

Investigating life-cycle cost for resilient RC frames with enhanced seismic performance objectives

Bahram Mohammadpour¹, Alireza Manafpour^{2*}

1- PhD Student, Civil Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran

2- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran

ABSTRACT

A seismic-resistant structure not only should provide safety for the residents but also it should minimize the financial loss resulting from the earthquake. Therefore, it must be demonstrated that the structure will remain in acceptable situation after the earthquakes with various intensities. The past has shown that, the financial loss of earthquake for the structures that have been designed based on performance objectives of current seismic codes, is considerable and this results in additional problems. Therefore, it seems that upgrading performance objectives for structures can significantly reduce earthquake losses. Improving the performance objectives of structures is associated with increasing the initial cost of the project. But reducing the damage of resilient structures and the cost of repairing of damaged components in these structures can reduce the ratio of initial cost to total cost. In this study, the effect of enhanced performance objectives in increasing the initial cost of the project and reducing the costs of repairing the damaged components of concrete structures is discussed. To investigate this issue, 3, 5, 10 and 15 storey regular concrete frame structures are modeled and designed based on Design Basis Earthquake of current seismic codes (DBE) and also based on Maximum Considered Earthquake (MCE) for the same performance objectives. The loss and repairing cost of the structures are evaluated according to FEMA-P58 guideline and using PACT software under 6 near-field and 5 far-field records. The results of this study show that, enhancing the design objective of concrete frame structures increases initial cost of lateral resisting frames (beams and columns) and the total cost of the building by 23% and 5%, respectively. Whereas the repair costs of the structure and the whole building are reduced by 43% and 18%, respectively, which ultimately leads to reduction of the life cycle cost for the structures by 13%.

ARTICLE INFO

Receive Date: 19 January 2022

Revise Date: 26 April 2022

Accept Date: 27 May 2022

Keywords:

Life-Cycle cost

Resilience

Enhanced Performance

RC Frame

Seismic Design

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.325565.2701>

*Corresponding author: Alireza Manafpour

Email address: a.manafpour@urmia.ac.ir

بررسی هزینه چرخه عمر قابهای بتن آرمه تاب آور با سطح طراحی لرزه ای ارتقا یافته

بهرام محمدپور^۱، علیرضا مناف پور^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

یک سازه ایمن و مقاوم در برابر زمین لرزه علاوه بر تامین ایمنی جانی برای ساکنین می بایست خسارات مالی و اقتصادی ناشی از زلزله را نیز کمینه سازد. لذا باید اطمینان پیدا کرد که سازه مورد نظر با پشت سر گذاشتن زمین لرزه هایی با شدت های مختلف در شرایط قابل قبولی باقی می ماند. گذشته نشان داده است که، خسارات مالی و جانی ناشی از زلزله برای سازه های طرح شده با اهداف عملکردی آیین-نامه های لرزه ای فعلی نیز، قابل توجه بوده و مشکلات بسیاری را فراهم می سازد. لذا چنین به نظر می رسد که ارتقا اهداف عملکردی برای سازه ها می تواند خسارات حاصل از زلزله را بصورت قابل توجهی کاهش دهد. ارتقا اهداف عملکردی سازه ها، با افزایش هزینه اولیه طرح همراه است. اما کاستن خسارت وارد بر سازه های تاب آور و هزینه های ناشی از تعمیر اجزای آسیب دیده در آنها می تواند نسبت هزینه اولیه به هزینه کل را کاهش دهد. در تحقیق حاضر تاثیر ارتقا اهداف عملکردی در افزایش هزینه اولیه طرح و کاهش هزینه های ناشی از تعمیر اجزای آسیب دیده سازه های بتنی، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. برای بررسی این موضوع، سازه های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه بتنی منظم مدلسازی شده و برای سطح خطر طرح آیین نامه های لرزه ای (DBE) و حداکثر سطح خطر متصور در آیین نامه ها (MCE) برای اهداف عملکردی یکسان طراحی شده اند. خسارت و هزینه های تعمیر سازه ها بر اساس روش دستورالعمل FEMA-P58 توسط برنامه PACT تحت ۶ رکورد حوزه نزدیک و ۵ رکورد حوزه دور از گسل ارزیابی شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان دادند که، ارتقا سطح طراحی سازه های بتنی هزینه اولیه اسکلت (تیرها و ستون ها) و هزینه کل ساختمان را به ترتیب ۲۳ و ۵ درصد افزایش می دهد. این در حالی است که هزینه های تعمیر اسکلت سازه و کل ساختمان به ترتیب ۴۳ و ۱۸ درصد کاهش می یابد که در نهایت منجر به کاهش ۱۳ درصدی هزینه چرخه عمر سازه ها می گردد.

کلمات کلیدی: هزینه چرخه عمر، تاب آوری، عملکرد ارتقاء یافته، قاب بتن آرمه، طراحی لرزه ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.325565.2701	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.325565.2701	۱۴۰۱/۱۲/۲۹	۱۴۰۱/۰۳/۰۶	۱۴۰۱/۰۳/۰۶	۱۴۰۱/۰۲/۰۶	۱۴۰۰/۱۰/۲۹
				*نویسنده مسئول:		
				علیرضا مناف پور		
				a.manafpour@urmia.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

بخاطر وجود شکستگی‌های فراوان در پوسته زمین (گسل‌ها) بسیاری از مناطق و کشورهای با تراکم جمعیت بالا، مستعد لرزه-خیزی بسیار بوده و همه ساله زلزله‌های بسیار خطرناک، مهیب و آسیب‌رسان در آنها اتفاق می‌افتد که در نتیجه آن افراد و انسان‌های بسیاری در کنار از دست دادن عزیزان و نزدیکان خود، خانه و کاشانه خود را از دست داده و یا بعلاوه هزینه بالای تعمیر آنها، چندین سال از نظر سکونت بلا تکلیف می‌مانند. برای جلوگیری از نتایج فوق، آیین‌نامه‌های طراحی و لرزه‌ای همواره بدنبال طرح یک سازه ایمن و مقاوم در برابر زلزله بوده‌اند و برای این منظور از بدو مطرح شدن ضوابط طرح لرزه‌ای، روش‌های مختلفی برای ساخت سازه‌های ایمن و مقاوم بیان و تعریف شده است. متغیر بودن ماهیت زلزله‌هایی که رخ داده و یا می‌تواند در آینده رخ دهد، همواره نتایج مورد انتظار از عملکرد سازه‌ها را با احتمالات و عدم قطعیت‌های بسیاری همراه ساخته است. کسب تجربه از زلزله‌هایی که بوقوع پیوسته و پیشرفت امکانات آزمایشگاهی و نرم‌افزارهای تحلیلی برای شبیه‌سازی رفتار سازه‌ها در مقابل زلزله‌های احتمالی، موجبات ارایه رویکردهای مختلف برای طراحی لرزه‌ای سازه‌ها را فراهم نموده است. در انتخاب رویکردهای مناسب برای طراحی عوامل بسیاری از اعم از اقتصاد طرح، اهمیت سازه و نیازهای کارفرمایان مطرح بوده که با در نظر گرفتن آنها، اهداف عملکردی سازه‌ها انتخاب و برای تامین سطوح عملکرد متناسب با این اهداف، طرح سازه‌ها انجام می‌گردد. اما تجربیات زلزله‌های چندین ساله در کشورهای توسعه یافته و یا در حال توسعه، عامل مهم دیگری تحت عنوان مقدار خسارت و تاب‌آوری سازه را نیز در انتخاب رویکرد مناسب برای تعیین اهداف عملکردی سازه‌ها مطرح می‌کند. تاب‌آوری سازه‌ها که متاثر از اهداف عملکردی تعریف شده و انتظارات متناسب با همان اهداف می‌باشد، مقدار خسارت، هزینه و زمان تعمیر و در حالت کلی آمادگی برای بازگرداندن سازه به حالت اولیه را در انتخاب رویکردهای طراحی مطرح می‌نماید. برای انتخاب و تعیین تاب‌آوری سازه‌ها دستورالعمل‌های متعدد از جمله FEMA-P58 [۱] تدوین شده است که مسیر و چگونگی تعیین ضرر و زیان سازه‌ای را بیان می‌دارد. مطالعات بسیاری برای تعیین ضرر و زیان لرزه‌ای انجام شده است که می‌توان به مطالعه Xu و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۲] اشاره نمود که، به بررسی یک روش پیش‌بینی برای تعیین آسیب و ضرر و زیان لرزه‌ای ساختمان بر اساس روش FEMA P-58 پرداخته‌اند. ایشان در این تحقیق الگوریتم‌های پیش‌بینی مختلف را به منظور بررسی هزینه مورد نیاز برای تعمیر سازه‌ها را ارزیابی نموده‌اند که در این الگوریتم‌ها نتایج بر اساس تحلیل تاریخچه زمانی و میزان خسارت‌ها بر اساس منحنی‌های شکنندگی تعیین شده است. آنها بر اساس الگوریتم پیش-بینی خود میزان ضرر و زیان سازه ۶ طبقه بتنی بر اساس مدل اطلاعات ساختمان را مورد بررسی قرار داده‌اند که توانستند مقدار ضرر و زیان اجزای سازه‌ای را با دقت قابل قبولی تعیین نمایند. Cremon و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۳] مقایسه‌ای مابین میزان خسارت حاصل از نتایج ابزار دقیق لرزه‌ای کار گذاشته شده در ساختمان‌ها را با میزان خسارت حاصل از روش FEMA P-58 برای همان ساختمان‌ها انجام داده‌اند تا میزان خطا و عدم قطعیت در نتایج روش FEMA P-58 مشخص شده و تاثیر استفاده از نتایج ابزار دقیق لرزه‌ای در تعیین خسارت‌های حاصل از زلزله مشخص گردد. ایشان در این تحقیق از پاسخ‌های اندازه‌گیری شده زلزله نورتریج ۱۹۹۴ استفاده نمودند و با بررسی‌هایی که انجام دادند، مشخص شد که اگر بعد از وقوع یک زلزله پاسخ‌های اندازه‌گیری شده از زلزله در دسترس باشد، مقدار خطاهای احتمالی در پیش‌بینی خسارت کاهش یافته و مالکین ساختمان‌ها می‌توانند بعد از وقوع یک زلزله سریعاً از مقدار خسارت وارد بر سازه‌ها مطلع گردند. در مطالعه ای که توسط Vecchio و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۴] انجام گرفته، هزینه‌های تعمیر واقعی پنج سازه بتن مسلح آسیب دیده در زلزله سال ۲۰۰۹ L'Aquila ارزیابی شده است. هزینه‌های تعمیر اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای که انواع مختلفی از آسیب‌های لرزه‌ای را تجربه کرده‌اند مورد بحث قرار گرفته‌اند و سپس بعنوان معیار پیش‌بینی از آنها استفاده شده است. مولفه‌های سازه‌ای به دو گروه مولفه حساس به دررفت و حساس به شتاب بر مبنای تقسیم بندی FEMA P-58 گروه‌بندی شده‌اند. با استفاده از نرم‌افزار PACT [۵] مدل کمی برای ارزیابی خسارت و آسیب برای سازه‌های مورد نظر تشکیل شده و با انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای سازه‌های سه‌بعدی، هزینه‌های واقعی تعمیر برای ساختمان‌های مورد مطالعه بین ۱۵٪ الی ۷۲٪ هزینه‌های جایگزینی کل می‌باشد. این در حالی است که، فقط ۱۴-۴۴٪ هزینه‌های جایگزینی کل مربوط به هزینه‌های تعمیر ساختمان‌ها می‌باشند. در راستای مطالعه خسارت وارد بر سازه‌ها و ارزیابی هزینه‌های تعمیر آنها بر اساس روش FEMA P-58، مطالعه‌ای توسط O'Reilly و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۶] برای ارزیابی لرزه‌ای سه ساختمان مدرسه در ایتالیا انجام گرفته است. در این مطالعه خسارت وارد بر اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای توسط برنامه PACT

مدلسازی شده است. در این تحقیق تاثیرات لرزه خیزی منطقه مورد توجه قرار گرفته است که نتایج نشان دهنده سهم بیشتر اجزای غیرسازه‌ای در اعمال خسارت بر سازه‌ها در هر دو منطقه لرزه‌ای است. مطالعه‌ای که در رابطه با خرابی لرزه‌ای و برآورد آسیب‌های وارد بر سازه‌های بتنی مسلح، بنایی غیرمسلح و سازه‌های چوبی کشور ترکیه با ارتفاع کم و متوسط تحت ۱۰۰ رکورد واقعی زلزله انجام شده است نشان داد که، مقدار خرابی‌هایی که در طی یک زلزله اتفاق می‌افتد به راحتی قابل پیش‌بینی نیست؛ چون مقدار تلفات و خرابی‌های ایجاد شده حاصل از زلزله به عوامل مختلفی از جمله زمان رخداد زلزله نیز وابسته بوده و زمان وقوع زلزله در مقدار تلفات و مرگ و میر بسیار مهم است. همچنین نتایج تحقیق فوق نشان دهنده‌ی این است که اکثر سازه‌های موجود در مقابل زلزله طرح آسیب‌پذیر بوده و از عملکرد لرزه‌ای قابل قبولی برخوردار نخواهند بود بطوری که؛ ۵/۱ درصد ساختمانها در ناحیه ۱ مورد بررسی و ۳/۸ درصد ساختمان‌ها در ناحیه ۲ مورد بررسی این تحقیق خسارات سنگینی را در طی زلزله‌ای با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله خواهند دید. تعداد تلفات مورد انتظار برای مناطق مورد مطالعه ۱ و ۲ در طی زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله به ترتیب برابر ۲۱۱ و ۲۵۲۰ نفر است [۷]. همچنین روشن است که؛ خسارات یک سازه در طی یک زلزله احتمالی به آسیب‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای و هزینه‌ی تعمیر آنها منوط نبوده و ایجاد توقف در کسب و کار نیز بعنوان خسارت مالی مالکین ساختمان‌ها در نظر گرفته می‌شود [۸]. در طی تحقیقی برآورد مستقیم ضرر و زیان مالی و اقتصادی ناشی از زلزله برای شهر سانفرانسیسکو انجام شده است. در این تحقیق به دلیل وجود گسل‌های حوزه نزدیک، اثرات جهت‌پذیری رکوردهای حوزه نزدیک گسل نیز بصورت صریح مد نظر بوده‌اند. برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای احتمالی از نظر زیان‌های اقتصادی از ابزار ارزیابی عملکردی (PACT) استفاده شده است. نتایجی که برای ساختمان تایپه واقع در شهر سانفرانسیسکو که یک ساختمان بلند قدیمی بوده و بر اساس ضوابط قدیمی طراحی ساختمان‌های بلند طراحی شده است نشان می‌دهد، هزینه‌های ناشی از تعمیر حاصل از زلزله‌های احتمالی ۳۴٪ هزینه جایگزینی ساختمان است. این در حالی است که افزایش تاب‌آوری می‌تواند ۹۲٪ خسارات فوق را برای این ساختمان کاهش دهد [۹]. تجربیات حاصل از زلزله‌های دو دهه اخیر، نشان دادند که در نظر گرفتن مقدار خسارت مورد انتظار سازه در مقابل زلزله‌های احتمالی جهت تعیین اهداف عملکردی مورد نیاز می‌باشد. چرا که میزان خسارت زلزله‌های اواخر قرن بیستم مانند زلزله‌های لوما پرییتا^۱، نورتریج و کوبه^۲ حتی در مناطقی که مقررات و ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه بر ساختمان‌ها حاکم می‌باشد؛ بسیار بیشتر از انتظار عمومی بود و همین مسأله مقدار خسارت حاصل از زلزله‌ها را بخوبی نشان داد [۱۰]. Vona و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۸، پیشنهاداتی در مورد تاب‌آوری واقعی و کمی جوامع و الگوی تحقیق آن ارائه نمودند که پیش از آن فقط به صورت کیفی و مفهومی بیان شده بود. سرانجام ایشان یک مدل جدید برای بهبود و کمی‌سازی تاب‌آوری جامعه ارائه دادند که این مدل بر اساس ارزیابی عددی و احتمالی عملکرد ساختمانها، هزینه و زمان تعمیر است که با بررسی سناریوهای مختلف مقاوم‌سازی و میزان آسیب، می‌تواند بهترین گزینه را برای افزایش تاب‌آوری سازه در نظر بگیرد. در مطالعه‌ای که توسط Samadian و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۹ انجام شده است؛ تاب‌آوری لرزه‌ای سازه قاب خمشی بتنی مدرسه ای که در سال ۲۰۰۰ در شهر تهران ساخته شده است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدرسه مذکور حدود یک دهه بعد با استفاده از دیوار برشی بتنی مقاوم سازی شده بود. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که، مقاوم‌سازی سازه فوق باعث کاهش خسارت و ضرر و زیان در سازه شده و تاب‌آوری سازه را افزایش می‌دهد. ایشان برای بررسی خسارت در سازه از منحنی‌های شکنندگی و آسیب‌پذیری استفاده نمودند و نتیجه تحقیق آنها نشان داد که؛ مقاوم‌سازی سازه‌ها باعث کاهش قابل توجه در هزینه‌های تعمیر شده و زمان بازگرداندن سازه به وضعیت قبلی نیز کمتر گشته است. Rautela و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۹، با بررسی مناطق آسیب دیده در اثر زلزله هندوستان با تکنیک غربالگری بصری سریع (RVS)^۳ تاب‌آوری لرزه‌ای مدارس را بررسی و بر اساس میزان خرابی، آنها را به درجات مختلفی تقسیم‌بندی کردند. مشاهدات آنها نشان داد که مقدار خرابی در اکثر سازه‌های واقع در آن منطقه به اندازه‌ای است که امکان تعمیر مجدد وجود نداشته و باید تخریب و نوسازی مجدد صورت بگیرد و سازه‌های بسیار کمتری قابلیت تعمیر و استفاده مجدد را دارند. Shamsoddini Motlagh و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۲۰، تاب‌آوری لرزه‌ای مدرسه‌ای بتنی را با استفاده از منحنی‌های آسیب‌پذیری در تهران بررسی کردند که تحت خوردگی کربناسیون قرار گرفته است. آنها تاثیر پالس حوزه نزدیک و سطوح مختلف خطر را برای ارزیابی خسارت وارد بر سازه‌ها در نظر گرفتند. نتایج بدست آمده نشان دهنده‌ی کاهش شاخص تاب‌آوری در مدارس تحت خوردگی نسبت به حالت بدون خوردگی به هنگام زلزله است

¹ Loma Prieta

² Kobe

³ Rapid Visual Screening

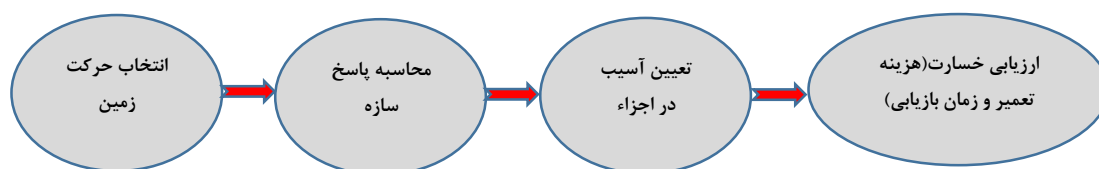
که این میزان کاهش در سطوح خطر بالاتر، بیشتر بوده است. Joyner and Sasani [۱۵] در سال ۲۰۲۰، تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی ویژه را با روشی مبتنی بر ریسک مورد بررسی قرار دادند و تاثیر تغییرات در سختی، مقاومت و ظرفیت تغییر شکل سازه را در مقابل دو معیار عملکرد مبتنی بر تاب‌آوری، یعنی زوال عملکرد و هزینه تعمیر نشان دادند. نتایج ایشان نشان دادند که بسته به ارتفاع طبقات، متغیرهای طراحی از جمله سطح خطر زلزله، می‌توانند تاثیرات مختلفی را بر روی معیارهای تاب‌آوری قرار دهند به گونه‌ای که سطوح خطر کمتر طراحی، ظرفیت سازه‌های طراحی شده را کاهش داده و از اینرو مقدار هزینه تعمیر را افزایش می‌دهد که این مهم باعث کاهش تاب‌آوری سازه‌ها می‌گردد. اولاد عظیمی و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۲۰ دو ساختمان مسکونی با سیستم مقاوم جانبی بتنی و فولادی را در شهر تهران از نظر چرخه عمر ارزیابی کردند. در این مطالعه از روش LCA و نرم افزار GaBi برای انجام ارزیابی مقایسه‌ای چرخه عمر استفاده شده است. با استفاده از ابزار ارزیابی چرخه عمر، تمام مراحل چرخه عمر یک ساختمان از جذب مصالح خام تا تخریب و بازیافت زباله‌ها مورد تحلیل قرار گرفته است. در این مطالعه اثرات زیست محیطی، شامل پتانسیل گرمایش جهانی در ۱۰۰ سال، اسیدشدگی، پتانسیل غنی‌سازی، تولید سم توسط انسان (اثرات سرطان و غیر سرطانی)، کاهش منابع (آب و مواد معدنی)، تغییرات آب و هوا، مصرف سوخت فسیلی، اسیدی شدن هوا و سمیت زیستی مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج تحقیق فوق می‌توان ملاحظه نمود که ساخت یک ساختمان دارای هزینه‌های جانبی بسیاری هست که علاوه بر هزینه‌های مالی، هزینه‌های زیست محیطی قابل توجهی نیز دارد. لذا با کاهش آسیب‌پذیری در ساختمان‌ها تحت وقوع زمین‌لرزه در کنار هزینه‌های تعمیر، هزینه‌های زیست محیطی نیز در چرخه عمر ساختمان کاهش می‌یابد. رهگذر و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۲۱ قابلیت اطمینان لرزه‌ای هسته‌های فولادی گهواره‌ای کنترل شده (CRSCs) را مورد بررسی قرار داده‌اند. بدین منظور تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی گسترده‌ای بر روی الگوهای با ارتفاع کم و متوسط انجام شده است. یک سری از متغیرهای تصادفی، از جمله پارامترهای هندسی، خواص مواد، و جزئیات طراحی کابل‌های پس‌تنیده (PTs) و اتلاف انرژی (EDs) برای ارزیابی قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده است. بردارهای متغیرهای تصادفی توسط شبیه سازی مونت کارلو برای ضریب تغییرات ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد تولید شده‌اند. با در نظر گرفتن عدم قطعیت در رابطه با متغیرهای تصادفی، پاسخ‌های بیشینه جابجایی برای CRSCs تحت ۴۴ رکورد دور از گسل تعیین شده‌اند. شکست احتمالی و شاخص قابلیت اعتماد برای سه سطح عملکرد اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش طراحی قابل اعتماد بوده و ایمنی سیستم هسته‌ای فولادی گهواره‌ای کنترل شده تامین می‌شود. با این حال احتمال خرابی الگوهای با ارتفاع متوسط بیشتر از الگوهای با ارتفاع کم می‌باشد. بر اساس آنچه که از مفاهیم تاب‌آوری برمی‌آید؛ اگر خرابی ایجاد شده در سازه‌ها در طی یک زلزله به اندازه‌ای باشد که زمان و هزینه تعمیر سازه‌ها برای برگشت به حالت اولیه و اشغال مجدد کمینه بوده و آسیب‌های روانی و اجتماعی حاصل از تعمیر کاهش یابد، می‌توان به سازه‌های تاب‌آور دست یافته و با تعیین زمان و هزینه تعمیر سازه‌ها، خسارت وارد بر سازه‌ها را ارزیابی نموده و شاخص ایمنی در آنها را مشخص نمود. در طراحی لرزه‌ای بر مبنای عملکرد با تعیین اهداف عملکردی برای سازه، این امکان برای مهندسين طراح فراهم می‌شود که؛ ساختمان را به منظور کنترل میزان آسیب و حفظ خدمت‌دهی در سطوح مختلف خطر تنظیم و طراحی کنند؛ از آنجائی که هدف عملکردی رابطه‌ای است بین یک سطح خطر مشخص و میزان خسارت قابل پذیرش در ساختمان برای آن سطح خطر؛ لذا جهت تعیین اهداف عملکردی مناسب برای یک سازه، باید میزان خسارت و زیان مالی آن نیز مشخص گردد. سطح عملکرد یک ساختمان معمولاً بر حسب شرایط فیزیکی و مقدار خرابی در ساختمان، میزان خسارت مالی وارده، زمان مورد نیاز برای تعمیر آن و یا میزان خسارات جانی وارده به ساکنین اندازه‌گیری، دسته‌بندی و تعیین می‌شود. لذا می‌توان گفت که اهداف عملکردی یک سازه می‌تواند چنان انتخاب شود که میزان ضرر و زیان مالی حاصل از زلزله‌های احتمالی کاهش یافته و تاب‌آوری سازه‌ها افزایش یابد.

در کنار مطالب گفته شده برای انتخاب اهداف عملکردی، هزینه اولیه ساخت سازه‌ها نیز بعنوان یک معیار برای کارفرمایان مهم بوده و بدین ترتیب انتظار خود از عملکرد سازه را به سرمایه اولیه ساخت ساختمان نیز محدود می‌نمایند. به‌گونه‌ای که هزینه ساخت از یک مقدار مشخص برای آنها فراتر نرود. اما با توجه به امکان برآورد خسارت احتمالی سازه‌ها تحت زلزله‌های قابل رخداد و تعیین میزان هزینه‌های تعمیر برای سازه‌های آسیب دیده تحت زلزله، کارفرمایان می‌توانند تصمیم درستی در مورد مقدار هزینه اولیه ساخت ساختمان‌ها داشته باشند. لذا برای این منظور در این تحقیق تاثیر تغییر اهداف عملکردی با ارتقا سطح طراحی در افزایش هزینه اولیه ساخت و کاهش هزینه-

های تعمیر، ساختمان‌های بتنی ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. جهت ارزیابی و مقایسه نتایج، سازه‌ها در دو گروه با عناوین سازه‌های مینا و سازه‌های ارتقایافته تقسیم‌بندی شده‌اند. برای اینکه هزینه اولیه ساخت و میزان خسارت در سازه‌های مینا و سازه‌های ارتقایافته قابل مقایسه گردد، برای هر دو گروه از سازه‌ها اهداف عملکردی یکسانی فرض شده و مشخصات مقاطع المان‌ها براساس همان اهداف عملکردی طراحی شده‌اند. در این تحقیق هزینه اولیه ساخت ساختمان‌های فوق بر اساس مشخصات مقاطع و مصالح مورد استفاده در آنها تعیین شده است. سپس هزینه تعمیر و خسارت وارد بر آنها نیز تحت زلزله طرح (DBE) بر اساس روش دستورالعمل FEMA P-58 با ابزار PACT تعیین شده و با مقایسه هزینه اولیه ساخت و هزینه‌های تعمیر، هزینه چرخه عمر سازه‌ها تعیین گردیده است.

۱- ارزیابی خسارت سازه‌ها در FEMA-p58

در این تحقیق برای تعیین خسارت وارد بر سازه‌ها و مشخص نمودن هزینه تعمیر آنها، از روش FEMA-P58 استفاده شده است که در آن نحوه تعیین هزینه‌ی تعمیر، زمان تعمیر، ایمنی جانی، سکونت و اثرات محیط زیستی بصورت کمی قابل انجام است. این روش مختص ساختمان است و می‌توان آن را به صورت تکراری برای طراحی ساختمان‌های با عملکرد دلخواه استفاده نمود. استفاده از این دستورالعمل همانند روشی است که طراحان سازه برای طراحی ساختمانها از آیین‌نامه‌های لرزه‌ای استفاده می‌کنند. همچنین از این روش می‌توان برای ارزیابی ریسک یک ساختمان موجود استفاده کرد. گام‌های اصلی فرآیند FEMA P-58 مطابق شکل ۱ می‌باشد.



شکل ۱: مراحل تعیین خسارت در FEMA P-58 [۱]

گام اول: انتخاب حرکت زمین

در دستورالعمل FEMA P-58 سه روش برای انتخاب حرکت زمین معرفی شده است. در این تحقیق از روش اول که انتخاب زمین لرزه‌ها بر اساس شدت می‌باشد، استفاده شده است. در این روش وضعیت عملکرد احتمالی ساختمان‌ها برای شدت‌های مشخصی از لرزش در محل ساختمان بررسی می‌شود. شدت لرزش مورد نظر با استفاده از طیف پاسخ شتاب الاستیک با میرایی ۵ درصد ارائه شده و مقادیر پاسخ ساختمان برای هر یک از سطوح مورد نظر حرکت زمین محاسبه می‌شوند. این مقادیر عبارت‌اند از حداکثر تغییر مکان‌های نسبی طبقات و شتاب‌های طبقه، تغییر مکان‌های نسبی پسماند طبقه و دیگر پارامترهای قابل پیش‌بینی. این گام را می‌توان با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی یا روش‌های پیش‌بینی پاسخ الاستیک خطی که بر اساس مقاومت ساختمان و ویژگی‌های مودال آن به تحلیل غیرخطی تبدیل شده‌اند، تکمیل کرد (تحلیل استاتیکی غیرخطی). در این تحقیق برای محاسبه پاسخ سازه‌ها از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت زوج شتاب-نگاشت‌ها مطابق ضوابط زیر که FEMA P-58 تعیین نموده است استفاده شده است [۱].

- ✓ انتخاب مجموعه‌ای از زوج شتاب نگاشت‌ها با شکل طیف پاسخ شبیه به طیف پاسخ طراحی هدف
- ✓ محاسبه میانگین هندسی (GeoMean) طیف پاسخ برای هر زوج شتاب نگاشت با استفاده از رابطه (۱):

$$S_{gm}(T) = \sqrt{S_x(T) \times S_y(T)} \quad (1)$$

- ✓ مقایسه هر طیف پاسخ میانگین هندسی رکوردها (S_{gm}) با طیف پاسخ طراحی هدف در محدوده T_{min} تا T_{max} . انتخاب زوج شتاب نگاشت‌هایی که شکل طیف پاسخ میانگین هندسی آنها شبیه به طیف پاسخ هدف بوده و حذف زوج شتاب نگاشت‌هایی که این ویژگی را ندارند.

✓ مقیاس دامنه هر مولفه از زوج شتاب نگاشت‌ها با استفاده از رابطه (۲):

$$\frac{S_a(\bar{T})}{S_{gm}(\bar{T})} \quad (2)$$

که در آن \bar{T} برابر با میانگین پریودهای اصلی سازه در دو جهت x و y می‌باشد.

گام دوم: محاسبه پاسخ سازه

در این مرحله، محاسبات پاسخ با استفاده از زوج شتاب نگاشت‌های انتخاب شده در مرحله اول، انجام می‌شود. نسبت‌های تغییرمکان جانبی نسبی حداکثر و نسبت‌های تغییرمکان جانبی نسبی باقیمانده به صورت آنچه که ذیلاً آورده شده؛ بدست می‌آیند:

✓ اجرای تحلیل سازه برای هر زوج شتاب نگاشت

✓ استخراج مقادیر حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی برای هر دو جهت x و y و برای تمام طبقات

✓ برآورد نسبت تغییرمکان جانبی نسبی باقیمانده (Δ_r) از نسبت تغییرمکان جانبی نسبی حداکثر طبق روابط (۳) الی (۵):

$$\Delta_r = 0 \quad \text{for } \Delta \leq \Delta_y \quad (3)$$

$$\Delta_r = 0.3(\Delta - \Delta_y) \quad \text{for } \Delta_y \leq \Delta \leq 4\Delta_y \quad (4)$$

$$\Delta_r = \Delta - 3\Delta_y \quad \text{for } 4\Delta_y \leq \Delta \quad (5)$$

در روابط (۳) الی (۵) مقدار Δ مقدار میانه نسبت تغییرمکان‌های جانبی نسبی تعیین شده در گام قبل و Δ_y میانه نسبت تغییرمکان جانبی نسبی طبقه در حالت تسلیم می‌باشند.

✓ تعیین عدم قطعیت مدلسازی بر اساس تعریف FEMA P-58 طبق رابطه (۶):

$$\beta_m = \sqrt{\beta_c^2 + \beta_q^2} \quad (6)$$

✓ در رابطه (۶) نشان دهنده عدم قطعیت در تعریف ساختمان و کیفیت ساخت و β_q نشان دهنده عدم قطعیت در کیفیت و کامل بودن مدل تحلیلی می‌باشند که توسط FEMA P-58 برای انواع ساختمان‌ها تعریف شده است.

✓ تخصیص پراکندگی مربوط به تغییرمکان جانبی نسبی باقیمانده (BRD) که مطابق دستورالعمل برابر با 0.8 در نظر گرفته شده است.

گام سوم: تعیین آسیب در اجزاء

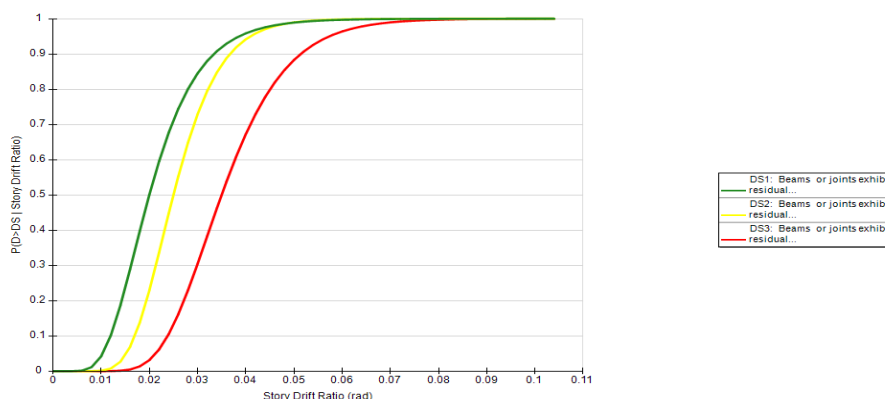
آسیب وارد به اجزای سازه‌ای و غیر سازه‌ای با ترکیب پاسخ‌های سازه با توابع شکنندگی آسیب محاسبه می‌شود. FEMA P-58 برای تعیین خسارت در اجزاء مختلف سازه‌ای و غیرسازه‌ای پایگاه داده‌ای جامع از توابع شکنندگی را ارائه کرده است. در این پایگاه داده‌ای میزان خسارت وارد بر هر عضو بر اساس پاسخ‌های سازه (همانند دریافت) تعریف شده است. دستورالعمل در پایگاه داده‌ای خود که تحت عنوان شکنندگی اجزاء معرفی کرده است؛ برای هر بخش از ساختمان اعم از اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای، سطوح مختلفی از آسیب را در نظر می‌گیرد که برای هر سطح، میانه و پراکندگی پاسخ مشخص شده است. برای سیستم مقاوم جانبی قاب خمشی با شکل پذیری متوسط منحنی شکنندگی در سه سطح آسیب مطابق شکل ۲ تعریف شده است. برای سایر اجزای غیرسازه‌ای هم همانند شکل ۲ از منحنی شکنندگی پایگاه داده‌ای دستورالعمل استفاده شده است. در این تحقیق برای ارزیابی آسیب سازه‌ها علاوه بر سیستم مقاوم جانبی بعنوان اجزای سازه‌ای، اجزای غیرسازه‌ای اعم از پنجره‌ها، دیوارهای پیرامونی و جداکننده‌ها، سقف طبقات، راه‌پله، سیستم تاسیسات مکانیکی و برقی نیز بعنوان اجزای غیرسازه‌ای در نظر گرفته شده‌اند و آسیب کل ساختمان بر اساس آسیب در این اجزاء مشخص شده است. مقادیر میانه پاسخ هر یک از اجزا و پراکندگی آنها در جدول ۱ آورده شده است. مقدار میانه پاسخ بر اساس وابستگی آسیب، بصورت دریافت نسبی طبقه و

شتاب در نظر گرفته شده که برای سیستم قاب خمشی، دیوارها و راه پله آسیب در سه سطح مشخص شده و برای اجزای پنجره، سقف و تاسیسات مکانیکی آسیب در دو سطح و برای تاسیسات برقی آسیب در یک سطح در نظر گرفته شده است. احتمال شرطی محور عمودی در شکل ۲ بصورت روابط ۷ الی ۹ قابل تعریف است.

$$\text{If mean Drift Ratio} \geq 0.02 \rightarrow DS1 \quad (7)$$

$$\text{If mean Drift Ratio} \geq 0.025 \rightarrow DS2 \quad (8)$$

$$\text{If mean Drift Ratio} \geq 0.035 \rightarrow DS3 \quad (9)$$



شکل ۲: منحنی شکنندگی سیستم قاب خمشی با شکل پذیری متوسط [۱]

جدول ۱: مقادیر میانه و پراکندگی پاسخ اجزای مدلسازی شده در سطوح مختلف آسیب [۱]

قاب خمشی متوسط			
سطح آسیب ۱ (DS1)	سطح آسیب ۲ (DS2)	سطح آسیب ۳ (DS3)	سطح آسیب
۰/۰۲	۰/۰۲۵	۰/۰۳۵	میانۀ دریفت نسبی
۰/۴	۰/۳	۰/۳	پراکندگی
دیوارها			
سطح آسیب ۱ (DS1)	سطح آسیب ۲ (DS2)	سطح آسیب ۳ (DS3)	سطح آسیب
۰/۰۰۵	۰/۰۱	۰/۲۱	میانۀ دریفت نسبی
۰/۴	۰/۳	۰/۲	پراکندگی
راه پله			
سطح آسیب ۱ (DS1)	سطح آسیب ۲ (DS2)	سطح آسیب ۳ (DS3)	سطح آسیب
۰/۰۰۵	۰/۰۱۷	۰/۰۲۸	میانۀ دریفت نسبی
۰/۶	۰/۶	۰/۴۵	پراکندگی
پنجره ها			
سطح آسیب ۱ (DS1)	سطح آسیب ۲ (DS2)	سطح آسیب ۳ (DS3)	سطح آسیب
۰/۰۳۳۸	۰/۰۳۸۳	-	میانۀ دریفت نسبی
۰/۴	۰/۴	-	پراکندگی
سقف			
سطح آسیب ۱ (DS1)	سطح آسیب ۲ (DS2)	سطح آسیب ۳ (DS3)	سطح آسیب
۱	۱/۴	-	میانۀ شتاب (g)
۰/۴	۰/۴	-	پراکندگی
تاسیسات مکانیکی			
سطح آسیب ۱ (DS1)	سطح آسیب ۲ (DS2)	سطح آسیب ۳ (DS3)	سطح آسیب
۱/۵	۲/۶	-	میانۀ شتاب (g)
۰/۴	۰/۴	-	پراکندگی
تاسیسات برقی			
سطح آسیب ۱ (DS1)	سطح آسیب ۲ (DS2)	سطح آسیب ۳ (DS3)	سطح آسیب

۱/۲۸	-	میانه شتاب (g)
۰/۴	-	پراکندگی

گام چهارم: ارزیابی خسارت

در رویکرد دستورالعمل FEMA P-58 برای ارزیابی خسارت حل انتگرال سه گانه (رابطه ۱۰) با روش نمونه‌گیری مونت کارلو صورت می‌گیرد و خروجی آن تابع توزیع احتمال پیامدها می‌باشد. بر اساس رویکرد FEMA P-58 برای تعیین پیامدهای هر یک از مشاهدات، باید فرآیندی که در ادامه شرح داده می‌شود طی گردد. بر طبق این فرآیند به ازای هر مشاهده، ابتدا با داشتن منحنی شکنندگی فروریزش، وقوع فروریزش و یا عدم وقوع آن تعیین می‌گردد. در صورتیکه سازه دچار فروریزش شود، هزینه تعمیر و مدت زمان تعمیر برابر با هزینه و مدت زمان جایگزینی سازه با سازه‌های مشابه خود اختیار می‌شود و به کمک مدل جمعیت اختصاص داده شده به کاربری سازه، تعداد مصدومین و تلفات جانی ساکنین سازه تعیین می‌گردد. در غیر این صورت براساس دریافت پسماند سازه و با داشتن منحنی شکنندگی تعمیرپذیری، قابلیت تعمیرپذیری سازه بررسی می‌شود. در صورتیکه سازه تعمیرپذیر نباشد هزینه‌ها معادل هزینه‌های جایگزینی در نظر گرفته می‌شود و در غیر این صورت براساس پاسخ سازه و با داشتن منحنی‌های شکنندگی گروه‌های عملکردی که از پیش تعریف شده‌اند، خرابی و خسارتهای وارده بر سازه تعیین می‌شوند. قابل ذکر است حاصل هریک از مدل‌های احتمال شرطی که در این رویکرد مورد استفاده قرار می‌گیرد، با نمونه‌گیری مونت کارلو (تولید عدد تصادفی با توزیع احتمال مدل مورد نظر) تعیین می‌شود. پس از تکرار این روند برای تمامی مشاهدات، هریک از مجموعه پیامدهای بدست آمده را براساس مقدار از کوچک به بزرگ مرتب کرده و با اختصاص یک تابع توزیع مناسب، توزیع احتمال آن پیامد حاصل می‌شود.

$$\lambda(d_v) = \int_{im} \int_{dm} \int_{edp} G(d_v|d_m) d_G(d_m|edp) d_G(edp|im) d\lambda(im) \quad (10)$$

که در آن، im معرف معیاری از شدت زلزله (مانند بیشینه شتاب زمین یا شتاب طیفی در تناوبی خاص)، edp معرف پارامتر تقاضای مهندسی (مانند گریز طبقات)، dm معرف معیاری از خرابی (مانند ترک در یک دیوار)، dv معرف یک متغیر تصمیم‌گیری (مانند خسارات مالی یا تلفات جانی) و $G(x|y) = P(x < X | Y = y)$ معرف احتمال فراگذشت متغیر تصادفی X از مقدار x به شرط برآمد خاص $Y=y$ از متغیر تصادفی Y (یک مدل احتمال شرطی) می‌باشد [۱].

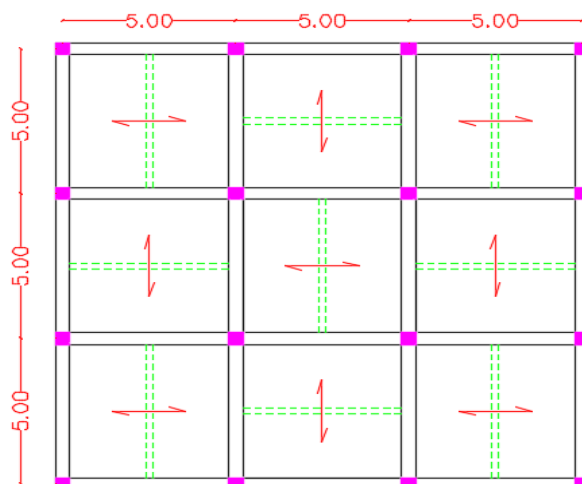
۲- مشخصات مدل‌ها و فرضیات طراحی

۱-۳ مشخصات سازه‌ای و هندسی

در این مطالعه سازه‌های بتن‌آرمه ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با سیستم قاب خمشی متوسط در نظر گرفته شده است. مشخصات و ابعاد پلان سازه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. سازه‌ها در هر دو جهت x و y دارای سه دهانه ۵ متری هستند. کاربری ساختمان‌ها مسکونی و ارتفاع سازه‌ای تمام طبقات ۳/۲ متر در نظر گرفته شده است. همچنین برای توزیع بار ثقلی از دال یکطرفه (تیرچه) که جهت قرارگیری آنها در دهانه‌ها بصورت شطرنجی بوده، استفاده شده است. ساختگاه سازه‌ها متناسب با خاک نوع دو آیین‌نامه لرزه‌ای ایران بوده و کاربری آنها مسکونی فرض شده است. برای تحلیل و طراحی سازه‌ها از آیین‌نامه ASCE 7-16 [۱۸] و ACI 318-14 [۱۹] استفاده شده است. تحلیل و طراحی سازه‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAP 2000 [۲۰] انجام شده است.

۲-۳ بارگذاری ثقلی و مشخصات مصالح

بارهای ثقلی در نظر گرفته شده برای سازه‌ها شامل بارهای مرده و زنده می‌باشد که مقادیر بار مرده و زنده به ترتیب برابر با ۷۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع فرض شده است. همچنین جزئیات مصالح مورد استفاده برای المان‌های مقاوم جانبی در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۳: پلان سازه‌ها و جهت تیریزی سقف

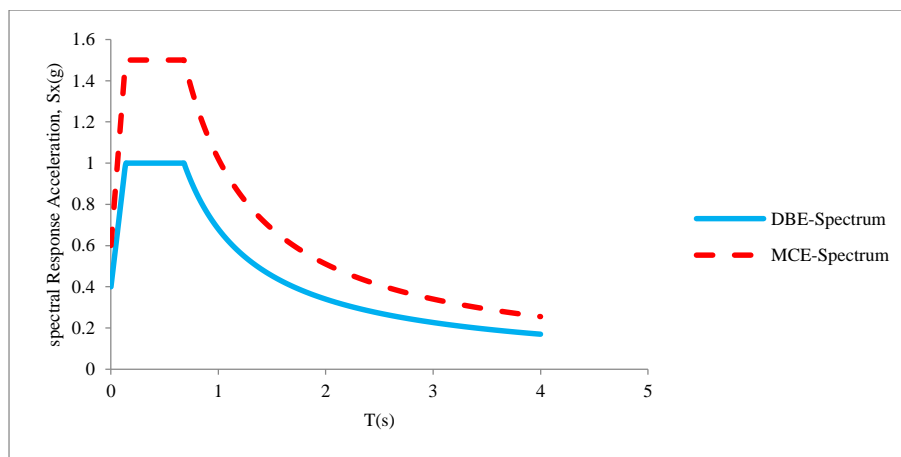
جدول ۲: مشخصات مصالح سازه‌ای

مصالح بتنی		
مقاومت فشاری مشخصه بتن	f'_c	25 MPa
مدول الاستیسیته بتن	$E_c=15100\sqrt{f'_c}$	23875 MPa
ضریب پواسن بتن	ν_c	0.15
مصالح فولادی		
تنش تسلیم آرماتورها	F_y	400 MPa
تنش نهایی آرماتورها	F_u	600 MPa
تنش تسلیم مورد انتظار آرماتورها	F_{ye}	500 MPa
تنش نهایی مورد انتظار آرماتورها	F_{ue}	750 MPa
ضریب پواسن آرماتورها	ν_s	0.3

۳-۳ طراحی سازه‌ها

با توجه به اینکه در این تحقیق هدف بررسی تاثیرات ارتقا سطح طراحی (افزایش تاب‌آوری) در هزینه چرخه عمر سازه‌ها می‌باشد، لذا سازه‌ها برای دو سطح خطر و ضوابط عملکردی مشابه بر اساس آیین‌نامه‌های لرزه‌ای، طراحی شده‌اند. سطح خطر اول با دوره بازگشت ۱۰ درصد در پنجاه سال (DBE) انتخاب شده که سطح خطر فوق، مبنای طراحی لرزه‌ای اکثر سازه‌ها در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای فعلی می‌باشد. سطح خطر دوم متناسب با حداکثر زلزله مورد انتظار آیین‌نامه‌های لرزه‌ای با دوره بازگشت ۲ درصد در پنجاه سال (MCE) انتخاب شده است. سازه‌های طراحی شده با سطح خطر اول بعنوان سازه‌های مبنا و سازه‌های طراحی شده با سطح خطر دوم بعنوان سازه‌های ارتقا یافته فرض شده‌اند. برای طراحی سازه‌ها از تحلیل طیفی استفاده شده و طیف‌های مورد استفاده برای تحلیل، مطابق ضوابط آیین‌نامه ASCE7-16 مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بر اساس ASCE7-16 ضریب رفتار (R) سازه‌های بتن آرمه با سیستم قاب خمشی متوسط برابر با ۵، ضریب تشدید تغییر مکان (C_d) برابر با ۴/۵ و ضریب اضافه مقاومت (Ω_0) برابر با ۳ در نظر گرفته شده است. طیف‌های مورد استفاده برای هر دو سطح خطر در شکل ۴ نشان داده شده است. بعد از طراحی سازه‌ها برای دو سطح خطر فوق، مقاطع تیرها و ستون‌ها تعیین و مقدار فولاد مورد نیاز آنها نیز مشخص شده است. در تعیین ابعاد مقاطع و مشخصات هندسی فولاد المان‌ها، معیارهای پذیرش آیین‌نامه طراحی و لرزه‌ای اعم

از نسبت تنش در آنها و دریفت نسبی طبقات کنترل شده است. مشخصات مقاطع المان‌ها برای سازه‌های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۴: طیف پاسخ طراحی زلزله طرح و زلزله حداکثر مورد انتظار

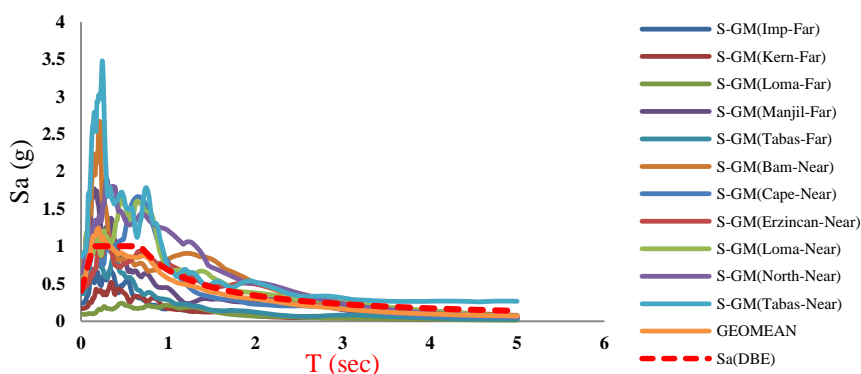
۳- آنالیز تاریخیچه پاسخ سازه‌ها

دستورالعمل FEMA-P58 برای تعیین خسارت سازه‌ها سه روش معرفی نموده است که در این تحقیق از روش مبتنی بر شدت ۴، استفاده شده است. مطابق این روش، سازه تحت تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن در نرم‌افزار PACT وارد می‌شود. در تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی، تحلیل دینامیکی سازه با اثر دادن شتاب زمین به صورت تابعی از زمان در تراز پایه انجام شده است. برای انجام تحلیل از یازده رکورد زلزله استفاده شده که شش رکورد مربوط به زلزله حوزه نزدیک گسل و پنج رکورد دیگر مربوط به زلزله دور از گسل می‌باشند. با توجه به اینکه در FEMA-P58 هزینه خرابی سازه‌های فروپاشی شده برابر با هزینه ساخت مجدد آنها می‌باشد؛ لذا رکوردهای زلزله طوری انتخاب شده‌اند که، سازه‌های مورد بررسی تحت آن رکورد به حالت فروپاشی نرسند تا امکان برآورد هزینه ناشی از خسارت توسط برنامه PACT میسر گردد که این مورد برای همه رکوردهای مورد استفاده با بررسی مفاصل پلاستیک تشکیل شده و کنترل سطح عملکرد سازه‌ها سنجیده شده است. طیف پاسخ رکوردهای مورد استفاده در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به اینکه در این تحقیق مقدار خسارت وارد بر سازه‌ها تحت زلزله طرح (DBE) انجام گرفته لذا، مقیاس دامنه هر مولفه از زوج شتاب نگاشت‌ها بر اساس آنچه که در گام اول بند ۲ این تحقیق اشاره شده نسبت به طیف زلزله DBE تعیین و برای رکوردهای دور و نزدیک گسل مشخص شده است. مقایسه طیف میانگین رکوردها با طیف زلزله طرح در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین مشخصات رکوردهای حوزه دور و حوزه نزدیک گسل به ترتیب در جداول ۴ و ۵ آورده شده است.

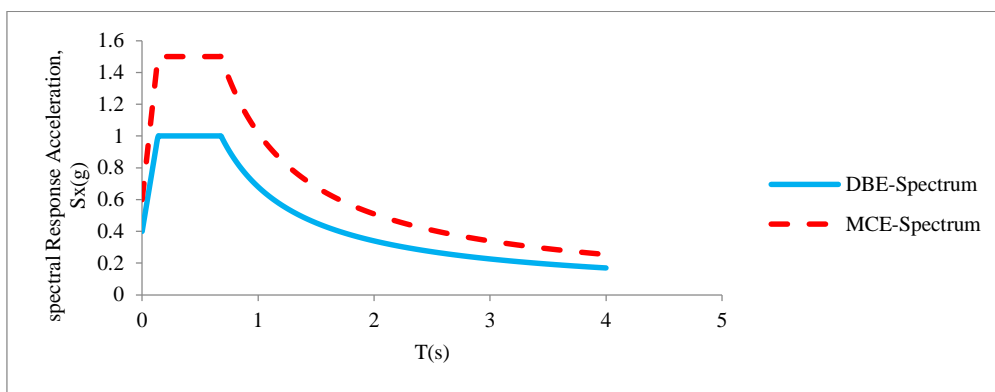
⁴ Intensity-based assessment

جدول ۳: مشخصات مقاطع سازه‌ها

سازه‌های ۳ طبقه				
سازه مینا				
Story	Beam Dimensions	Column Dimensions		Column Rebars
1	45 x 30	45 x 45		16T20
2	45 x 30	45 x 45		16T16
3	40 x 30	40 x 40		16T16
سازه ارتقا یافته				
Story	Beam Dimensions	Column Dimensions		Column Rebars
1	45 x 35	55 x 55		20T20
2	45 x 35	50 x 50		16T16
3	45 x 30	45 x 45		16T16
سازه‌های ۵ طبقه				
سازه مینا				
Story	Beam Dimensions	Column Dimensions		Column Rebars
1	55 x 35	55 x 55		20T20
2	55 x 35	50 x 50		16T20
3	50 x 35	45 x 45		16T16
4	50 x 35	45 x 45		16T16
5	50 x 30	45 x 45		16T16
سازه ارتقا یافته				
Story	Beam Dimensions	Column Dimensions		Column Rebars
1	60 x 40	65 x 65		20T25
2	60 x 40	60 x 60		20T20
3	55 x 40	55 x 55		16T16
4	55 x 40	55 x 55		16T16
5	50 x 35	55 x 55		16T16
سازه‌های ۱۰ طبقه				
سازه مینا				
Story	Beam Dimensions	Column Dimensions		Column Rebars
1-2	60 x 40	60 x 60		16T20
3-4	55 x 40	55 x 55		16T18
5-6	55 x 35	50 x 50		16T16
7-8	50 x 35	45 x 45		16T16
9-10	50 x 30	40 x 40		12T16
سازه ارتقا یافته				
Story	Beam Dimensions	Column Dimensions		Column Rebars
1-2	60 x 45	70 x 70		20T25
3-4	60 x 40	65 x 65		20T20
5-6	55 x 40	60 x 60		16T18
7-8	55 x 35	55 x 55		16T18
9-10	50 x 35	50 x 50		16T16
سازه‌های ۱۵ طبقه				
سازه مینا				
Story	Beam Dimensions	Story	Column Dimensions	Column Rebars
1-2-3	65 x 50	1-2	65 x 65	16T25
4-5-6	60 x 40	3-4-5	60 x 60	16T20
7-8-9-10	55 x 40	6-7-8	55 x 55	16T18
11-12-13	50 x 30	9-10	50 x 50	16T16
14-15	45 x 30	11-12-13	45 x 45	16T16
		14-15	40 x 40	12T16
سازه ارتقا یافته				
Story	Beam Dimensions	Story	Column Dimensions	Column Rebars
1-2-3	75 x 60	1-2	75 x 75	20T25
4-5-6-7-8-9	65 x 50	3-4	65 x 65	16T20
10-	60 x 45	5-6-7	60 x 60	16T20
11-12-13	55 x 35	8-9-10-11	55 x 55	16T18
14-15	50 x 35	12-13	50 x 50	16T16
		14-15	50 x 50	16T16



شکل ۵: طیف پاسخ رکوردهای زلزله



شکل ۶: مقایسه میانگین طیف پاسخ رکوردها با طیف پاسخ طراحی

جدول ۴: مشخصات رکوردهای حوزه دور از گسل

NO.	Earthquake	سال وقوع	بزرگاری (ریشتر)	PGA(g)	فاصله کانونی (کیلومتر)	عمق کانونی (کیلومتر)	Station
1	Imperial Valley	1979	6.53	0.272	29.7	11.6	Calexico Fire Station
2	Kern County	1952	7.36	0.159	38.42	16	Taft Lincoln School
3	Loma Prieta	1989	6.93	0.074	78.58	16	SF - Cliff House
4	Manjil_Iran	1990	7.37	0.315	75.58	15	Abhar
5	Tabas_Iran	1978	7.35	0.248	89.76	10	Ferdows

جدول ۵: مشخصات رکوردهای حوزه نزدیک گسل

NO.	Earthquake	سال وقوع	بزرگاری (ریشتر)	PGA(g)	فاصله کانونی (کیلومتر)	عمق کانونی (کیلومتر)	Station
1	Bam_Iran	2003	6.6	0.8	1.7	15	Bam
2	Cape Mendocino	1992	7.01	0.471	8.18	10.5	Petrolia
3	Erzican_Turkey	1992	6.69	0.469	4.38	20	Erzincan
4	Loma Prieta	1989	6.93	0.563	3.88	20	LGPC
5	Northridge-01	1994	6.69	0.843	6.5	11.31	Rinaldi Receiving Sta
6	Tabas_Iran	1978	7.35	0.795	1.79	10	Tabas

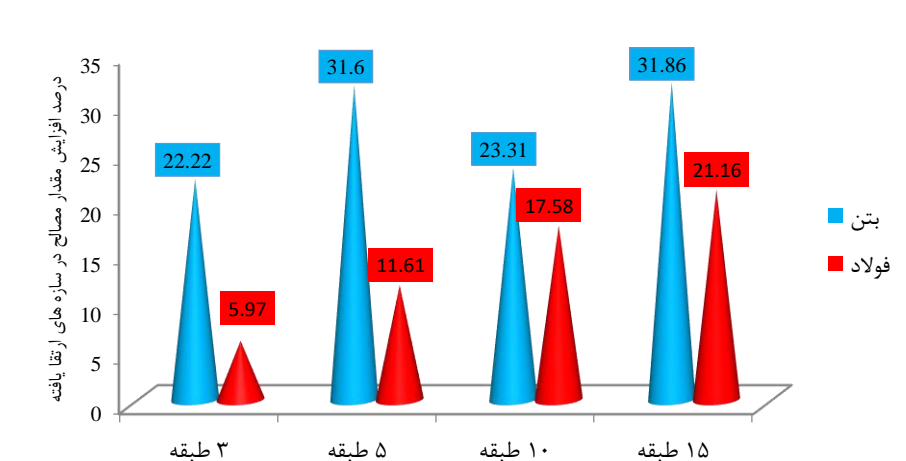
۵ بررسی نتایج

۱-۵ برآورد هزینه اولیه سازه‌ها

با توجه به اینکه تفاوت سازه‌های مبنا و سازه‌های ارتقا یافته صرفاً مربوط به سیستم مقاوم‌جانبی آنها بوده و سایر بخش‌ها اعم از دیوارهای داخلی و خارجی، سقف‌ها و کف‌ها، پنجره‌ها، راه‌پله و سیستم تاسیساتی آنها یکسان هستند، لذا در ارزیابی هزینه اولیه مورد نیاز برای ساخت سازه‌های مبنا و سازه‌های ارتقا یافته، هزینه سیستم مقاوم جانبی آنها مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین مقدار تفاوت در هزینه ساخت سازه‌های مبنا و ارتقا یافته، بر اساس تفاوت در مقدار بتن و فولاد مصرفی آنها خواهد بود. بتن و فولاد مصرفی در سازه‌ها، بعد از طراحی آنها و تعیین مشخصات هندسی مقاطع (ابعاد و فولاد مصرفی) متره و برآورد شده است که مقادیر بتن بر حسب مترمکعب و فولاد بر حسب کیلوگرم برای سازه‌های مبنا و ارتقا یافته در جدول ۶ آورده شده که در تعیین هزینه چرخه‌ی عمر سازه‌ها، هزینه ساخت مجدد سازه‌های مبنا، بعنوان هزینه اولیه در نظر گرفته شده است. لذا میزان افزایش در هزینه ساخت سازه‌های ارتقا یافته و همچنین هزینه تعمیر و بازسازی سازه‌های مبنا و ارتقا یافته نسبت به هزینه ساخت سازه‌های مبنا ارزیابی شده است. درصد افزایش بتن و فولاد مصرفی در سازه‌ها ارتقا یافته نسبت به سازه‌های مبنا در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۶: مقادیر مصالح مصرفی در سازه‌ها

طبقه ۳			طبقه ۵		
سازه	مقدار آرماتور (کیلوگرم)	مقدار بتن (متر مکعب)	سازه	مقدار آرماتور (کیلوگرم)	مقدار بتن (متر مکعب)
مبنا	۱۴۱۰۹	۷۵/۸	مبنا	۲۵۱۰۶	۱۶۵/۶
ارتقا یافته	۱۴۹۵۲	۹۲/۶۵	ارتقا یافته	۲۸۰۲۱	۲۱۷/۹۳
طبقه ۱۰			طبقه ۱۵		
سازه	مقدار آرماتور (کیلوگرم)	مقدار بتن (متر مکعب)	سازه	مقدار آرماتور (کیلوگرم)	مقدار بتن (متر مکعب)
مبنا	۴۶۱۷۰	۳۶۵/۱۶	مبنا	۸۸۵۱۱	۶۱۳/۵۰۴
ارتقا یافته	۵۴۲۸۷	۴۵۰/۲۸	ارتقا یافته	۱۰۷۲۴۸	۸۰۹/۰۱



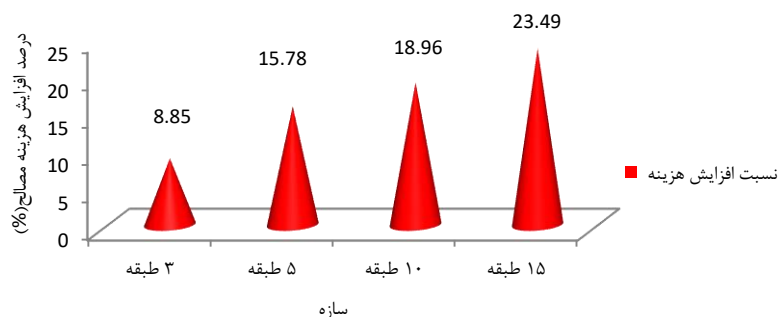
شکل ۷: نسبت افزایش میزان مصالح مصرفی در سازه‌های ارتقا یافته نسبت به سازه‌های مبنا

برای تعیین سهم بتن و فولاد در هزینه کل ساخت سازه‌ها، هزینه مصالح بر اساس قیمت متداول کشور (در تاریخ نگارش این تحقیق) در نظر گرفته شده است که؛ قیمت واحد بتن ششصد هزار تومان و قیمت واحد فولاد پانزده هزار تومان برآورد شده است. لذا هزینه ساخت سیستم مقاوم جانبی سازه‌ها و سهم بتن و فولاد در آن مشخص شده است که نتایج در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷: هزینه اولیه ساخت سازه‌های مینا و ارتقا یافته

سازه ۳ طبقه			
سازه	هزینه بتن (میلیون تومان)	هزینه آرماتور (میلیون تومان)	هزینه سیستم مقاوم جانبی (میلیون تومان)
مینا	۴۵/۴۸	۲۱۱/۶	۲۵۷/۱۱۵
ارتقا یافته	۵۵/۵۹	۲۲۴/۲۸	۲۷۹/۸۷
سازه ۵ طبقه			
سازه	هزینه بتن (میلیون تومان)	هزینه آرماتور (میلیون تومان)	هزینه سیستم مقاوم جانبی (میلیون تومان)
مینا	۹۹/۳۶	۳۷۶/۵۹	۴۷۵/۹۵
ارتقا یافته	۱۳۰/۷۵۸	۴۲۰/۳۱۵	۵۵۱/۰۷۳
سازه ۱۰ طبقه			
سازه	هزینه بتن (میلیون تومان)	هزینه آرماتور (میلیون تومان)	هزینه سیستم مقاوم جانبی (میلیون تومان)
مینا	۲۱۹/۰۹۶	۶۹۲/۵۵	۹۱۱/۶۴۶
ارتقا یافته	۲۷۰/۱۶۸	۸۱۴/۳۰۵	۱۰۸۴/۴۷۳
سازه ۱۵ طبقه			
سازه	هزینه بتن (میلیون تومان)	هزینه آرماتور (میلیون تومان)	هزینه سیستم مقاوم جانبی (میلیون تومان)
مینا	۳۶۸/۱۰	۱۳۲۷/۶۶	۱۶۹۵/۰۷۶
ارتقا یافته	۴۸۵/۴۰۶	۱۶۰۸/۷۲	۲۰۹۴/۱۲

مقادیر جدول ۷، هزینه لازم برای ساخت اسکلت سازه‌های مینا و سازه‌های ارتقا یافته بر اساس میزان مصالح مصرفی آنها را نشان می‌دهد که هزینه دستمزد اجرایی برای هر دو سازه تقریباً یکسان فرض شده و در برآورد هزینه ساخت در نظر گرفته نشده است. لذا افزایش هزینه ساخت اسکلت سازه‌های ارتقا یافته نسبت به سازه‌های مینا تعیین و در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸: نسبت افزایش هزینه سازه‌های ارتقا یافته نسبت به سازه‌های مینا

با توجه به اینکه ارتقا سطح طراحی سازه‌ها علاوه بر کاهش خسارت در سیستم مقاوم جانبی، خسارت اجزای غیرسازه‌ای شامل دیوارهای داخلی و خارجی، سقف‌ها و کف‌ها، پنجره‌ها، راه‌پله، سیستم تاسیساتی و غیره را نیز کاهش می‌دهد؛ لذا تاثیر ارتقا سطح طراحی سازه‌ها باید در افزایش هزینه اولیه کل ساختمان که شامل اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای است، ارزیابی شود. در برآوردهای مالی یک ساختمان، هزینه اسکلت ساختمان (تیر و ستون)، معمولاً ۱۱۸ الی ۲۴ درصد هزینه کل ساختمان می‌باشد که بر اساس معماری و جزئیات آن در محدوده فوق تغییر می‌نماید، لذا تاثیر ارتقا سطح طراحی در افزایش هزینه اولیه ساخت برای کل ساختمان حداکثر ۲۴ درصد آنچه که در شکل ۸ برای اسکلت سازه بیان شده است، می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن ۲۴ درصد آنچه که در شکل ۸ برای سیستم مقاوم جانبی سازه‌ها نوشته شده است؛ تاثیر ارتقا طراحی در افزایش هزینه اولیه کل ساختمان بدست می‌آید که نتایج در جدول ۸ آورده شده است.

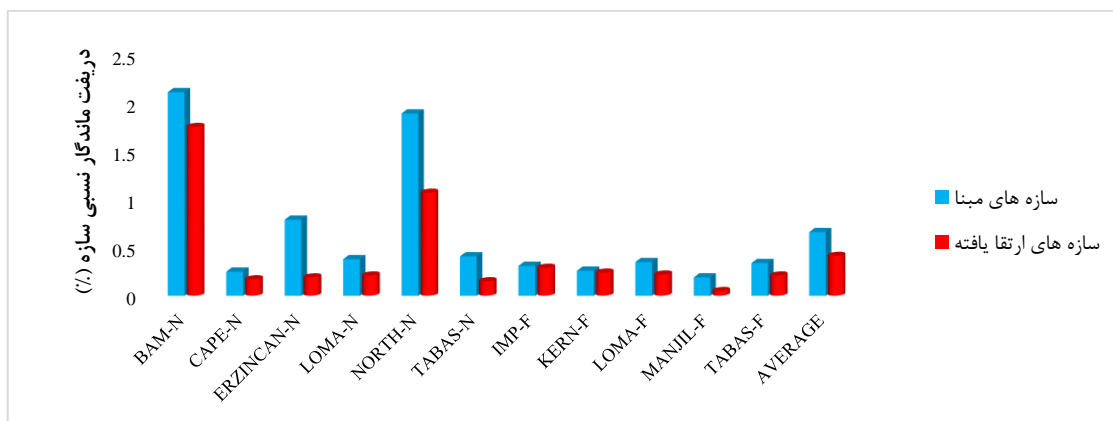
جدول ۸: تاثیر ارتقا سطح طراحی در هزینه کل ساختمان

سازه	افزایش هزینه کل ساختمان (%)
۳ طبقه	۲/۱۲۴
۵ طبقه	۳/۷۸
۱۰ طبقه	۴/۵۵
۱۵ طبقه	۵/۶۳

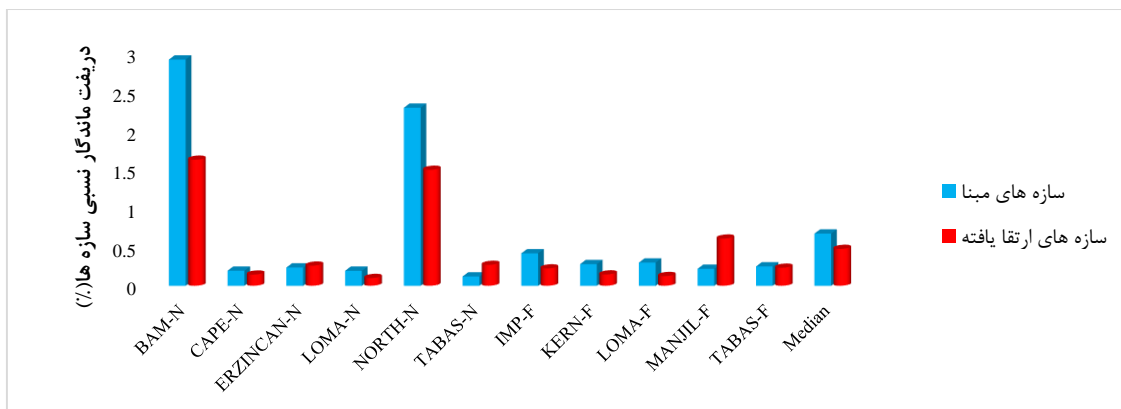
۲-۵ برآورد هزینه تعمیر سازه‌ها

۱-۲-۵-۱ دریفت ماندگار نسبی سازه‌ها

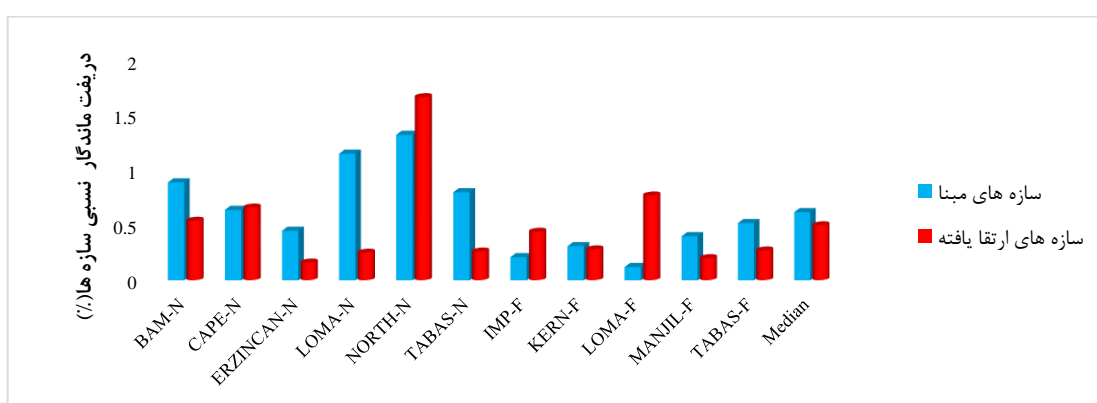
با توجه به آنچه که در بندهای قبلی گفته شده است؛ در ارزیابی خسارت و هزینه‌های تعمیر یک سازه بر اساس روش FEMA-P58 مقدار نسبت دریفت ماندگاری سازه‌ها، تعیین کننده وضعیت مربوط به شکنندگی اجزای سازه‌ها بوده و خسارت بر اساس آن برای کل سازه قابل تعیین است. لذا در این بخش دریفت ماندگار سازه‌های مبنا و سازه‌های ارتقا یافته تحت یازده رکورد مورد استفاده برای این تحقیق نسبت بهم مقایسه شده‌اند. نتایج برای سازه‌ها در اشکال ۹ الی ۱۲ قابل مشاهده است. لازم به توضیح است که میانه دریفت‌های پسماند نیز در نمودارهای فوق آورده شده است. با بررسی نتایج دریفت ماندگار سازه‌های مبنا و سازه‌های ارتقا یافته مشاهده می‌گردد که، مقدار دریفت ماندگار سازه‌های ارتقا یافته در اکثر رکوردهای زلزله کمتر از سازه‌های مبنا بوده است. همچنین مقدار میانه دریفت ماندگار سازه‌های ارتقا یافته نیز کمتر از میانه درفت ماندگار سازه‌های مبنا هست. لذا بر این است می‌توان بیان نمود که سطح عملکرد سازه‌های ارتقا یافته از نظر شکنندگی که مبنای بررسی هزینه‌های تعمیر است، بهتر از سازه‌های مبنا می‌باشد. همچنین نتایج دریفت ماندگار نشان دادند که، تغییر در مشخصات فرکانسی رکوردهای زلزله در مقدار آسیب‌پذیری سازه‌ها بسیار مهم هست؛ چرا که در برخی از رکوردهای زلزله مقدار دریفت سازه‌ی ارتقا یافته بیشتر از سازه‌ی مبنا است.



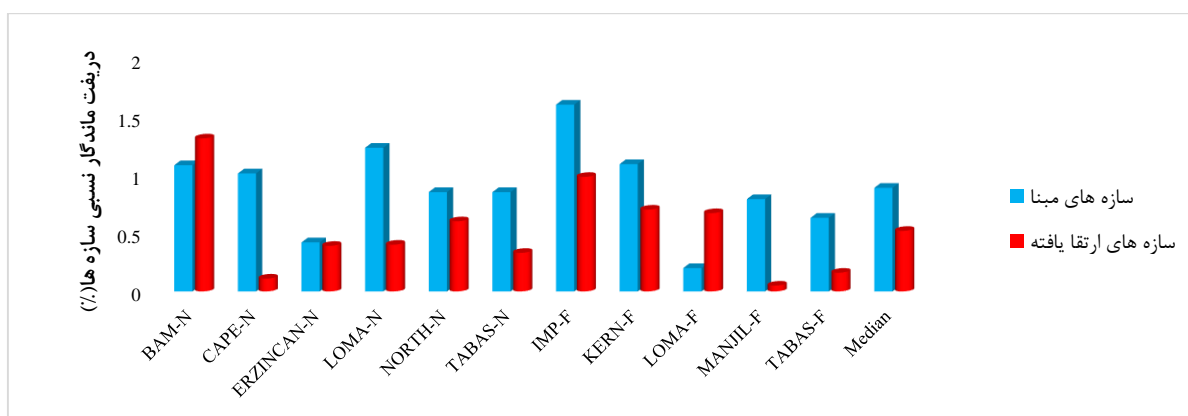
شکل ۹: دریفت ماندگار سازه‌های ۳ طبقه



شکل ۱۰: دریفت ماندگار سازه‌های ۵ طبقه

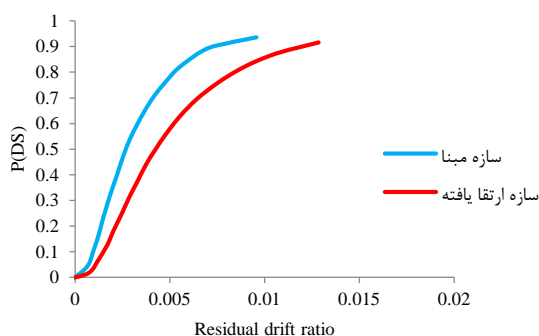


شکل ۱۱: دریفت ماندگار سازه‌های ۱۰ طبقه

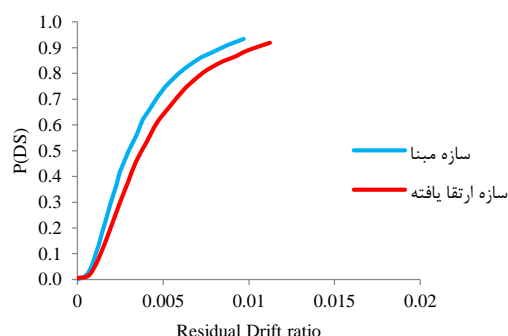


شکل ۱۲: دریفت ماندگار سازه‌های ۱۵ طبقه

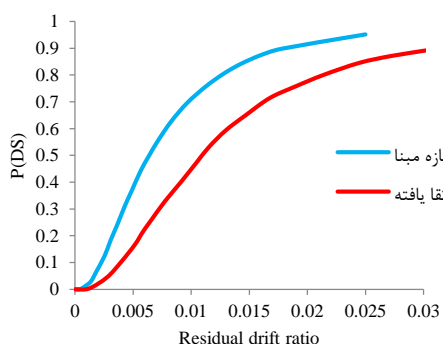
برای ارزیابی خرابی و تعیین مقدار هزینه تعمیر سازه‌ها، دریفت ماکزیمم سازه‌ها تحت ۱۱ رکورد زلزله برای هر دو راستا تعیین شده و سپس مقدار دریفت ماندگار برای هر دو راستا بر اساس روابط ۳ الی ۵ تعیین شده و با مشخص نمودن مقدار دریفت میانه و پراکندگی آن، با استفاده از روش مونت کارلو منحنی شکنندگی سطح فروپاشی سازه‌ها توسط برنامه PACT تعیین شده است که نتایج منحنی شکنندگی آنها در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



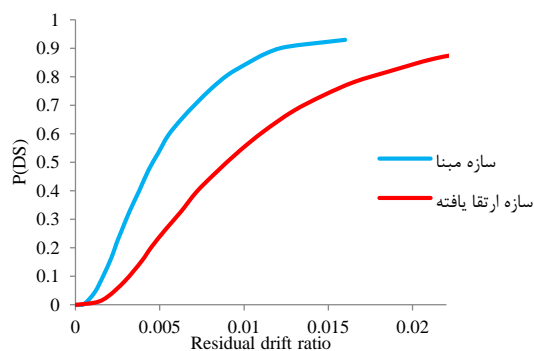
سازه ۵ طبقه



سازه ۳ طبقه



سازه ۱۵ طبقه

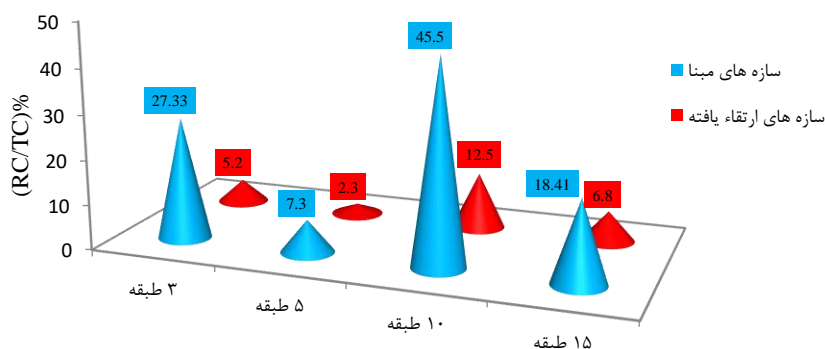


سازه ۱۰ طبقه

شکل ۱۳: منحنی شکنندگی سطح فروپاشی برای سازه‌های طراحی شده با تراز لرزه‌ای MCE و DBE

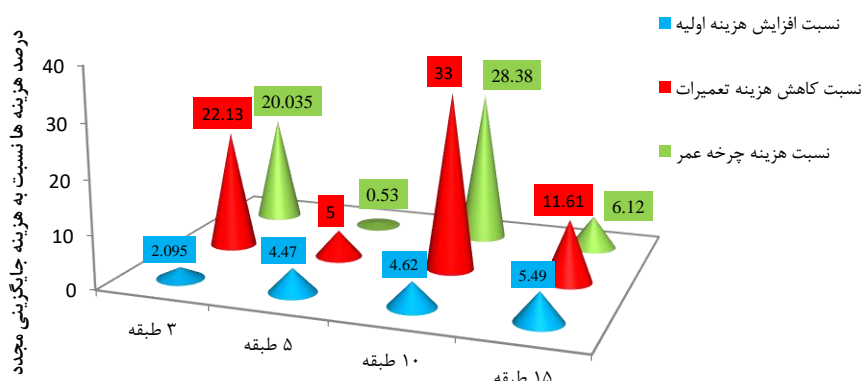
۵-۲-۲ خرابی سازه‌ها و ارزیابی خسارت

تحلیل خرابی گام مهم در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد. در این تحقیق خرابی مولفه‌های یک سازه به کمک منحنی‌های شکنندگی و به کمک برنامه PACT تعیین شده است. منحنی‌های شکنندگی در قالب مدل‌های احتمال شرطی هستند که احتمال قرارگیری یک مولفه در سطوح خرابی مختلف را به شرط یک متغیر تقاضا (پاسخ سازه) بدست می‌دهند. متغیرهای تقاضا برای مولفه‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای مدلسازی شده در این تحقیق در بند دوم (گام سوم آن بند) آورده شده است. لذا در یک مشاهده خاص، برای سازه‌هایی که دچار فروریزش نشده و تعمیرپذیر است، حالت خرابی هریک از مولفه‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای تعیین گردیده است. از طرفی در مدل عملکردی تعریف شده در ساختمان‌ها، پیامدهای محتمل مربوط به هریک از حالات خرابی در هریک از گروه‌های عملکردی در دسترس است. حاصل جمع پیامدهای بدست آمده از گروه‌های عملکردی، پیامدهای کل وارده بر سازه در آن مشاهده را نشان می‌دهند. در نتیجه برای شدت زلزله طرح (DBE)، با تکرار این روند برای تمامی مشاهدات، تابع توزیع پیامدها در آن شدت بدست آمده است. با توجه به اینکه هدف این تحقیق بررسی تاثیر ارتقا سطح طراحی سازه‌های بتن آرمه در کاهش هزینه چرخه عمر آنها می‌باشد، لذا پیامد انتخابی برای بررسی خسارت، هزینه تعمیر سازه‌ها است. در این بخش هزینه تعمیر (RC) سازه‌ها نسبت به هزینه جایگزینی (TC) مجدد مورد بررسی قرار گرفته و برای سازه‌های مینا و سازه‌های ارتقا یافته در شکل ۱۴ نشان داده شده است. آنچه که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، بیانگر کاهش قابل توجه خسارت در سازه‌های ارتقا یافته است که طراحی اولیه آنها بر اساس زلزله MCE صورت گرفته بود. لازم به ذکر است که نتایج فوق برای تعمیر سازه‌ها از ما بین هزار تکرار در نظر گرفته شده برای هر توزیع تصادفی با امید ریاضی ۰/۵ بدست آمده است.



شکل ۱۴: نسبت هزینه تعمیر به هزینه جایگزینی مجدد سازه‌ها

برای بررسی تاثیر ارتقا طراحی سازه‌ها در هزینه چرخه عمر ساختمان‌ها، مقدار افزایشی که در هزینه اولیه ساخت بوجود آمده، نسبت به هزینه تعمیری که کاهش یافته مقایسه گردیده است. در این تحقیق مقدار افزایش هزینه اولیه ساخت و مقدار کاهش هزینه تعمیرات، نسبت به هزینه جایگزینی بیان شده‌اند، لذا نتایج افزایش هزینه ساخت و کاهش هزینه تعمیر در شکل ۱۵ آورده شده است. نتایج هزینه چرخه عمر سازه‌ها نشان داد که، ارتقا اهداف طراحی سازه‌ها که در این تحقیق بوسیله افزایش سطح خطر طراحی صورت گرفته است، با در نظر گرفتن افزایش هزینه اولیه ساخت، مقدار هزینه تعمیرات حاصل از خسارت سازه‌ها را بصورت قابل توجهی کاهش می‌دهد. بطوری که در بررسی هزینه چرخه عمر سازه‌ها که از اختلاف هزینه اولیه افزایش یافته و هزینه تعمیر کاهش یافته حاصل می‌شود، کاهش قابل توجهی مشاهده گردیده است. بطور مثال، نتایج سازه ۳ طبقه نشان داده است که، ارتقا سطح طراحی سازه، باعث افزایش هزینه اولیه به مقدار ۲/۱ درصد هزینه جایگزینی می‌گردد. این در حالی است که ارتقا سطح طراحی هزینه تعمیرات ساختمان را به اندازه ۲۲ درصد هزینه جایگزینی مجدد سازه کاهش می‌دهد. فلذا هزینه چرخه عمر نیز به اندازه ۲۰ درصد هزینه جایگزینی سازه کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵: ارزیابی هزینه چرخه عمر سازه‌ها

۶- نتیجه‌گیری

با بررسی تاثیرات ارتقا سطح طراحی در هزینه چرخه عمر برای سازه‌های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه، نتایج کلی زیر حاصل شده است:

- (۱) ارتقا سطح طراحی سازه‌ها از طریق افزایش سطح خطر زلزله از سطح زلزله طرح (DBE) به سطح بیشینه زلزله مورد انتظار (MCE) باعث کاهش مقدار دررفت ماندگار سازه‌ها شده و سطح عملکرد سازه‌ها را بهبود می‌بخشد که نمودارهای شکنندگی مورد بررسی برای آنها گویای این مهم می‌باشد. بطوری که منحنی شکنندگی سازه‌های ارتقا یافته سطح عملکرد بسیار مناسبتری را نسبت به سازه‌های مینا نشان می‌دهند. بطوری که میانه دررفت سازه‌های ارتقا یافته نسبت به سازه‌های مینا در ساختمان‌های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب ۵۵، ۳۲/۵، ۱۹ و ۳۸/۸ درصد کاهش یافته است.
- (۲) بررسی نتایج هزینه اولیه سازه‌های مینا و سازه‌های ارتقا یافته؛ نشان دهنده‌ی این است که، ارتقا سطح طراحی باعث افزایش مقدار مصالح مصرفی (فولاد و بتن) در تیرها و ستونها می‌شود. بطوری که ارتقا اهداف طراحی سازه‌ها باعث شده است، هزینه اولیه ساخت اسکلت سازه برای ساختمان‌های بتنی ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب ۸/۸۵، ۱۵/۷۸، ۱۸/۹۶ و ۲۳/۴۹ درصد افزایش یابد که ارقام فوق برابر ۲/۱۲، ۳/۷۸، ۴/۵۵ و ۵/۶۳ درصد هزینه جایگزینی سازه‌های نام برده شده هستند.
- (۳) ارزیابی هزینه تعمیر سازه‌ها بعنوان یکی از پیامدهای تصادفی مورد بررسی در این تحقیق نشان داد که، ارتقا سطح طراحی سازه‌ها، هزینه‌های تعمیر را بصورت قابل توجهی کاهش می‌دهد. بطوری که هزینه تعمیر برای سازه‌های ارتقا یافته نسبت به سازه‌های مینا برای ساختمان‌های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب ۸۱، ۶۹، ۴۹ و ۶۳ درصد کاهش یافته است. به بیان دیگر؛ ارتقا سطح طراحی هزینه‌های تعمیر را برای ساختمان‌های نام برده شده به ترتیب برابر ۲۲/۱۳، ۵، ۳۳ و ۱۱/۶۱ درصد هزینه جایگزینی کاهش داده است.
- (۴) با مقایسه کاهش هزینه‌های تعمیر سازه‌ها و افزایش هزینه اولیه ساخت آنها، می‌توان گفت که، ارتقا سطح طراحی سازه‌ها هزینه چرخه عمر سازه‌های بتن‌آرمه را بصورت قابل توجهی کاهش می‌دهد؛ به گونه‌ای که هزینه چرخه عمر سازه‌های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه را به ترتیب برابر ۲۰، ۵/۵۳، ۲۸/۳۸ و ۶/۱۲ درصد هزینه جایگزینی سازه‌ها کاهش داده است. این در حالی است که در این تحقیق ضرر و زیان کاهش یافته سازه‌ها صرفاً مربوط به هزینه تعمیر ساختمان‌ها بوده و هزینه‌های ناشی از توقف کسب و کار، هزینه اقامت موقت ساکنین در هنگام تعمیر، هزینه اسباب و وسایل آسیب دیده، هزینه مربوط به درمان و بهداشت ساکنین و ... در نظر گرفته نشده است.
- (۵) با توجه به کاهش آسیب در سازه‌های ارتقا یافته می‌توان گفت؛ زمان تعمیر آنها نیز بصورت قابل توجهی کاهش خواهد یافت و این مهم هزینه‌های جنبی آسیب دیدگی ناشی از زلزله از جمله، هزینه توقف کسب و کار، هزینه اقامت موقت ساکنین، هزینه درمان، و غیره ... را کاهش خواهد داد.

مراجع

1. FEMA (Federal Emergency Management Agency). (2018). "Seismic performance assessment of buildings." Rep. FEMA P-58, Washington, DC.
2. Zhen Xu, Huazhen Zhang, Xinzhen Lu, Yongjia Xu, Zongcai Zhang, Yi Li, (2019). "A prediction method of building seismic loss based on BIM and FEMA P-58" Automation in Construction 102. 245-257.
3. Gemma Cremen, Jack W. Baker, (2018). Quantifying the benefits of building instruments to FEMA P-58 rapid postearthquake damage and loss predictions, Engineering Structures 176. 243-253.
4. Vecchio, V., Ludovico, D. M., Pampanin, S., Protad, A. 2018, "Repair Costs of Existing RC Buildings Damaged by the L'Aquila Earthquake and Comparison with FEMA P-58 Predictions" Earthquake Spectra, Volume 34, No. 1, pages 237-263, February.
5. Performance Assessment Calculation Tool (PACT), V3.0.0., 2018.
6. O'Reilly, J. G., Perronea, D., Fox, M., Monteiro, R., Filiatrault, A. (2018)., "Seismic assessment and loss estimation of existing school buildings in Italy" engineering structures 168.
7. Elif M. Un. M. Altug Erberik. Aysegul Askan. (2014). "Performance Assessment of Turkish Residential Buildings for Seismic Damage and Loss Estimation". Journal of Performance of Constructed Facilities, © ASCE, ISSN 0887-3828/04014063.
8. CERC (Canterbury Earthquakes Royal Commission). (2012). "Christchurch, the city and approach to this inquiry." Final Rep., Canterbury, New Zealand
9. Bonowitz, D. (2011). "Resilience criteria for seismic evaluation of existing buildings." Special Projects Initiative Rep. A 2008, Structural Engineers Association of Northern California, San Francisco.
10. Peter I, Yenev. " Resilience and Earthquake Engineering". 16th U.S.-Japan-New Zealand Workshop on the Improvement of Structural Engineering and Resiliency, Nara, Japan. 2016.

11. M. Vona, M. Mastroberti, L. Mitidieri, S. Tataranna (2018). "New resilience model of communities based on numerical evaluation and observed post seismic reconstruction process" International Journal of Disaster Risk Reduction Volume 28, June 2018, Pages 602-609.
12. Delbaz Samadiana, Mohsen Ghafory-Ashtiany, Hosein Naderpour, Mahdi Eghbali (2019). "Seismic resilience evaluation based on vulnerability curves for existing and retrofitted typical RC school buildings" Soil Dynamics and Earthquake Engineering Volume 127, December, 105844.
13. Piyoosh Rautela, Girish Chandra Joshi, Shailesh Ghildiyal (2020). "Economics of seismic resilience of educational infrastructure in high earthquake hazard prone Himalayan province of Uttarakhand in India" . International Journal of Disaster Risk Reduction Volume 43, February, 101363.
14. Zahra Shamsoddini Motlagh, Morteza Raissi Dehkordi, Mahdi Eghbali, Delbaz Samadian (2020). "Evaluation of seismic resilience index for typical RC school buildings considering carbonate corrosion effects" . International Journal of Disaster Risk Reduction Volume 46, June, 101511.
15. Matthew D. Joyner and Mehrdad Sasani (2020) . "Building performance for earthquake resilience" . Engineering Structures 210 110371
16. Amir Oladazimi, Saeed Mansour, Seyed Abbas Hosseiniyou(2020). "Comparative Life Cycle Assessment of Steel and Concrete Construction Frames: A Case Study of Two Residential Buildings in Iran". Building, 1054.
17. Navid Rahgozar a, Majid Pouraminian, Nima Rahgozar(2021) 'Reliability-based seismic assessment of controlled rocking steel cores". Journal of Building Engineering. 102623.
18. ASCE. (2016). "Minimum design loads for buildings and other structures." ASCE/Structural Engineering Institute (SEI) 7-16, Reston, VA.
19. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19). 2019.
20. SAP2000. Integrated structural analysis and design software. Computers and Structures Inc. Berkeley(CA). 2019.