بدست آوردن تابع چگالی احتمال PGA با استفاده از منحنی خطر، به تفصیل در فصل ۲ بیان گردیده است. با توجه به این که $f(PGA)$ به صورت تابعی عددی موجود می باشد، محاسبه این انتگرال نیز بصورت عددی و با استفاده از تقریب جمع مساحت دوزنقه صورت می گیرد.

با محاسبه احتمال فراگذشت هر حالت خرابی، می توان نسبت خرابی مورد انتظار سازه را محاسبه نمود. برای این منظور، مطابق معادله (۴) لازم است نسبت های خرابی میانگین اختصاص یافته توسط FEMA-NIBS به هریک از این حالت های خرابی را در احتمال فراگذشت آن حالت خرابی ضرب نمود. حاصل جمع این اعداد، نسبت خرابی مورد انتظار سازه می باشد.

جدول ۶ نسبت های میانگین برای هر حالت خرابی در FEMA-NIBS را نشان می دهد.

جدول ۶: نسبت های خرابی میانگین متناظر با حالت های خرابی در FEMA-NIBS [۳].

Damage State	Damage Ratio (η)
Slight	0.02
Moderate	0.10
Extensive	0.50
Complete	1.00

قدم نهایی در این مسیر، محاسبه خسارت مالی مورد انتظار سازه می باشد. بنابر معادله زیر، میزان خسارت مالی مورد انتظار به شرط وقوع زلزله، L ، از طریق ضرب نسبت خرابی سازه، η ، در هزینه بازسازی اجزای سازه ای، B ، بدست می آید:

$$(۷) \quad L = \eta \cdot B$$

از آن جا که احتمال وقوع هر یک از حالت های خرابی به شرط وقوع زلزله محاسبه شده است، در نتیجه نسبت خرابی بدست آمده بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت وقوع زلزله می باشد. برای محاسبه نسبت خرابی با در نظر گرفتن عدم قطعیت وقوع زلزله، می توان از معادله زیر استفاده نمود:

$$(۸) \quad L_T = \lambda_E \cdot T \cdot L$$

که در آن L_T میانگین خسارت مالی مورد انتظار در T سال و λ_E نرخ وقوع زلزله در سال است. لازم به یادآوری است که عدد λ_E از منحنی خطر مورد استفاده در تحلیل ریسک استخراج می شود (رجوع شود به بخش ۲-۲).

فصل ۴: سامانه تحلیل ریسک CIRA

سامانه تحلیل ریسک زیرساخت‌های عمرانی^۱ (CIRA)، عنوان سامانه‌ای تحت وب در دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف می‌باشد که از طریق نشانی cira.civil.sharif.ir قابل دسترسی است. در حال حاضر خروجی این پروژه کارشناسی در این سامانه منتشر گردیده است. همانطور که پیشتر اشاره گردید، هدف نهایی راه‌اندازی این سامانه، ارائه تحلیل ریسک لرزه‌ای ساختمان‌ها بوده است. از این رو طراحی آن بگونه‌ای است که با گرفتن اطلاعات مورد نیاز روش تحلیل ریسک که به تفصیل در فصل ۳ توضیح داده شد، خروجی‌های مدنظر را به کاربر نمایش دهد. در ادامه این فصل راهنمای استفاده از سامانه CIRA تحت عنوان دست‌نامه کاربران اشاره می‌شود.

۴-۱ دست‌نامه کاربران

شکل ۱۶ نمایی از صفحه نخست پایگاه اینترنتی CIRA را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این تصویر نیز نمایش داده شده است، کاربر می‌بایست اطلاعات خواسته شده را وارد نموده و نتایج تحلیل ریسک لرزه‌ای ساختمان خود را مشاهده نماید. اطلاعات خواسته شده از کاربر به شرح زیر می‌باشد:

^۱ Civil Infrastructure Risk Analysis

Structure Information		Structure Location
Number of Stories:*		Please Click on your Building Location 
Footprint Area per Story (m ²):*		
Material	Select Structure Material...	
Load Bearing System	Choose Load Bearing System...	
Construction Year:*		
Construction Quality	Choose Construction Quality...	
Has the Building Been Retrofitted?	☐ Yes ☐ No	
Submit		

شکل ۱۶: تصویر صفحه نخست سامانه CIRA.

۱. موقعیت جغرافیایی ساختمان: موقعیت مکانی ساختمان بوسیله کلیک کردن کاربر بر روی محل تقریبی بنای خود در Google Map[®] تعیین می‌گردد. پس از انتخاب محل ساختمان، طول و عرض جغرافیایی آن توسط برنامه از Google گرفته شده و بعنوان پارامترهای لازم در برآورد منحنی خطر منطقه و هم‌چنین ذخیره‌سازی نتایج تحلیل ریسک در پایگاه داده، در سیستم نگهداری می‌شوند.

۲. تعداد طبقات (N): تعداد طبقات بعنوان یکی از شاخصه‌های تعیین نوع ساختمان در روش FEMA-NIBS (جدول ۳)، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳. مساحت زیربنای ساختمان (A): با استفاده از مساحت زیربنای ساختمان، می‌توان هزینه بازسازی اجزای سازه‌ای ساختمان، B، را از معادله زیر بدست آورد:

$$B = A \cdot C \quad (9)$$

در این رابطه، C ارزش تقریبی اجزای سازه‌ای ساختمان به ازای هر مترمربع زیربنا می‌باشد در این مرحله از پروژه، به ازای ساختمان‌های مرسوم شهر، عدد ۵,۰۰۰,۰۰۰ ریال بعنوان ارزش هر مترمربع اجزای سازه‌ای ساختمان انتخاب شده است. این عدد با فرض قیمت تمام شده هر متر مربع ساختمان از قرار متری ۱۵,۰۰۰,۰۰۰ ریال و تخصیص حدود ۳۰٪ آن به هزینه اجزای سازه‌ای (اسکلت)، بدست آمده است.

۴. مصالح: مصالح مرسوم مورد استفاده در سیستم باربری سازه‌ها، بر اساس لیست FEMA-NIBS، به کاربر ارائه می‌شود تا از میان آن‌ها بتواند مصالح مورد استفاده در ساختمان خود را انتخاب نماید. مصالح تعریف شده در FEMA-NIBS عبارتند از: چوبی، بتنی، فلزی، آجر بنایی و خانه‌های قابل حمل^۱

^۱ Mobile home

۵. سیستم باربری سازه: سیستم باربری سازه نیز بر اساس لیست سیستم‌های موجود در FEMA-NIBS، به کاربر نشان داده می‌شود. با استفاده از سیستم مصالح سازه‌ای، سیستم باربری و تعداد طبقات می‌توان نوع ساختمان را بر اساس FEMA-NIBS تعیین نمود. (رجوع شود به جدول ۳)

۶. سال ساخت: سال ساخت بیانگر آن است که ساختمان بر اساس کدام ویرایش از آیین‌نامه لرزه‌ای طراحی شده است. بر همین مبنا، سال ساخت بعنوان معیار اولیه تعیین سطح آیین‌نامه لرزه‌ای مبنای طراحی در نظر گرفته شده است. تا قبل از سال ۱۳۴۹ که استاندارد ملی ۵۱۹ بعنوان «حداقل بارهای وارد بر ساختمان» [۱۸]، بعنوان اولین آیین‌نامه لرزه‌ای عرضه شد، ساختمان‌ها در سطح Pre-Code قرار می‌گیرند. از سال ۱۳۴۹ تا سال ۱۳۷۸، که ویرایش دوم آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) [۱۹] عرضه گردید، ساختمان‌ها در سطح Low-Code دسته‌بندی می‌شوند. از سال ۱۳۷۸ به بعد، ساختمان‌ها در سطح Moderate-Code جای خواهند گرفت. جدول ۷ خلاصه نحوه تعیین سطح آیین‌نامه لرزه‌ای بر اساس سال ساخت برای ساختمان‌های مورد بررسی در این پروژه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که سطح آیین‌نامه‌ای لرزه‌ای نهایی که مبنای انتخاب جدول پارمترهای میانه و بتا در FEMA-NIBS می‌باشد، با توجه به دو آیت بعدی یعنی «بهسازی لرزه‌ای ساختمان» و «کیفیت ساخت» تعیین می‌گردد.

جدول ۷: تعیین سطح آیین‌نامه لرزه‌ای بر اساس سال ساخت (مورد استفاده در پروژه)

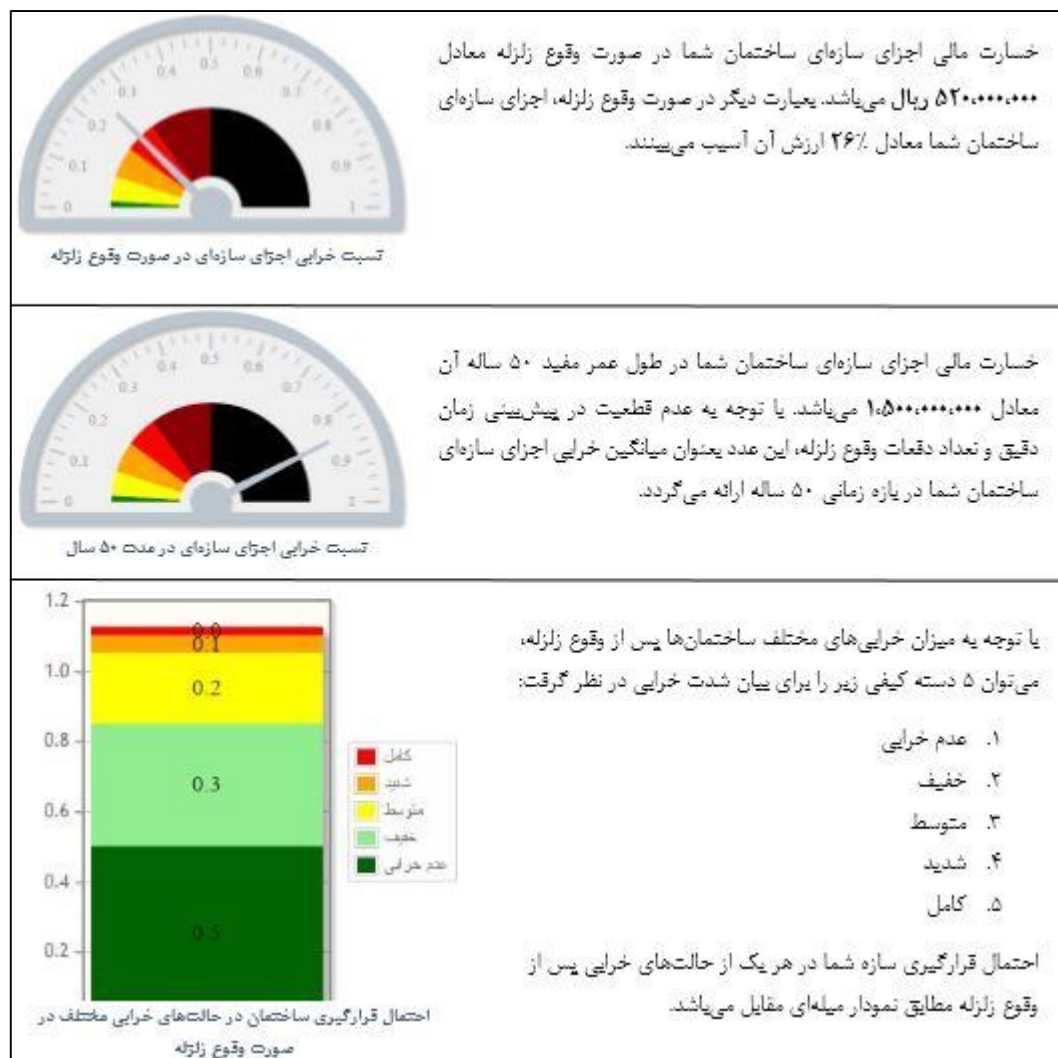
سال ساخت	سطح آیین‌نامه لرزه‌ای (Code level)
قبل از سال ۱۳۴۹	Pre-code
از سال ۱۳۴۹ تا سال ۱۳۷۸	Low-code
از سال ۱۳۷۸ به بعد	Moderate-code

۷. کیفیت ساخت: با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش ۳-۲، می‌توان اثر کیفیت ساخت را در تعیین سطح آیین‌نامه لرزه‌ای لحاظ کرد. در نتیجه کاربر می‌تواند با انتخاب یکی از موارد «عالی»، «متوسط» و «ضعیف» بعنوان کیفیت ساخت، به سیستم اجازه دهد تا با استفاده از جدول ۴، سطح آیین‌نامه لرزه‌ای ساختمان را مشخص نماید.

۸. بهسازی لرزه‌ای: بهسازی لرزه‌ای بصورت یک گزینه به کاربر نشان داده می‌شود تا کاربر بتواند با انتخاب آن به سیستم اعلام کند که ساختمان مورد نظر بهسازی لرزه‌ای شده است. سطح آیین‌نامه‌ای لرزه‌ای ساختمان‌هایی که در طول عمر خود بهسازی لرزه‌ای شده‌اند، بدین گونه تعیین می‌گردد: اگر ساختمان با توجه به سال ساخت در سطح High-code قرار داشت سطح آیین‌نامه‌ای آن تغییر نمی‌کند، در غیر این صورت سطح تعیین شده با توجه به سال ساخت یک سطح فراتر در نظر گرفته می‌شود. بعنوان مثال اگر ساختمانی با توجه به سال ساخت خود در سطح Low-code قرار گیرد، در صورت داشتن بهسازی لرزه‌ای

سطح آن به Moderate-code ارتقا می‌یابد. در مورد ساختمان‌هایی که بهسازی لرزه‌ای شده‌اند، اثر کیفیت ساخت در نظر گرفته نمی‌شود.

پس از وارد کردن اطلاعات فوق، کاربر کافی است تا با کلیک کردن بر روی دکمه «ارسال»، خروجی‌های تحلیل ریسک مورد نظر را مشاهده نماید. شکل ۱۷ تصویر صفحه خروجی سامانه CIRA را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل نیز نشان داده شده است، خسارت مالی اجزای سازه‌ای در صورت وقوع زلزله و در طول مدت ۵۰ سال به همراه نسبت‌های خرابی متناظر آن‌ها بصورت شماتیک به کاربر نشان داده می‌شود. هم‌چنین احتمال قرارگیری سازه در هر یک از پنج حالت خرابی عدم خرابی، خفیف، متوسط، شدید و کامل بصورت نمودار میله‌ای به نمایش درآمده است.



شکل ۱۷: تصویر صفحه خروجی نتایج سامانه CIRA.

فصل ۵: نتیجه گیری

خلاصه مطالب مطرح شده در این گزارش، در قسمت مقدمه به تفصیل بیان گردیده است. این فصل، نگاهی وسیع تر به آن چه در این پژوهش صورت گرفته می‌اندازد. خلاصه‌ای از روش تحقیق این پژوهش و تعیین جهت پژوهش‌های آتی با رویکرد رفع نواقص و محدودیت‌های پژوهش موجود، سایر مطالب گنجانده شده در فصل نتیجه گیری است.

۵-۱ خلاصه روش تحقیق

این پروژه آغازگر مسیری جدید در تحلیل ریسک لرزه‌ای در کشور می‌باشد. با توجه به اهمیت موضوع عدم آگاهی کافی مالکان ساختمان‌ها و تصمیم گیرندگان شهری نسبت به میزان آسیب پذیری بناهای ساختمانی، این پژوهش مسیر اصلی خود را با هدف برقراری ارتباط ملموس با خطرات ریسک لرزه‌ای، تعیین می‌نماید. ازین رو، ایجاد یک سامانه تحت وب بعنوان بهترین راه دست‌یابی به این هدف مهم برگزیده شده است. این سامانه اینترنتی با بکارگیری روش‌های علمی تحلیل خطر و تحلیل ریسک لرزه‌ای، نتایج ملموسی از میزان آسیب پذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها ارائه می‌کند. مهم‌ترین ویژگی‌ها و مزیت‌های سیستم طراحی شده بمنظور دست‌یابی هرچه بهتر به اهداف تعیین شده، در زیر اشاره شده است:

- طراحی سامانه بر مبنای وب، سهولت اسفاده از آن را برای کاربران دوچندان می‌کند. با توجه به جایگاه بی‌بدیل فضای مجازی بعنوان ابزار برقراری ارتباط در بین تمامی افراد جامعه، این فضا بهترین مسیر برای ایجاد ارتباط مؤثر با کاربران است.
- ارائه خروجی‌های تحلیل ریسک قابل فهم برای عموم، می‌تواند موجب ترغیب کاربران عادی به استفاده از این سامانه شود. یکی از مهم‌ترین دلایل آسیب پذیری ساختمان‌ها در برابر خطرات ناشی از زلزله، عدم آگاهی مالکان و تصمیم گیرندگان نسبت به جدی بودن این دسته از خطرات است. بخش اعظم مالکان ساختمان‌ها، فاقد اطلاعات فنی قابل توجهی از مفاهیم ریسک و خطر لرزه‌ای هستند. در نتیجه خروجی‌های تحلیل ریسک باید برای آن‌ها کاملاً قابل فهم باشد. ارائه احتمال

فراگذشت خسارت مالی ساختمان در اثر وقوع زلزله و یا در بازه زمانی مشخص، از جمله خروجی‌های ملموس و قابل درک این سامانه برای کاربران عادی است.

- قراردادن امکانات ویژه کاربران با دانش فنی بیشتر و مهندسان، عامل مهمی در برقراری رابطه سامانه تحلیل ریسک با جامعه مهندسان عمران می‌باشد. از جمله این امکانات می‌توان به وارد کردن خروجی‌های دقیق‌تر مانند کیفیت ساخت و هم‌چنین مشاهده خروجی‌های فنی اشاره کرد. بنانهادن پایگاهی قابل اعتماد برای جامعه مهندسان عمران که مرجع تحلیل ریسک ساختمان‌ها باشد، باعث ورود مباحث احتمالاتی و تحلیل ریسک به محاسبات روزمره مهندسان شود.
- تهیه بانک اطلاعاتی از نتایج تحلیل ریسک، راه ارتباطی این سامانه با تصمیم‌گیرندگان شهری و قانون‌گذاران می‌باشد. این بانک اطلاعاتی که شامل نتایج تحلیل ریسک ساختمان‌ها می‌باشد، تصویری از میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌های یک منطقه یا یک شهر را به مسوولان شهری نشان می‌دهد.

۵-۲ مسیر تحقیقات آتی

با توجه به نواقص و معایب تحقیق صورت گرفته و هم‌چنین نیازهای این سامانه تحت وب، به تعدادی از موارد و پیشنهادها برای پیگیری در تحقیقات آتی، اشاره می‌گردد. تمرکز این پیشنهادها مبتنی بر توسعه روش‌های پیچیده‌تر تحلیل ریسک و ارائه خدمات گسترده‌تر در سامانه می‌باشد.

۱. گردآوری و تهیه منحنی‌های خطر لرزه‌ای برای شبکه‌ای متراکم از نقاط شهر تهران: با توجه محدودیت تعداد منحنی‌های خطر در دسترس برای شهر تهران و اهمیت این منحنی‌ها در ارائه نتایج دقیق تحلیل ریسک، پیشنهاد می‌گردد تا در این خصوص نسبت به جستجو در ادبیات فنی موجود و تحقیقات به منظور تولید منحنی‌های خطر بروزتر، مدنظر قرار گیرد.

۲. گسترش محدوده جغرافیایی تحت خدمت سامانه به سایر نقاط کشور: با توجه به محدودیت ارائه تحلیل ریسک به ساختمان‌های شهر تهران، پیشنهاد می‌گردد تا منحنی‌های خطر لرزه‌ای سایر شهرهای کشور تهیه گردد. این اقدام بستر لازم برای گسترش ارائه خدمت تحلیل ریسک را فراهم می‌سازد.

۳. ایجاد مدل خرابی با توجه به نوع ساخت‌وسازهای ایران: روش‌های تحلیل ریسک FEMA- و ATC-13 همگی مبتنی بر نوع ساخت‌وسازهای شهرهای امریکا می‌باشد. بمنظور ارائه نتایج دقیق‌تر تحلیل ریسک، پیشنهاد می‌گردد تا تلاشی بمنظور توسعه مدل‌های خرابی برای ساخت‌وساز مرسوم در کشور صورت پذیرد.

۴. گسترش نتایج تحلیل ریسک به خرابی اجزای غیرسازه‌ای: بمنظور ارائه ضریب خرابی کل ساختمان، لازم است ضرایب خرابی اجزای غیرسازه‌ای نیز محاسبه شوند.

۵. تجهیز سامانه به سایر روش های تحلیل ریسک: استفاده از روش های تحلیل ریسک جدیدتر مانند روش قابلیت اعتماد و PEER، سبب ارائه خروجی های دقیق تری از تحلیل خطر می گردد. با توجه به ساختار شیء گرایی برنامه نویسی سامانه، بستر لازم برای گسترش آن به سایر روش های تحلیل ریسک فراهم شده است.
۶. ایجاد ارتباط با کلاستر پردازش موازی: در صورت گسترش سامانه به سایر روش های تحلیل ریسک، هزینه محاسباتی این تحلیل بسیار بالا می رود. ازین رو می بایست بستر لازم جهت ارتباط با یک کلاستر پردازش موازی برای انجام محاسبات سنگین فراهم گردد.
۷. طراحی سطح فنی تری از سایت برای مهندسان: در صورت محقق شدن موارد ۶۵، زیرساخت های لازم در جهت ارائه سطح فنی تری از خدمات تحلیل ریسک به جامعه مهندسان عمران فراهم می گردد. بدین منظور، یک مدل سازه ای از ساختمان مورد نظر پس از کمی سازی عدم قطعیت های موجود در آن توسط نرم افزار Rt مورد تحلیل قرار خواهد گرفت و پس از حصول نتیجه، خروجی ها از طریق واسط کاربری تحت وب به مهندسان ارائه خواهد شد.
۸. تهیه یک مدل تحلیل ریسک بمنظور ارزیابی ریسک تلفات جانی: با توجه به اهمیت تحلیل تلفات جانی ناشی از وقوع زلزله، تهیه یک مدل بومی تلفات با توجه به نوع کاربری و ساخت و ساز ساختمان های ایران از اهمیت بسزایی برخوردار است. به کمک این مدل می توان نتایج تحلیل ریسک سامانه CIRA را به ارائه احتمال فراگذشت تلفات جانی گسترش داد.
۹. گسترش سامانه به سایر زیرساخت های عمرانی: با توجه به اهمیت تحلیل ریسک در زیرساخت های حیاتی مانند سد، خطوط انتقال آب و فاضلاب، پل و ...، پیشنهاد می گردد روش های تحلیل ریسک این زیرساخت ها ایرانی سازی شده تا استفاده از آن ها در این سامانه میسر گردد.

مراجع

- [1] C. Cornell, "Engineering Seismic Risk Analysis," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 58, no. 5, pp. 1583–1606, 1968.
- [2] ATC, "Earthquake Damage Evaluation Data for California (ATC-13)," *Applied Technology Council*. Federal Emergency Management Agency, 1985.
- [3] FEMA-NIBS, "Earthquake Loss Estimation Methodology-HAZUS Technical Manual," *Fed. Emerg. Manag. Agency Natl. Inst. Build. Sci.*, 2003.
- [4] J. V. T. Freeman, S. A., J. P. Nicoletti, "Evaluations of Existing Buildings for Seismic Risk-A Case Study of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington," *Proc. 1st US Natl. Conf. Earthq. Eng.*, 1975.
- [5] C. A. Cornell and H. Krawinkler, "Progress and Challenges in Seismic Performance Assessment," *PEER Cent. News*, vol. 3, no. 2, pp. 1–4, 2000.
- [6] J. Moehle and G. G. Deierlein, "A Framework Methodology for Performance-based Earthquake Engineering," in *Proceedings of the 13 th World Conference on Earthquake Engineering*, 2004, no. 679, pp. 3812–3814.
- [7] M. Mahsuli and T. Haukaas, "Seismic Risk Analysis with Reliability Methods, Part II: Analysis," *Struct. Saf.*, vol. 42, pp. 63–74, May 2013.
- [8] M. Mahsuli and T. Haukaas, "Seismic Risk Analysis with Reliability Methods, Part I: Models," *Struct. Saf.*, vol. 42, pp. 54–62, May 2013.
- [9] B. Mansouri, M. Ghafory-Ashtiany, K. Amini-Hosseini, R. Nourjou, and M. Mousavi, "Building Seismic Loss Model for Tehran," *Earthq. Spectra*, vol. 26, no. 1, pp. 153–168, Feb. 2010.
- [10] G. Ghodrati Amiri, R. Motamed, and H. Rabet Es-haghi, "Seismic Hazard Assessment of Metropolitan Tehran, IRAN," *J. Earthq. Eng.*, vol. 7, no. 3, pp. 347–372, Jul. 2003.
- [11] Y. Gholipour, Y. Bozorgnia, M. Rahnama, M. Berberian, and J. Shojataheri, "Probabilistic Seismic Hazard Analysis Phase I- Greater Tehran Region Final Report," *Fac. Eng. Univ. Tehran*, 2008.
- [12] U.S Geological Survey, "Seismic Hazard Maps and Data." [Online]. Available: <http://earthquake.usgs.gov/hazards/?source=sitenav>.
- [13] U.S. Geological Survey, "Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response." [Online]. Available: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/pager/>. [Accessed: 09-Oct-2014].
- [14] U.S. Geological Survey, "ShakeMaps." [Online]. Available: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/>. [Accessed: 09-Oct-2014].
- [15] Federal Emergency Management Agency, "Hazus Software." [Online]. Available: <http://www.fema.gov/hazus-software>. [Accessed: 09-Oct-2014].

- [16] M. Mahsuli and T. Hakaas, "Computer Program for Multimodel Reliability and Optimization Analysis," *Journal Comput. Civ. Eng.*, vol. 27, no. 1, pp. 87–98, 2012.
- [17] R. K. McGuire, "Seismic Hazard and Risk Analysis," *Earthq. Eng. Res. Inst.*, 2004.
- [18] موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران, حداقل بار وارده بر ساختمان ها و ابنیه فنی, استاندارد شماره ۵۱۹, ویرایش ۹. تهران, ۱۳۴۴.
- [19] موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران, طراحی ساختمان ها در برابر زلزله-آیین کار, ویرایش دوم. تهران, ۱۳۷۸.