صرفه‌جویی در
کاهش خسارات ناشی از زلزله

گردآوری و ترجمه:

جواد قدرتی ینگجه

بهمن ۱۴۰۲

صرفه‌جویی در کاهش خسارات ناشی از زلزله

چکیده:

کشورهای لرزه‌خیز نظیر نیوزیلند، ژاپن، آمریکا و ... مفاهیم طراحی مبتنی بر **شکل‌پذیری** را از اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ به‌کار گرفتند. به‌کارگیری این مفاهیم احتمالاً مهمترین پیشرفت بشر در تامین **ایمنی جانی** در زلزله‌های آتی می‌باشد. نظر به **عجین بودن مفهوم شکل‌پذیری با آسیب سازه‌ای**، تحقق شکل‌پذیری، بدون آسیب به سازه و محتویاتش امری ناممکن است. در همین راستا زلزله‌های اخیر به وضوح **مهندسی** را به چالش کشیده است. سوالات بنیادین این چالش عبارت‌اند از:

- ✓ در حال حاضر رویکرد ما مهندسان مطابق با طراحی مبتنی بر شکل‌پذیری است. آیا انتظارات عموم جامعه از عملکرد ساختمان‌هایشان در حین و پس از زلزله‌های شدید، به وسیله این رویکرد قابل تحقق است؟
- ✓ آیا نتایج زلزله‌های اخیر این انتظارات را برآورده کرده است؟
- ✓ خسارات جانی و مالی زلزله‌های اخیر سازگار با روند طراحی در آئین‌های لرزه‌ای است؟

پر واضح است که روند طراحی در جهان به وسیله تجربیات حاصل از زلزله‌های واقعی هدایت می‌شود. زلزله ۲۰۱۱ کرایسچرچ در نیوزیلند، نقطه عطف برای شروع تغییرات اساسی در روند طراحی سازه بود. لایحه سنای آمریکا در دسامبر ۲۰۱۸ (Public Law No: 115-307) به همراه انتشار پژوهش‌های مشترک بین دانشگاه Auckland نیوزیلند و آمریکا (ATC 145)، گواه بر شروع اجرای این تغییرات است.

صرفه‌جویی در کاهش خسارات ناشی از زلزله

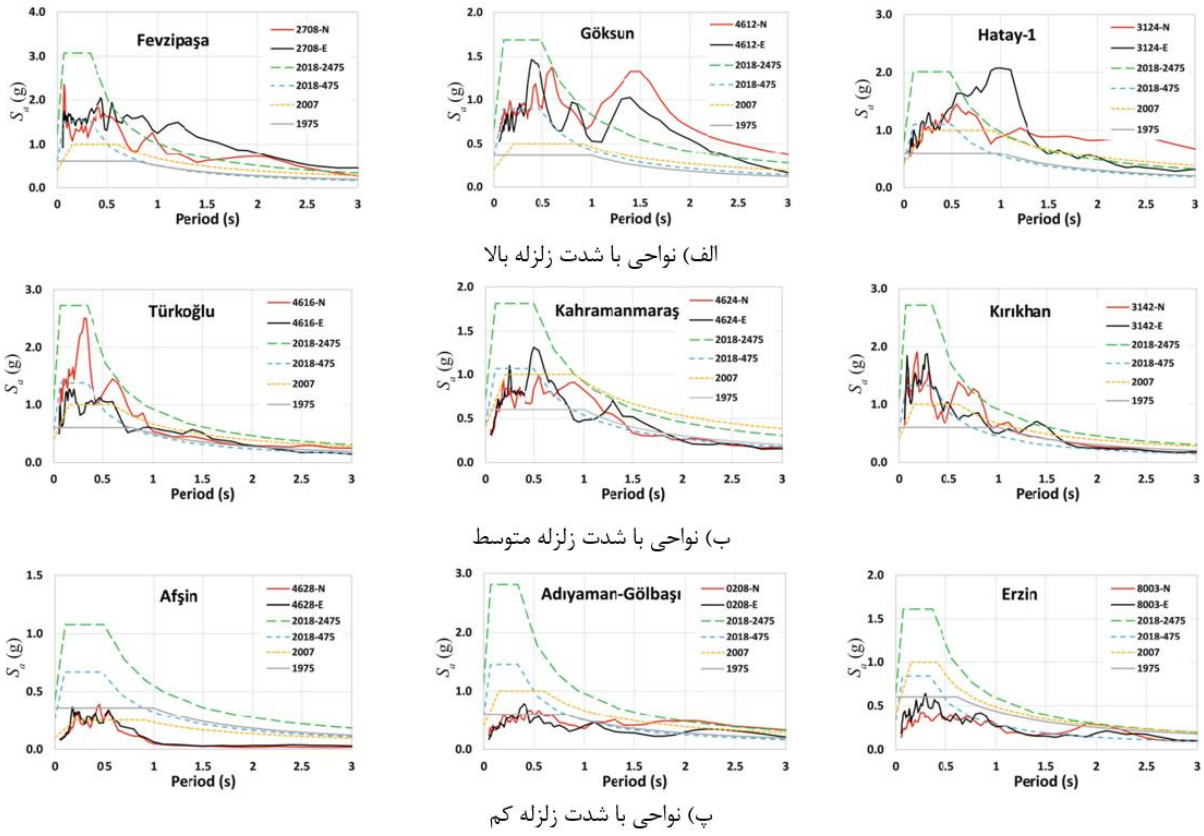
مقدمه:

از ۴ سپتامبر ۲۰۱۰، یک سری زمین‌لرزه‌های بزرگ، نیوزیلند را برای بیش از یک سال به لرزه در آورد. چهار زلزله مهم در ۲۵ دسامبر ۲۰۱۰، ۲۲ فوریه ۲۰۱۱، ۱۳ ژوئن و ۲۳ دسامبر ۲۰۱۱ رخ داد. بر خلاف دو زمین لرزه آخر، زلزله ۲۲ فوریه ۲۰۱۱ در مرکز شهر کرایسچرچ (دومین شهر بزرگ نیوزیلند) رخ داد. بسیاری از ساختمان‌ها تحت این زلزله 6.2 ریشتری دچار فروریزش شدند. تلفات ناشی از این زلزله ۱۸۵ نفر بود. بیشترین تلفات، ناشی از فروریختن دو ساختمان تلویزیون کانتربری (CTV) و ساختمان شرکت Pyne Gould (PGC) است. فروریختن ساختمان CTV به تنهایی جان ۱۱۵ نفر (تقریباً دو سوم از مجموع تلفات) را گرفت. زلزله فوریه ۲۰۱۱ کنتربری نیوزیلند و پس‌لرزه‌های مدام آن، خسارات گسترده‌ای در نزدیکی منطقه تجاری مرکزی کرایسچرچ به همراه داشت. مقدار این خسارات بیش از ۴۰ میلیارد دلار برآورد شده است (حدود ۲۰٪ تولید ناخالص ملی نیوزیلند). میزان آسیب در ساختمان‌هایی که دچار فروریزش نشده بودند به حدی بود که قابلیت سکونت مجدد درآنها وجود نداشت و محکوم به تخریب بودند، با تخریب حدود ۶۰٪ از ساختمان‌های بتنی چند طبقه (۳ طبقه و بالاتر) مرکز تجاری کرایسچرچ به مدت ۲ سال تعطیل گشت. شکل ۱ تصویر قبل و بعد از رخداد زلزله در شهر کرایسچرچ را نشان می‌دهد [۱و ۲].

شکل ۱ تاثیر زلزله کنتربری ۲۰۱۱ بر مرکز تجاری کرایسچرچ

دو زمین‌لرزه با فاصله زمانی بسیار نزدیک در مناطق قهرمان ماراش-پازارجیک و قهرمان ماراش-البیستان ترکیه در تاریخ ۶ فوریه ۲۰۲۳ به ترتیب با شدت 7.7 و 7.6 ریشتر به وقوع پیوست. بین خسارات تخمین زده شده از بلایای طبیعی ترکیه در یک قرن گذشته، رخداد زلزله مذکور بیشترین خسارت را داشت. مقدار این خسارات بیش از ۱۰۴ میلیارد دلار برآورد

شده است (حدود ۹٪ تولید ناخالص ملی ترکیه). تلفات ناشی از این زلزله بیش از ۵۱۰۰۰ نفر می‌باشد دلیل اصلی تلفات گسترده ناشی از این زلزله، نزدیک بودن ۱۱ شهر به کانون زلزله است. تیم‌های دانشگاه Middle East Technical سایت‌های ساختمانی را در غازیانتپ، قهرمان ماراش، هاتای، آدیامان و آدنا بررسی کردند. رکوردهای جنبش زمین نشان داد که در مکان‌های خاصی از غازیانتپ، قهرمان ماراش و هاتای، شدت زمین لرزه از حداکثر زلزله محتمل تعریف شده برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ ساله در آئین‌نامه ترکیه، فراتر رفته است. شکل ۲ طیف پاسخ شتاب زلزله در مناطق مختلف را در کنار طیف شتاب طراحی براساس استانداردهای لرزه‌ای ترکیه نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۲-الف و ب شدت زلزله در زمان‌های تناوب بزرگ‌تر از 0.5 ثانیه، بزرگتر از مقدار شتاب طراحی استاندارد لرزه‌ای ۲۰۱۸ ترکیه (زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله) است. مطابق با شکل ۲ -پ در بیشتر زمان‌های تناوب، مقدار شتاب پاسخ، کمتر از شتاب طیفی طراحی است [۳].



الف) نواحی با شدت زلزله بالا

ب) نواحی با شدت زلزله متوسط

پ) نواحی با شدت زلزله کم

شکل ۲ طیف پاسخ زلزله در نواحی مختلف و طیف طراحی استانداردهای ترکیه TEC (1975), TEC (1998), TBEC (2018) ((TEC (1998) و TEC (2007) طیف طراحی یکسانی ارائه می‌دهند) [۳]

صرفه‌جویی در کاهش خسارات ناشی از زلزله

مطابق با شکل ۲ – الف در زمان تناوب بلند، مقدار طیف پاسخ شتاب به طور قابل ملاحظه از مقدار شتاب طیفی زلزله با دوره بازگشت ۲۴۷۵ ساله که در TBEC (2018) معرفی شده است بزرگتر می‌باشد. در ایستگاه هاتای مقدار طیف پاسخ شتاب در زمان تناوب 1.0 ثانیه در حدود دو برابر مقدار طیف طرح زلزله ۲۴۷۵ ساله است.

به دلیل اینکه سال ساخت ساختمان‌ها نشانگر خوبی برای انطباق با قوانین لرزه‌ای مدرن و روش‌های نظارت استاندارد است لذا در بررسی‌های میدانی انجام شده، ساختمان‌های مسکونی براساس سال ساخت آنها مورد ارزیابی قرار گرفتند. حدود ٪۹۷ از ساختمان‌هایی که فروریزش کردند قبل از سال ۲۰۰۰ ساخته شده بودند. در جدول ۱ نتایج ارزیابی وزارت محیط زیست و شهرسازی ترکیه تا تاریخ مارس ۲۰۲۳ نشان داده شده است. ارزیابی برای ۱۱ شهری که نزدیک به کانون زلزله بوده‌اند انجام شده است. حدود ۲ میلیون ساختمان در معرض این زلزله قرار گرفته‌اند. حدود ٪۲۵ از این ساختمان‌ها (بیش از نیم میلیون عدد ساختمان) غیر قابل استفاده هستند. این ساختمان‌ها یا تحت زلزله دچار فروریزش شده‌اند یا آسیب آنها به حدی است که دستور تخریب فوری برای آنها صادر شده است یا میزان آسیب آن‌ها قابل ملاحظه است. پرواضح است که برای سه مورد ذکر شده ساختمان‌ها محکوم به فروریزش بوده و غیرقابل استفاده می‌باشند.

جدول ۱ نتایج ارزیابی وزارت محیط زیست و شهرسازی ترکیه تا مارس ۲۰۲۳ (تعداد واحدها) [۳]

City	Collapse/ urgent demolish/ severe damage		Moderate damage		Light damage		Total
Adana	2,952	(3.4%)	11,768	(13.7%)	71,072	(82.8%)	**85,792**
Adıyaman	56,256	(38.1%)	18,715	(12.7%)	72,729	(49.2%)	**147,700**
Diyarbakır	8,602	(6.5%)	11,209	(8.4%)	113,223	(85.1%)	**133,034**
Elazığ	10,156	(23.7%)	1,522	(3.6%)	31,151	(72.7%)	**42,829**
Gaziantep	29,155	(10.2%)	20,251	(7.1%)	236,497	(82.7%)	**285,903**
Kahramanmaraş	99,326	(35.7%)	17,887	(6.4%)	161,137	(57.9%)	**278,350**
Malatya	71,519	(37.2%)	12,801	(6.7%)	107,765	(56.1%)	**192,085**
Hatay	215,255	(50.0%)	25,957	(6.0%)	189,317	(44.0%)	**430,529**
Kilis	2,514	(7.9%)	1,303	(4.1%)	27,969	(88.0%)	**31,786**
Osmaniye	16,111	(18.0%)	4,122	(4.6%)	69,466	(77.4%)	**89,699**
Şanlıurfa	6,163	(2.9%)	6,041	(2.9%)	199,401	(94.2%)	**211,605**
Total	**518,009**	**(26.8%)**	**131,576**	**(6.8%)**	**1,279,727**	**(66.3%)**	**1,929,312**

شکل ۳ قبل و بعد زلزله ترکیه را در یک منطقه مسکونی نشان می‌دهد. شدت زلزله بالا و تعداد شهرهای زیاد در مرکز کانونی زلزله باعث شده است که تعداد ساختمان‌هایی که دچار فروریزش شده‌اند قابل ملاحظه باشد، این مورد در شکل ۳ مشخص می‌باشد.

شکل ۳ تاثیر زلزله ترکیه ۲۰۲۳ در مناطق مسکونی

هر دو زلزله نیوزیلند ۲۰۱۱ و ترکیه ۲۰۲۳ در جدول ۲ مقایسه شده است. با علم به اینکه شدت زلزله ترکیه ۲۰۲۳ بسیار بزرگتر از شدت زلزله نیوزیلند ۲۰۱۱ است، لیکن تعداد تلفات و میزان خسارت ناشی از این دو زلزله قابل مقایسه می‌باشند. رویکرد طراحی سازه‌های بتنی و فولادی در نیوزیلند مبتنی بر ظرفیت بوده و این ویژگی مهم، تا حد قابل قبولی می‌تواند جلوی فروریزش کلی ساختمان را بگیرد. مقایسه تعداد تلفات ۱۸۵ نفر در مقابل تعداد تلفات ۵۱۰۰۰ نفر نشان می‌دهد میانگین کیفیت ساخت و ساز در نیوزیلند (استانداردهای طراحی، روش‌های ساخت و مصالح) توانایی تامین ایمنی جانی را دارد. لیکن مقایسه خسارات اقتصادی بین دو زلزله نشان می‌دهد که حتی با وجود تامین ایمنی جانی در نیوزیلند، کماکان خسارات وارده قابل ملاحظه است. لذا به نظر می‌رسد نیوزیلند با وجود تامین ایمنی جانی، متحمل خسارات سنگین شده ولی ترکیه بدون تامین ایمنی جانی متحمل خسارات بسیار سنگینتر شده است. در نتیجه هنوز مسئله بزرگتری از تامین ایمنی جانی وجود دارد که بایستی حل شود. انسان زنده پس از زلزله نیاز به سرپناه و امکانات معیشتی در خور دارد. برای رسیدن به این مهم بایستی آسیب‌های وارده به ساختمان‌ها در حدی باشد که امکان سکونت مجدد در ساختمان فراهم شود.

جدول ۲ مقایسه زلزله‌های نیوزیلند ۲۰۱۱ و ترکیه ۲۰۲۳

کشور	تاریخ رخداد زلزله	شدت زلزله (ریشتر)	تعداد تلفات (نفر)	میزان خسارت (میلیارد دلار)	درصد از تولید ناخالص ملی
نیوزیلند	۲۲ فوریه ۲۰۱۱	6.2	۱۸۵	بیش از ۴۰ (نیوزیلند)	~ 20% GDP
ترکیه	۶ فوریه ۲۰۲۳	7.7 و 7.6	بیش از ۵۱۰۰۰	بیش از ۱۰۴ (آمریکا)	~ 9% GDP

لایحه سنای آمریکا (دسامبر ۲۰۱۸)

هدف اصلی طراحی ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله، همواره تامین ایمنی جانی بوده است (هدف آئین‌نامه‌های ساختمانی فعلی). در چند سال اخیر متولیان و سیاست‌گذاران ساختمانی خواهان شروع به طراحی "بهتر از آئین‌نامه یا فراتر از آئین‌نامه" بودند [۴ و ۵ و۶].

یک راه سازنده برای طراحی "بهتر از آئین‌نامه یا فراتر از آئین‌نامه"، نه تنها تلاش برای تامین ایمنی جانی است بلکه اندیشیدن درباره تحقق زمان بازیابی قابل قبول در کاربری ساختمان بعد از رخداد زلزله است. مجوز مجددی که توسط سنای آمریکا به NEHRP داده شده است این مهم را انجام می‌دهد. در این مجوز از هر دو سازمان FEMA و NIST خواسته شده است تا با کمک تمامی متخصصان "گزینه‌هایی برای بهبود محیط ساخته شده و زیرساخت‌های حیاتی که منعکس کننده اهداف عملکردی تعریف شده برحسب قابلیت استفاده مجدد پس از زلزله و مدت زمان بازیابی کاربری بعد از زلزله" است را پیشنهاد دهند [۵ و ۷]. در زیر متن قانون مجوز مجدد سنای آمریکا در سال ۲۰۱۸ برای NEHRP در راستای اصلاح قانون کاهش مخاطرات لرزه‌ای سال ۱۹۷۷آورده شده است.

Public Law No: 115-307 (12/11/2018)
National Earthquake Hazards Reduction Program Reauthorization Act of 2018

This bill **amends** the Earthquake Hazards Reduction Act of 1977 to reauthorize through FY2023, and expand activities under, the National Earthquake Hazards Reduction Program to include: (1) **gathering information on community resilience** (i.e., the ability of a community to **prepare** for, **recover** from, and **adapt** to earthquakes); (2) publishing a systematic set of maps of active faults and folds, liquefaction susceptibility, susceptibility for earthquake-induced landslides, and other seismically induced hazards; and (3) continuing the development of the Advanced National Seismic System, including earthquake early warning capabilities.

(Sec. 2) The bill modifies the Act's findings to include Puerto Rico as vulnerable to the hazards of earthquakes, and adds Oregon and Tennessee to the list of states cited as having major or moderate seismic risk.

(Sec. 3) With respect to earthquake hazard reduction activities, the bill revises or expands the duties of: (1) the Interagency Coordinating Committee on Earthquake Hazards Reduction, (2) the National Institute of Standards and Technology (NIST), (3) the Federal Emergency Management Agency (FEMA), (4) the U.S. Geological Survey (USGS), and (5) the National Science Foundation.

(Sec. 4) The Government Accountability Office shall complete a review of federal earthquake hazard risk reduction efforts.

(Sec. 5) NIST and FEMA must jointly convene a committee of experts to assess and recommend options for improving seismic safety standards.

(Sec. 6) The USGS must submit to Congress a five-year management plan for the continued operation of the Advanced National Seismic System.

مجوز مجدد داده شده به NEHRP به دو نقطه عطف در جدول زمانی بعد از زلزله اشاره دارد:

۱- قابلیت استفاده مجدد پس از زلزله (قابلیت سکونت مجدد)

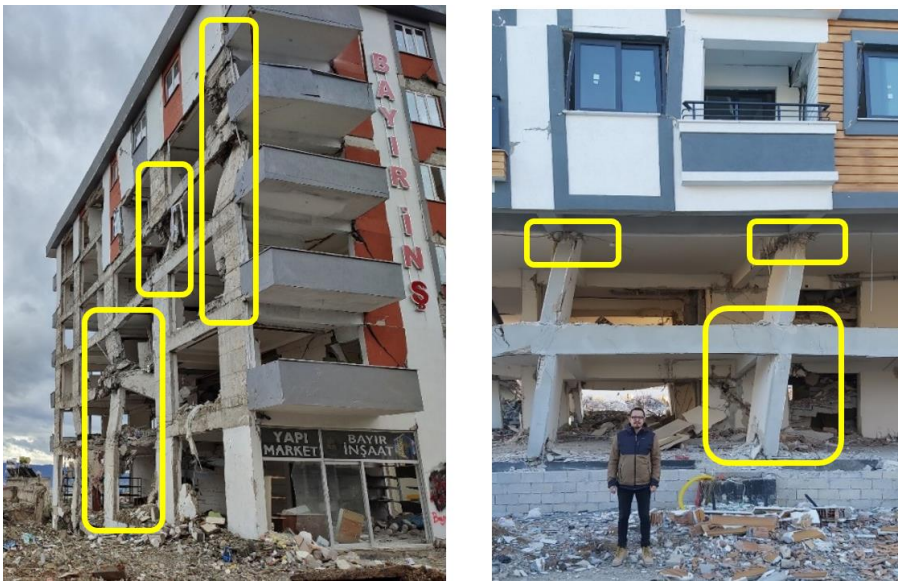
۲- زمان بازیابی کاربری بعد از زلزله

برای یک ساختمان، اولین نقطه عطف بعد از رخداد زلزله، توانایی ورود مجدد به ساختمان، پناه گرفتن، سکونت مجدد و

صرفه‌جویی در کاهش خسارات ناشی از زلزله

شروع مرحله بازیابی با اطمینان از ایمنی ساختمان می‌باشد. بازیابی کاربری ساختمان نقطه عطف بعدی است. در صورت نیاز، با بازگرداندن مجدد خدمت رسانی به ساختمان، بازیابی کاربری ساختمان به عنوان نقطه عطف دوم، از اهمیت بالای خدمت‌رسانی ساختمان که قبل از زلزله وجود داشت، پشتیبانی می‌کند. به نظر می‌رسد مفهوم این جمله یک مفهوم بدیهی و واضح باشد، لیکن برای درک اهمیت بالای این مفهوم در ادامه یک مثال ارائه می‌شود.

دو ساختمان بتن‌آرمه آسیب دیده در زلزله ۲۰۲۳ ترکیه در شکل ۴ نشان داده شده است. این ساختمان‌ها دچار فروریزش نشده‌اند، بنابراین عملکرد فرضی آئین‌نامه‌های لرزه‌ای را اغنا کرده‌اند. آسیب‌های نشان داده شده با کادر زرد، به حدی است که احتمالاً این ساختمان‌ها ایمنی لازم برای سکونت مجدد را ندارند. به نظر می‌رسد امکان تعمیر و مرمت در این دو ساختمان وجود نداشته، لذا سازه‌ها محکوم به تخریب کامل و نوسازی می‌باشند. در سرمای زمستان ترکیه چه بلایی سر ساکنین این ساختمان‌ها آمد؟ در نقطه مقابل فرض کنید آسیب در این ساختمان‌ها به حدی کم بود که تهدیدی برای فروریزش‌های احتمالی وجود نداشت و امکان سکونت مجدد برای ساکنین تامین می‌شد. بنابراین در مرحله بعدی می‌توان در مورد بازیابی کاربری ساختمان تصمیمات لازم را اتخاذ کرد. در این صورت آسیب‌های غیرمستقیم بعد از زلزله چقدر کاهش می‌یابد؟ در مقیاس یک کلان‌شهر مانند تهران نتایج این طراحی چگونه خواهد بود؟ سکونت مجدد در ساختمان (و بازیابی کاربری ساختمان) چقدر در مدیریت بحران بعد زلزله موثر است؟



شکل ۴ آسیب شدید ساختمان‌ها در زلزله ۲۰۲۳ ترکیه و عدم امکان سکونت مجدد در آنها

روند حال حاضر در طراحی و ساخت ساختمان‌ها، به وضوح بر عملکرد آنها در زلزله‌های آتی تاثیر می‌گذارد، به طوری که

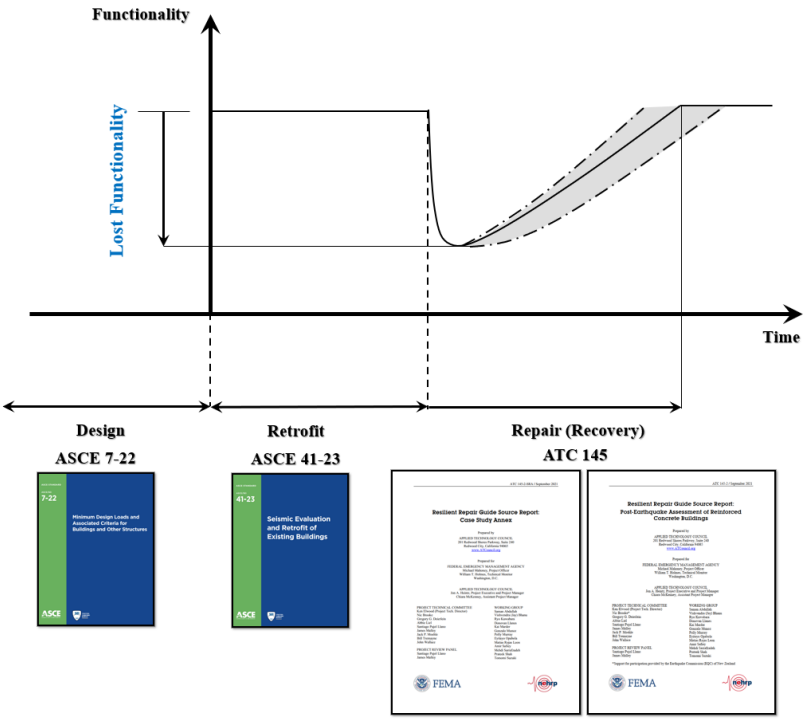
صرفه‌جویی در کاهش خسارات ناشی از زلزله

پیامد **مستقیم** این روند بر ساکنان ساختمان به شکل "آسیب جانی و مرگ و میر" بوده و برای خود ساختمان به صورت "تخریب کامل، تعمیر و یا رها کردن آن" خواهد بود. لیکن تاثیرات **اقتصادی**، **زیست محیطی** و **اجتماعی** ناشی از دو پیامد انسانی و ساختمانی (تا حدودی) است که اثرات ماندگار و جبران‌ناپذیر بر جوامع می‌گذارد. عملیاتی کردن تغییرات در طراحی با هدف جلوگیری از پیامدهای مذکور نیازمند یک **نیروی محرکه عظیم** می‌باشد. بنظر می‌رسد "**مدیران و سیاست‌گذاران ساختمانی**" تنها گزینه موجود برای تامین این نیروی محرکه باشند. بیش از ۱۳ سال از زلزله کرایسچرچ نیوزیلند می‌گذرد و خسارات سنگین به بار آمده به دلیل ضررهای تجاری، هزینه‌ها و بیمه‌ها، تاثیرات زیست محیطی، آسیب‌های شهری و رفاهی ناشی از این زلزله، باعث تغییر در رویکرد فعلی طراحی شده است. تاثیر اهداف طراحی جدید بر قابل مدیریت بودن برخی از این اثرات ارزیابی شده و در صورت نیاز اهداف طراحی مورد بازبینی مجدد قرار گرفته است. نتایج حاصل از ارزیابی‌های اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی گواه بر الزام تغییر در رویکرد طراحی است. در حال حاضر هدف طراحی تامین ایمنی جانی در زلزله طرح و جلوگیری از فروریزش در بزرگترین زلزله محتمل است. رویکرد جدید طراحی اهداف را به صورت زیر عنوان می‌کند:

۱- تامین قابلیت سرویس‌دهی ساختمان در زلزله‌های حد سرویس

۲- قابل تعمیر بودن آسیب‌های وارده به ساختمان در زلزله طرح

در شکل ۵ روند طراحی، مقاوم‌سازی و تعمیر براساس استانداردهای آمریکایی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که طراحی بر مبنای تعمیرپذیری (قابلیت بازیابی کاربری ساختمان) در حال حاضر در استاندارد ASCE 7-22 وجود ندارد.



شکل ۵ شماتیک روند طراحی، مقاوم سازی (قبل زلزله) و تعمیر (پس از زلزله) براساس کدهای آمریکائی

مطابق با کارگروه NEHRP 2026 برای تدوین ویرایش بعدی از استاندارد ASCE 7 (ASCE 7-28) این روش طراحی با عنوان "طراحی برمبنای بازیابی کاربری" معرفی خواهد شد. در همین راستا کمیته‌ای با همین عنوان برای تدوین ضوابط این روش جدید مطابق با شکل ۶ تعریف شده است.

- Functional Recovery Task Committee
- Soil-Foundation Design
- Interface between Structural Elements
- Ground Motion and Geotech
- Evaluation of Structures in very High Seismic Regions
- Drift Limit Evaluation
- Analysis Provisions for Elastic Design
- Non-Linear Analysis Update
- Unification of Diaphragm Design Provisions
- Building Design as Rocking System
- Design Provisions for Buried Structures
- Alignment of Seismic Isolation Provisions with Risk Targets
- Structural Design for Strength vs Ductility
- Nurture Engineer Creativity and Innovation

شکل ۶ کمیته‌های تشکیل شده برای تدوین NEHRP 2026

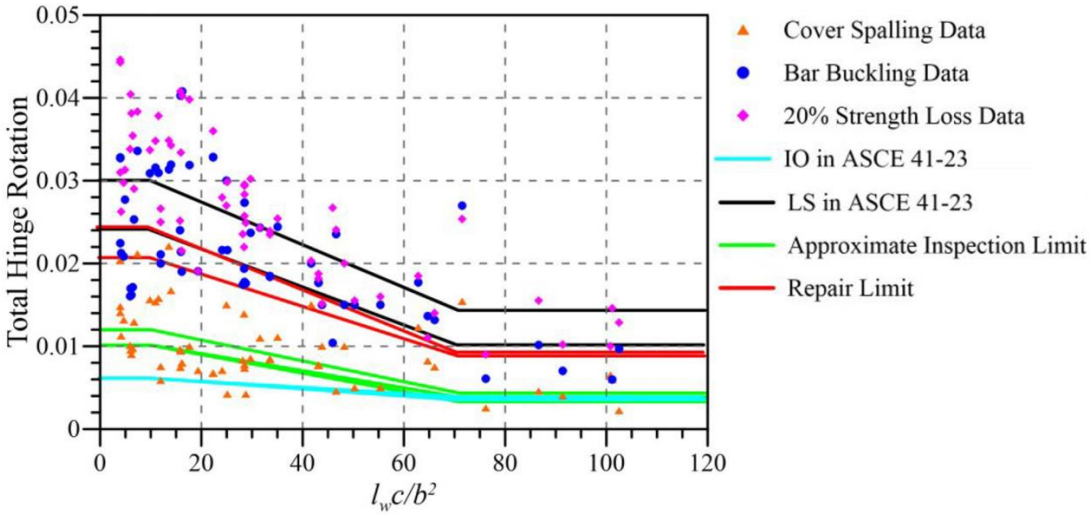
پروژه ATC 145 [۹] ضوابط تعمیرپذیری ساختمان‌های بتن‌آرمه را ارائه می‌کند. مشخصات این پروژه در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳ پروژه ATC 145

ATC Project No.	Project Title	Funding Agency	
ATC-145	Guide for Repair of Earthquake Damaged Buildings to Achieve Future Resilience	Federal Emergency Management Agency	FEMA

ضوابط پیشنهادی برای تعمیرپذیر بودن آسیب‌ها در ساختمان‌های بتن‌آرمه به صورت ارائه محدودیت‌های تغییرشکلی در طراحی المان‌های بتن‌آرمه می‌باشد. این ضوابط تا حدودی در استاندارد ASCE 41-23 معرفی شده است.

مطابق با شکل ۷ حدود دوران‌های دیوارهای برشی برای تعمیرپذیری معرفی شده در ATC 145 با مقادیر معیار پذیرش استاندارد ASCE 41-23 مقایسه شده است. پر واضح است که مقادیر تغییرشکل‌ها برای تعمیرپذیر بودن دیوارهای خمش کنترل، از کران پایین سطح عملکرد LS هم کوچکتر می‌باشد. در این شکل مقدار محدودیت تغییرشکل‌های پلاستیک در دیوارهای خمش کنترل، وابسته به پارامتر لاغری ترکیبی مقطع دیوار (λ_b) است. هرچقدر لاغری ترکیبی مقطع دیوار بزرگتر باشد مقدار مجاز تغییرشکل پلاستیک دیوار برای تعمیرپذیر بودن کاهش می‌یابد. این پارامتر برای اولین بار در استاندارد ACI 318-19 معرفی شد.



شکل ۷ حدود دورانی برای تعمیرپذیر بودن دیوارهای برشی براساس لاغری ترکیبی مقطع (λ_b)

صرفه‌جویی در کاهش خسارات ناشی از زلزله (گزارش اقتصادی NIBS 2019)

نتایج حاصل از پژوهش انجام شده سال ۲۰۱۹ در ایالات متحده آمریکا توسط شورای کاهش مخاطرات چندگانه در موسسه ملی علوم ساختمان (NIBS)، حاکی از آن است که افزایش الزامات لرزه‌ای ساختمان به صورت سالیانه ۷ میلیارد دلار در خسارات وارده صرفه‌جویی می‌کند. این در حالی است که سخت‌گیرانه‌تر شدن ضوابط مذکور، باعث افزایش سالیانه ۶۰۰ میلیون دلار در هزینه‌های ساخت و ساز می‌شود. بنابراین در سطح ملی، میانگین نسبت سود به هزینه، ۱۲ به ۱ خواهد بود. به عبارت دیگر با سرمایه‌گذاری هر ۱ دلار، ۱۲ دلار سود حاصل می‌شود (۱۲ دلار کاهش خسارات ناشی از زلزله). نسبت سود به هزینه در مناطقی که لرزه خیزی بالایی دارند بیشترین مقدار را دارد. لیکن سود خالص در مناطق با لرزه‌خیزی متوسط نیز مشهود می‌باشد. اگر چه طراحی لرزه‌ای مطابق با الزامات ارائه شده توسط NEHRP، حفاظت کامل و بدون آسیب ساختمان در برابر زلزله را تضمین نمی‌کند لیکن منجر به کاهش شدید خسارات می‌شود. گزارش مذکور در سال ۲۰۱۹ به صورت فایل PDF در ۶۵۸ صفحه توسط NIBS به صورت رایگان منتشر شده است [۸]. مطابق با جدول ۴ در این گزارش ۵ مخاطره طبیعی نظیر طغیان رودخانه، امواج ناشی از طوفان، باد، زلزله و آتش سوزی در ۵ استراتژی "کاهش خسارت" مورد ارزیابی هزینه-فایده قرار گرفته است. به دلیل لرزه‌خیزی بالای ایران، در این مقاله بخش "زلزله" از گزارش مذکور تشریح می‌شود.

جدول ۴ نسبت فایده به هزینه متوسط سالیانه براساس مخاطرات و اقدامات کاهش خسارات

National Institute of BUILDING SCIENCES	طراحی مطابق آئین‌نامه	طراحی فراتر از آئین‌نامه	بهسازی ساختمان	بهسازی شریان‌های حیاتی	کمک‌های مالی فدرال
نسبت کلی فایده به هزینه	11:1	4:1	4:1	4:1	6:1
هزینه (میلیارد دلار)	1/year	4/year	520	0.6	27
فایده (میلیارد دلار)	13/year	16/year	2200	2.5	160
طغیان رودخانه	6:1	5:1	6:1	8:1	7:1
امواج ناشی از طوفان	کاربرد ندارد	7:1	کاربرد ندارد	کاربرد ندارد	کاربرد ندارد
باد	10:1	5:1	6:1	7:1	5:1
زلزله	12:1	4:1	13:1	3:1	3:1
آتش سوزی شهری و جنگل	کاربرد ندارد	5:1	6:1	کاربرد ندارد	7:1

صرفه‌جویی در کاهش خسارات ناشی از زلزله

خسارات ناشی از بلایای طبیعی باد، سیل، زلزله و آتش‌سوزی در ایالات متحده در حال حاضر (۲۰۱۹) به طور متوسط ۱۰۰ میلیارد دلار در سال است، این مقدار در سال ۲۰۱۷ از ۳۰۰ میلیارد دلار تجاوز کرده است، این رقم معادل ۲۵٪ از ارزش ۱/۳ تریلیون دلاری ساختمان‌های در معرض مخاطرات در آن سال است. خوشبختانه استراتژی‌های مقرون به‌صرفه و بسیار مقرون به‌صرفه‌ای وجود دارد که سیاست‌گذاران و مالکان ساختمان می‌توانند با به‌کارگیری آن‌ها اثرات این خسارات را کاهش دهند. این استراتژی‌ها شامل اتخاذ ضوابط فعلی آئین‌نامه‌ها، طراحی برای ضوابط فراتر از آئین‌نامه‌های فعلی (طراحی فراتر از آئین‌نامه)، بهسازی ساختمان‌های موجود و شریان‌های حیاتی است. هزینه‌ها و فواید مرتبط با این اقدامات کاهش خسارات از طریق جامع‌ترین آنالیز هزینه-فایده شناسایی شده و در گزارشی تحت عنوان "**صرفه‌جویی در کاهش خسارات ناشی از مخاطرات طبیعی-۲۰۱۹**" منتشر شده است. این مطالعه توسط سه آژانس فدرال و چهار حامی بخش خصوصی تامین مالی شده و توسط NIBS (National Institute of Building Sciences) تدوین شده است.

در جدول ۴ مقادیر نسبت هزینه-فایده برای ۵ مخاطره طبیعی مختلف (طغیان رودخانه، امواج ناشی از طوفان، باد، زلزله و آتش سوزی شهری و جنگل) در هر کدام از استراتژی‌های کاهش خسارت نشان داده شده است. مقادیر BCRها هم برای تک تک مخاطرات و هم به صورت متوسط کلی ارائه شده است. در این نوشتار تمرکز برروی زلزله است و سایر مخاطرات بررسی نمی‌شود. برای کسب اطلاعات بیشتر در ارتباط با سایر مخاطرات به گزارش اصلی NIBS مراجعه شود [۸]. در ادامه نسبت **کلی** هزینه-فایده برای هر کدام از استراتژی‌ها به صورت خلاصه ارائه می‌شود:

- **طراحی مطابق با آخرین الزامات آئین‌نامه‌های ساختمانی مقرون به‌صرفه است و به ازای هر ۱ دلار سرمایه‌گذاری، ۱۱ دلار صرفه‌جویی می‌کند.** آئین‌نامه‌های ساختمانی تاب‌آوری جامعه در برابر بلایای طبیعی را تا حد زیادی بهبود بخشیده است، این در حالی است که تنها ۱٪ به هزینه‌های ساخت و ساز نسبت به استانداردهای ۱۹۹۰ اضافه می‌کند. بیشترین مزایا در کاهش خسارات به جوامعی تعلق می‌گیرد که از جدیدترین نسخه آئین‌نامه‌ها استفاده می‌کنند.
- **طراحی فراتر از آئین‌نامه می‌تواند به ازای هر ۱ دلار سرمایه‌گذاری، ۴ دلار صرفه‌جویی کند.** آئین نامه‌ها حداقل الزامات طراحی را برای تامین ایمنی جانی اتخاذ می‌کنند. طراحی برای فراتر از این عملکرد می‌تواند به صورت مقرون به‌صرفه‌ای ایمنی جانی را بهبود دهد و بازیابی کاربری ساختمان بعد از رخداد مخاطرات طبیعی را

سرعت بخشد.

- **مقاوم‌سازی ساختمان‌های بخش خصوصی می‌تواند به ازای هر ۱ دلار سرمایه‌گذاری ۴ دلار صرفه‌جویی کند.** ایالات متحده می‌تواند با سرمایه‌گذاری حدود ۵۰۰ میلیارد دلاری در بهسازی ساختمان‌های مسکونی بیش از ۲ تریلیون دلار صرفه جویی انجام دهند. راهکارهای بهسازی برای تمامی مخاطرات، در ۱۵ روش عملیاتی در گزارش NIBS ارائه شده است.
- **بهسازی شریان‌های حیاتی می‌تواند به ازای هر ۱ دلار سرمایه‌گذاری ۴ دلار صرفه‌جویی کند.** ارائه خدمات توسط شبکه برق‌رسانی و آب‌رسانی، مخابرات، جاده‌ها، فرودگاه‌ها و ... بعد از رخداد بلایای طبیعی بسیار حیاتی می‌باشد. مطالعات موردی نشان می‌دهد که بهسازی شریان‌های حیاتی برای تاب‌آوری در برابر بلایای طبیعی بسیار تعیین کننده است.
- **کمک‌های مالی فدرال به ازای هر ۱ دلار سرمایه‌گذاری ۶ دلار صرفه‌جویی می‌کند.** سرمایه‌گذاری انجام شده توسط FEMA، DEA و HUD برای کاهش خسارات از سال ۱۹۹۵ تا به اکنون (۲۰۱۹) به مقدار ۲۷ میلیارد دلار برای ایالات متحده هزینه داشته است. اما در نهایت ۱۶۰ میلیارد دلار صرفه‌جویی خواهد داشت. یعنی ۶ دلار صرفه‌جویی به ازای ۱ دلار سرمایه‌گذاری.

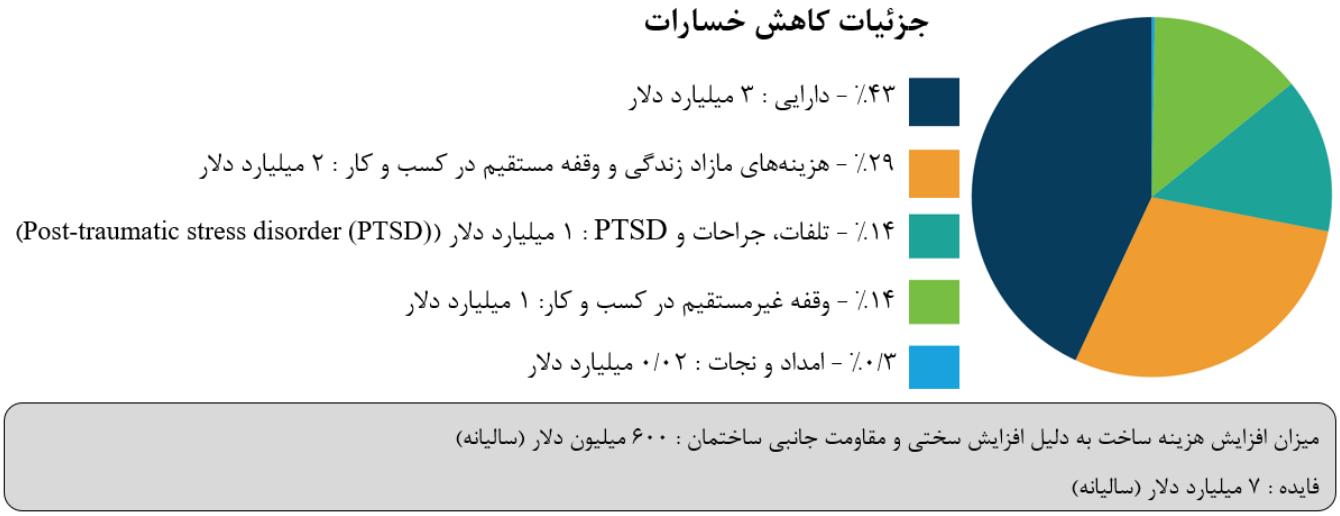
در ادامه تاثیرات هر کدام از این استراتژی‌ها برای خطر طبیعی "**زلزله**" بررسی می‌شود.

طراحی مطابق با آخرین الزامات آئین‌نامه‌های لرزه‌ای

با پیشرفت مهندسی در سال‌های اخیر، آئین‌نامه‌های ساختمانی در ایالات متحده به تدریج سختی و مقاومت جانبی ساختمان در برابر زلزله را افزایش دادند. برای مناطق با لرزه‌خیزی بالا در غرب ایالات متحده، از هر ۳۰ سال یکبار مقدار سختی و مقاومت جانبی نظیر با آئین‌نامه‌های ساختمانی حدود ۵۰٪ افزایش می‌یابد. بنابراین، به صورت میانگین ساختمان‌های سواحل غربی آمریکا که امروزه (سال ۲۰۱۹) براساس I-Codes ساخته می‌شوند، حدود 1.5 برابر مقاومت و سختی بیشتری نسبت به ضوابط Uniform Building Code 1988 دارند. مقاومت جانبی بیشتر باعث عدم فروریزش ساختمان در زلزله‌های بزرگ خواهد شد. سختی جانبی بیشتر باعث کاهش تغییر شکل جانبی ساختمان شده لذا میزان خسارات وارده به اجزای معماری نظیر دیوارها و پنجره‌ها را کاهش می‌دهد. افزایش مقاومت و سختی جانبی توسط 2018

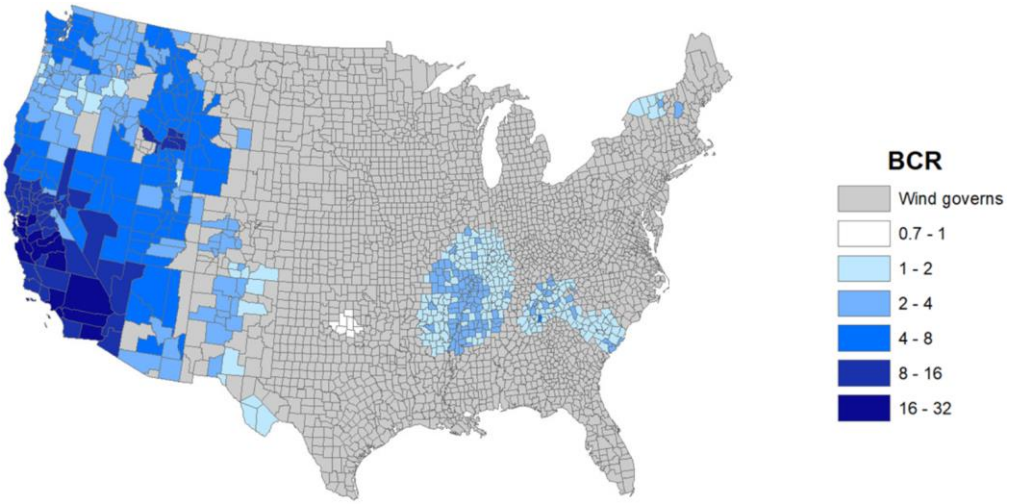
صرفه‌جویی در کاهش خسارات ناشی از زلزله

I-Codes هر ساله باعث افزایش ۶۰۰ میلیون دلار در هزینه ساخت ساختمان‌های جدید می‌شود لیکن به دلیل جلوگیری از عدم فروریزش ساختمان و کاهش خسارات معماری، در طولانی مدت باعث صرفه جویی ۷ میلیارد دلار خواهد شد. به عبارت دیگر با افزایش سختی و مقاومت جانبی ساختمان نسبت فایده به هزینه ۱۲ به ۱ می‌باشد. اگر افزایش سختی و مقاومت ساختمان باعث ۱ دلار افزایش هزینه‌های ساخت گردد در نهایت ۱۲ دلار باعث صرفه‌جویی در کاهش خسارات خواهد شد. شکل ۸ نشان دهنده جزئیات مزایای حاصل از این سرمایه گذاری است.



شکل ۸ هزینه و فایده کل برای ساختمان‌های طرح از ابتدا مطابق با حداقل ضوابط I-Codes 2018

تامین حداقل الزامات لرزه‌ای آئین‌نامه‌ها احتمالاً از فروریزش کلی ساختمان‌ها جلوگیری خواهد کرد (احتمالاً آسیب وارده به سازه به حدی است که بعد از زلزله امکان استفاده مجدد از ساختمان ممکن نخواهد بود). جلوگیری از فروریزش مذکور می‌تواند ۷ میلیارد دلار در کاهش خسارات صرفه‌جویی کند. به دلیل تامین ایمنی نسبی برای دارایی‌های موجود در ساختمان، ۴۳ درصد از مبلغ مذکور مربوط به حفظ دارایی‌های داخل ساختمان می‌باشد. ۲۹٪ از آن مربوط به کاهش هزینه‌های مازاد زندگی و وقفه مستقیم در کسب و کار، ۱۴٪ از آن مربوط به کاهش تلفات، جراحات و PTSD بوده و ۱۴٪ بعدی مربوط به کاهش خسارات مربوط به وقفه غیرمستقیم در کسب و کار و در نهایت ۰/۳٪ مربوط به کاهش هزینه‌های امداد نجات است.



شکل ۹ نسبت‌های فایده به هزینه برای طراحی مطابق با آئین‌نامه‌های زلزله به تفکیک مناطق

نسبت فایده به هزینه ۱۲ به ۱ معرفی شده در جدول ۴ مقدار متوسط در خطر زلزله برای کل ایالات متحده است. این نسبت برای مناطق مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود این نسبت در مناطق لرزه‌خیز بسیار بزرگتر هم خواهد بود. به عنوان مثال نسبت فایده به هزینه در ایالت کالیفرنیا می‌تواند تا ۳۲ افزایش یابد. به عبارت بهتر در مناطق با رنگ سرمه‌ای در صورت سرمایه‌گذاری ۱ دلاری برای افزایش مقاومت و سختی جانبی ساختمان‌ها می‌توان تا ۳۲ دلار در کاهش خسارات ناشی از زلزله صرفه‌جویی کرد. رنگ طوسی روشن نشان دهنده مناطقی است که باد حاکم بر طراحی است (بخش قابل ملاحظه‌ای از ایالات متحده). پرواضح است که این نسبت در مناطقی که بار باد کنترل کننده است کاربردی ندارد.

طراحی برای ارضای الزامات فراتر از I-Codes 2015

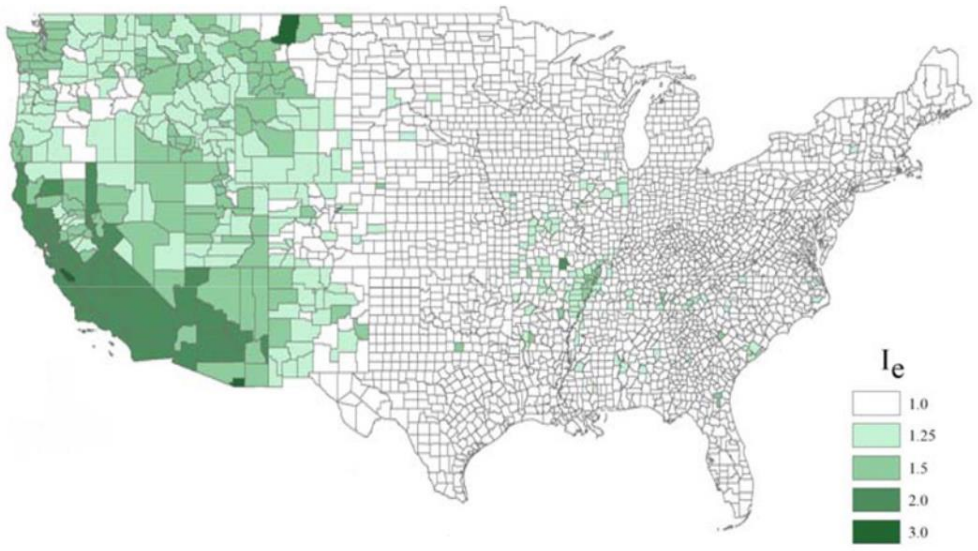
در این بخش فرض می‌شود هزینه‌ها و مزایای طراحی در تمامی ساخت و سازهای **جدید** فراتر از ضوابط منتخب در کدهای IBC 2015 و IRC 2015 است. این استراتژی در نهایت به ازای ۱ دلار سرمایه گذاری، سود ملی ۴ دلاری به همراه دارد. قوانین کدهای ساختمانی نظیر با طراحی مبتنی بر تامین ایمنی جانی است. در طراحی مبتنی بر ایمنی جانی، هدف کدهای ساختمانی جلوگیری از فروریزش کلی ساختمان می‌باشد. در طراحی برای ارضای الزامات فراتر از کدهای ساختمانی، الزامات سخت‌گیرانه‌تر می‌تواند ایمنی جانی را مقرون به صرفه‌تر تامین کند و بازیابی کاربری ساختمان (functional recovery) بعد از زلزله را سرعت بخشد.

صرفه‌جویی در کاهش خسارات ناشی از زلزله

با در نظر گرفتن مناطقی که در آنها طراحی فراتر از I-Codes 2015 برای زلزله دارای نسبت فایده به هزینه (BCR) بیشتر از 1.0 است، اگر تمامی ساختمان‌های جدید برای یکسال با **حداکثر ضریب کارایی** (I_E Max) برای مقاومت و سختی در شهر خود طراحی شوند، هزینه‌ها در مجموع در حدود 1.2 میلیارد دلار خواهد بود. مجموع فایده حاصل از این طراحی برابر با 4.3 میلیارد دلار خواهد بود. بنابراین نسبت فایده به هزینه در حدود ۴ به ۱ خواهد بود. ضریب I_E، مقاومت و سختی جانبی ساختمان را نسبت به حداقل مقدار ارائه شده در I-Codes 2015 افزایش می‌دهد.

I_E Max : ضریب طراحی نظیر با نقطه کاهش بازده، حداکثر مقداری از I_E که برای مقادیر بزرگتر از آن، هزینه‌ها بیشتر از سود افزایش می‌یابد. مقدار بهینه از I_E برای رسیدن به حداکثر مقدار BCR در یک شهر

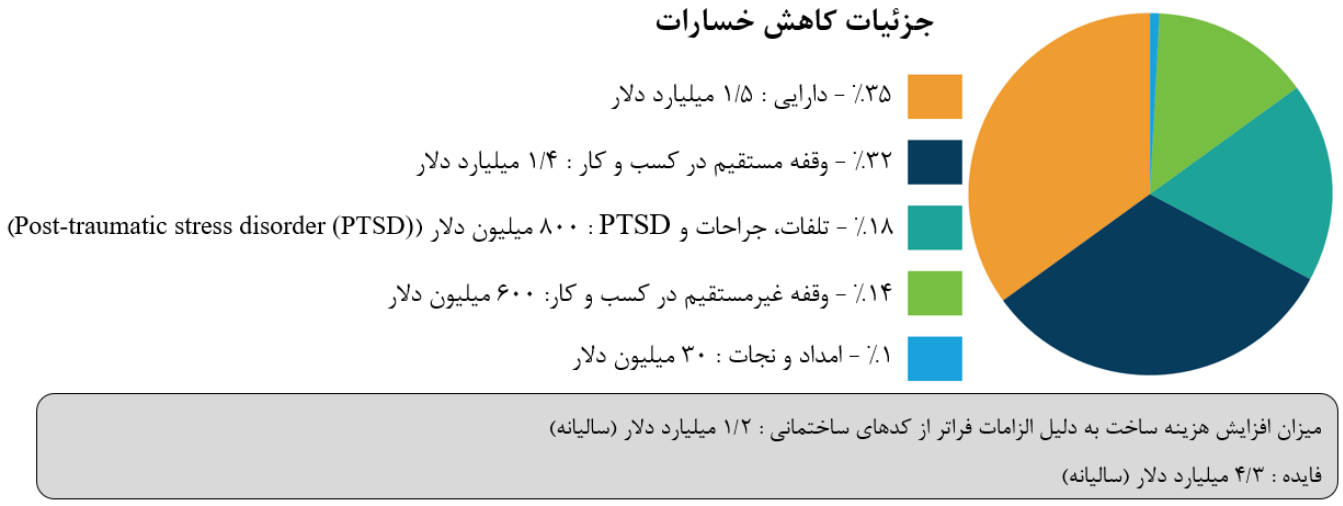
مطابق با شکل ۱۰ مقدار I_E Max برای ۲۷۰۰ شهر از دیدگاه BCR برابر با 1.0 است (معادل حداقل الزامات کد). با این حال برای حدود ۴۰۰ شهر، طراحی برای الزامات فراتر از I-Codes 2015 مقرون بصرفه به نظر می‌رسد. تقریباً ۴۰ میلیون نفر (۱۳٪ از جمعیت در سال ۲۰۱۰ در ایالات متحده) در شهرهایی زندگی می‌کنند که مقدار I_E Max دو برابر حداقل مقدار کد است. ۳۰ میلیون نفر دیگر (۱۰ درصد از جمعیت ایالات متحده) در شهرهایی زندگی می‌کنند که طراحی آنها با مقدار ۲۵٪ الی ۵۰٪ بزرگتر از حداقل کد به‌صرفه خواهد بود. ضوابط کدهای فعلی از دیدگاه BCR فقط برای ۷۵٪ درصد جمعیت ایالات متحده مقرون به‌صرفه است. مقدار I_E Max نظیر با مقاومت و سختی ساختمان‌ها برای شهرهای مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ حداکثر ضریب افزایشی مقاومت و سختی (I_E) نسبت به حداقل مقاومت و سختی در I-Codes 2015 برای رسیدن به بیشترین مقدار BCR

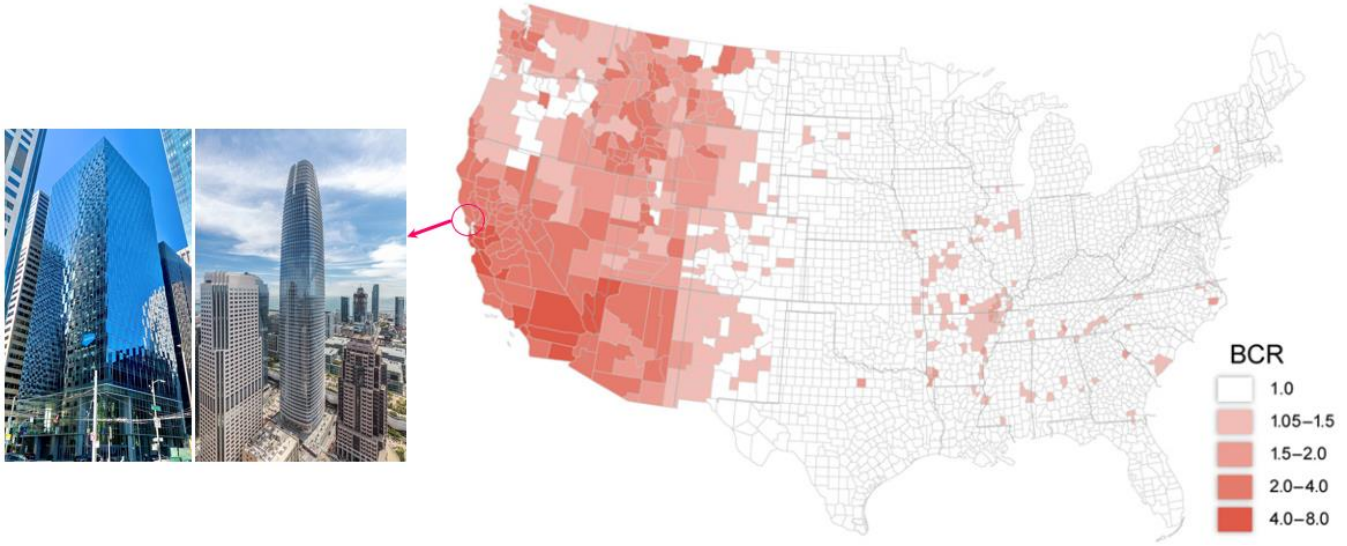
صرفه‌جویی در کاهش خسارات ناشی از زلزله

طراحی برای الزامات فراتر از کد علاوه بر تامین ایمنی جانی و جلوگیری از فروریزش، باعث می‌شود ساختمان بعد از رخداد زلزله قابلیت سکونت مجدد داشته و با صرف هزینه و زمان نسبتاً اندک، بازیابی کاربری آن میسر شود. طراحی فراتر از کد می‌تواند ۴/۳ میلیارد دلار در کاهش خسارات صرفه‌جویی کند. در این قسمت علاوه بر تامین ایمنی محتویات ساختمان، اجزای معماری و سازه ساختمان نیز قابل استفاده خواهد بود لذا ۳۵٪ از مبلغ مذکور مربوط به حفظ محتویات ساختمان و خود ساختمان می‌باشد. ۳۲٪ از آن مربوط به کاهش خسارات ناشی از وقفه مستقیم در کسب و کار است. ۱۸٪ آن مربوط به کاهش تلفات، جراحات و PTSD بوده و ۱۴٪ بعدی مربوط به کاهش خسارات مربوط به وقفه غیرمستقیم در کسب و کار و در نهایت ۰/۱٪ مربوط به کاهش هزینه‌های امداد نجات است. مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ۸، بخشی از کاهش خسارات مربوط به هزینه‌های مازاد زندگی می‌باشد، در این قسمت (طراحی فراتر از کد) به دلیل قابلیت استفاده مجدد از ساختمان، هزینه‌های مازاد زندگی کاملاً حذف می‌شود.



شکل ۱۱ هزینه و فایده کل برای طراحی فراتر از الزامات I-Codes 2015

اگر طراحی برای ضوابط فراتر از کد برمبنای ضریب $I_{E\ Max}$ انجام شود نسبت BCRها مطابق با شکل ۱۲ خواهد بود. سختگیری کدهای اتخاذ شده در سطح ایالتی و محلی بسیار متفاوت است. اگر چه حداقل الزامات کدها سطح قابل توجهی از ایمنی را فراهم می‌کنند، ولی جوامع می‌توانند با طراحی برای ضوابط فراتر از کد صرفه جویی بیشتری انجام دهند. در مناطقی که کدهای قدیمی‌تری وجود دارد یا هیچ کدی در آنها وجود ندارد هزینه‌ها و مزایای بیشتری نیز وجود خواهد داشت.



شکل ۱۲ نسبت BCRها برای طراحی فراتر از الزامات I-Codes 2015

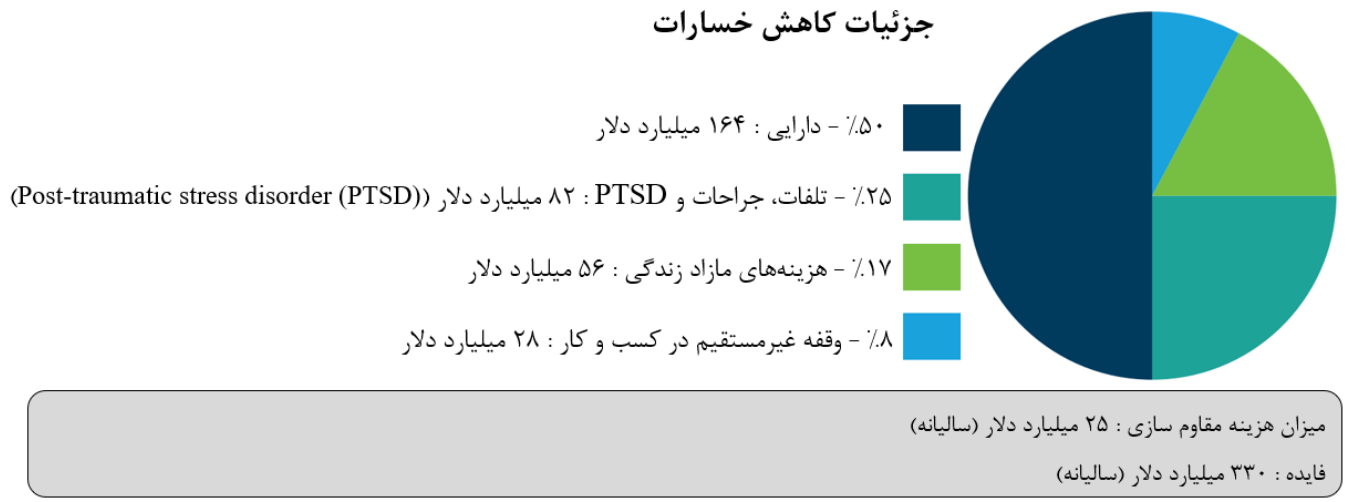
مقاوم‌سازی ساختمان‌های بخش خصوصی

امروزه منبع اصلی ریسک نظیر با مخاطرات طبیعی تعداد ساختمان‌های قدیمی است که قبل از کدهای ساختمانی مدرن ساخته شده‌اند. انجام برخی از متداول‌ترین یا اجرایی‌ترین اقدامات بهسازی در ساختمان‌های مسکونی موجود، ۴ دلار سود ملی برای ۱ دلار سرمایه گذاری ایجاد می‌کند.

راه‌های زیادی برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های مسکونی وجود دارد، این راهکارها عبارت‌اند از تقویت اولین طبقه در ساختمان‌هایی که مستعد تشکیل طبقه نرم-ضعیف هستند، مهار مناسب ساختمان‌هایی که به زمین متصل نیستند، مهار مناسب اجزای غیرسازه‌ای نظیر آبگرمکن، قفسه‌های کتاب، کابینت اشپزخانه، تلویزیون و ....

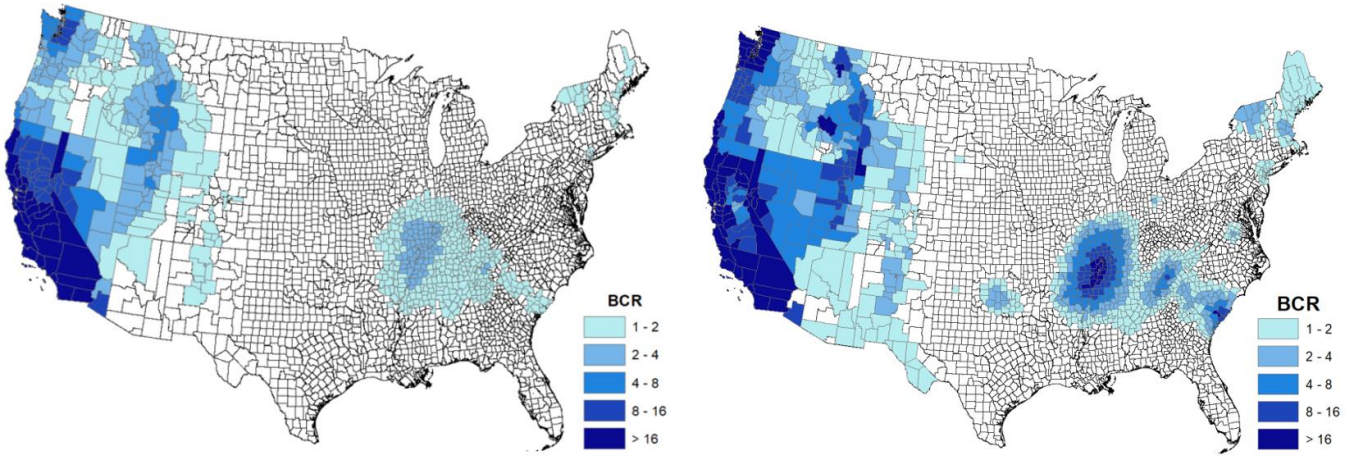
مقاوم‌سازی ساختمان‌های بخش خصوصی در مرحله اول از فروریزش کلی ساختمان جلوگیری کرده و احتمال رخداد آتش‌سوزی را بسیار کاهش می‌دهد. این استراتژی می‌تواند ۳۳۰ میلیارد دلار در کاهش خسارات صرفه‌جویی کند. مطابق با شکل ۱۳ به مقدار ۵۰٪ از مبلغ مذکور مربوط به حفظ دارایی‌های داخل ساختمان می‌باشد. ۲۵٪ آن مربوط به کاهش تلفات، جراحات و PTSD بوده و ۱۷٪ آن کاهش هزینه‌های مازاد زندگی بوده و در نهایت ۸٪ آن مربوط به کاهش هزینه‌های وقفه غیرمستقیم در کسب و کار است.

صرفه‌جویی در کاهش خسارات ناشی از زلزله



شکل ۱۳ هزینه و فایده کل برای مقاومسازی ساختمان‌های بخش خصوصی

مقادیر BCRها برای هفت راهکار مقاوم‌سازی بسیار متفاوت می‌باشد ولی میانگین آن‌ها مابین ۱:۲ و ۱:۲۴ می‌باشد. مقاوم سازی طبقه نرم، اتصال ساختمان به زمین و مهار آبگرمکن به ترتیب دارای BCR برابر با ۱:۱۲، ۱:۳ و ۱:۲۴ می‌باشد. به دلیل اینکه مهار آبگرمکن می‌تواند از اتش سوزی‌های بعد از زلزله جلوگیری کند لذا مقدار BCR آن به طور قابل ملاحظه بزرگتر است. در شکل ۱۴ نسبت BCRها برای دو راهکار مقاوم سازی طبقه نرم و مهار آبگرمکن نشان داده شده است. بالاترین BCRها مربوط به مناطق با لرزه‌خیزی بالاست. مقاوم سازی طبقه نرم در ایالت کالیفرنیا می‌تواند نسبت BCR بیش از ۱:۱۶ را حاصل کند. مکان‌یابی برای رسیدن به راهکارهای مقرون به‌صرفه از اهمیت بالایی برخوردار است.



الف) نسبت BCRها برای مقاوم‌سازی طبقه نرم

ب) نسبت BCRها برای مهار آبگرمکن‌ها

شکل ۱۴ نسبت BCRها برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های بخش خصوصی

جمع‌بندی و نتیجه گیری:

استانداردهای بین‌المللی مفاهیم طراحی مبتنی بر شکل‌پذیری را از اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ به‌کار گرفتند. به‌کارگیری این مفاهیم احتمالاً مهمترین پیشرفت بشر در تامین ایمنی جانی در زلزله‌های آتی می‌باشد. نظر به عجین بودن مفهوم شکل‌پذیری با آسیب سازه‌ای، تحقق شکل‌پذیری، بدون آسیب به سازه و محتویاتش امری ناممکن است. زلزله ترکیه ۲۰۲۳ نشان داد که در صورت عدم رعایت حداقل الزامات آئین‌نامه‌ها علاوه بر تلفات جانی بسیار زیاد (بیش از ۵۱۰۰۰ نفر کشته)، خسارات سنگین اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی نیز کشور را تهدید می‌کند. زلزله ۲۰۱۱ کرایسچرچ در نیوزیلند نشان داد که حتی با وجود تامین ایمنی جانی (فقط ۱۸۵ کشته)، خسارت سنگینی اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی کماکان کشور را تهدید خواهد کرد. بنابراین با رعایت حداقل الزامات آئین‌نامه‌های فعلی (نظیر استاندارد ۲۸۰۰) کماکان خسارات سنگینی تحت زلزله‌های شدید به کشورهای لرزه‌خیز تحمیل خواهد شد.

برای جلوگیری از بحران‌های مذکور، بیش از یک دهه است که سیاستگزاران و متوالیان طراحی لرزه‌ای در کشورهای لرزه‌خیز نظیر نیوزیلند و ایالات متحده خواهان طراحی "بهتر از آئین‌نامه یا فراتر از آئین‌نامه" می‌باشند. یک راه سازنده برای طراحی "بهتر از آئین‌نامه یا فراتر از آئین‌نامه"، نه تنها تلاش برای تامین ایمنی جانی است بلکه اندیشیدن درباره تحقق زمان بازیابی قابل قبول در کاربری ساختمان بعد از رخداد زلزله است. مجوز مجددی که توسط سنای آمریکا به NEHRP داده شده است این مهم را انجام می‌دهد. در این مجوز از هر دو سازمان FEMA و NIST خواسته شده است تا با کمک تمامی متخصصان "گزینه‌هایی برای بهبود محیط ساخته شده و زیرساخت‌های حیاتی که منعکس کننده اهداف عملکردی تعریف شده برحسب قابلیت استفاده مجدد پس از زلزله و مدت زمان بازیابی کاربری بعد از زلزله" است را پیشنهاد دهند.

در حال حاضر هدف طراحی در استاندارد ASCE 7-22 تامین ایمنی جانی در زلزله طرح و جلوگیری از فروریزش در بزرگترین زلزله محتمل است. رویکرد جدید طراحی در استاندارد ASCE 7-28 اهداف را به صورت زیر عنوان خواهد کرد:

۱- تامین قابلیت سرویس‌دهی ساختمان در زلزله‌های حد سرویس

۲- قابل تعمیر بودن آسیب‌های وارده به ساختمان در زلزله طرح (طراحی برمبنای بازیابی کاربری)

مراجع:

1-Marquis F, Kim JJ, Elwood KJ and Chang SE (2015).“Understanding post-earthquake decisions on multi-storey concrete buildings in Christchurch, New Zealand”. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(2).

2- Seibel, W. Erosion of professional integrity: The collapse of the canterbury TV building in christchurch on 22 February 2011. In Collapsing Structures and Public Mismanagement; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2022; pp. 87–128.

3-Binici, B., Yakut, A., Kadas, K. et al. Performance of RC buildings after Kahramanmaraş Earthquakes: lessons toward performance-based design. Earthq. Eng. Eng. Vib. 22, 883–894 (2023).

4-Federal Register, 2016. “Executive Order 13717 of February 2, 2016: Establishing a Federal Earthquake Risk Management Standard.” V.84, n.24, February 5.

5-Senate Bill 1768, 2018. “National Earthquake Hazards Reduction Program Reauthorization Act of 2018.” 115th Congress.

6-NIST, 2017. Implementation Guidelines for Executive Order 13717: Establishing a Federal Earthquake Risk Management Standard [ICSSC Recommended Practice (RP) 9]. U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, January.

7-42 U.S.C. § 7705b, 2018. “Seismic Standards.” United States Code. (2019).

8-National Institute of Building Sciences, Natural Hazard Mitigation Saves: 2019 Report, 2019

9-ATC. (2021). Resilient Repair Guide Source Report: Post-Earthquake Assessment of Reinforced Concrete Buildings. Redwood City, California.

10-American Society of Civil Engineers (ASCE)/SEI 41-17 (2017) Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. Reston, VA: ASCE.