

Evaluation of Seismic Performance and Life-Cycle Cost of High-Rise Concrete Structures with Repairable Connections under Earthquake Excitations

Mahdi DavariSani¹, Panam Zarfam^{2*}, Mir Hamid Hosseini³

1-Master's Student in Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

2,3-Assistant Professor, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Civil Department, Tehran, Iran.
zarfam@iua.ac.ir

Received: 15 February 2026 Revised: 03 March 2026 Accepted: 14 May 2026
Research paper

Abstract

The primary objective of this study is to assess the seismic performance and life-cycle cost of high-rise concrete structures equipped with repairable connections under earthquake excitations. To achieve this goal, three reinforced concrete buildings with 15, 20, and 25 stories were designed using the ITBS software. Subsequently, the seismic behavior of these structures was examined under two scenarios with and without the proposed system comprising precast concrete walls incorporating replaceable dampers at the four corners of each panel. Nonlinear dynamic analyses were conducted in the OpenSees environment using seven ground motion records. Seismic responses, including inter-story drift and floor acceleration, were evaluated for both the proposed system and conventional concrete shear wall systems. To enhance practical relevance, the life-cycle cost of the 15-, 20-, and 25-story models was also assessed for both structural configurations. Results indicate that the maximum inter-story drift of the 15-, 20-, and 25-story models utilizing the proposed system decreased by 50%, 40%, and 34.5%, respectively, compared to conventional concrete wall models. Similarly, the average floor acceleration response reduced by 63.9%, 57.4%, and 52.8%, respectively. Furthermore, the life-cycle cost of the proposed system was found to be 10%, 18%, and 30% lower than that of the conventional shear wall system for the corresponding models. Overall, the findings demonstrate that the proposed system, due to its repairability feature, significantly reduces seismic demands and life-cycle costs, thereby improving seismic performance and resilience of high-rise concrete structures in earthquake-prone regions.

Keywords: High-rise concrete structure, repairable connection, earthquake excitation, drift, acceleration, life-cycle cost

*Corresponding Author: Panam Zarfam

Davari Sani S. M., Zarfam P., Hosseini M. Evaluation of Seismic Performance and Life-Cycle Cost of High-Rise Concrete Structures with Repairable Connections under Earthquake Excitations. J. Concr. Struct. Mater., 2026; 10(1): 1-20. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2026.575485.1415>

2538-5828/ © 2026The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ارزیابی رفتار لرزه‌ای و هزینه عمر مفید سازه‌های بلندمرتبه بتنی دارای اتصالات تعمیرپذیر تحت اثر رکوردهای زلزله

مهدی داوری ثانی^۱، پنام زرفام^{۲*}، میر حمید حسینی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، گرایش مهندسی زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲،۳- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده عمران، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: zarfam@iua.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

هدف اصلی در پژوهش حاضر، ارزیابی رفتار لرزه‌ای و هزینه عمر مفید سازه‌های بتنی بلندمرتبه دارای اتصالات تعمیرپذیر تحت اثر رکوردهای زلزله می‌باشد. به منظور دستیابی به این هدف، سه سازه ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه بتنی در محیط نرم افزار ایتبس طراحی و در ادامه سازه‌های بررسی شده به ازای دو حالت استفاده و عدم استفاده از سیستم پیش‌نهادی شامل دیوار پیش ساخته بتنی دارای میراگر تعویض پذیر در ۴ گوشه پانل، در محیط نرم افزار اپنسیس با استفاده از ۷ رکورد زلزله مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در این مطالعه پاسخ‌های لرزه‌ای شامل دررفت میان طبقه و شتاب طبقات در قاب‌های مورد مطالعه به ازای دو حالت سیستم پیش‌نهادی و سیستم دیواربرشی بتنی متداول مورد بررسی قرار گرفته و به منظور کاربردی تر شدن پژوهش حاضر، هزینه عمر مفید سازه‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه به ازای دو سیستم مورد مطالعه، ارزیابی شده است. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان داد، حداکثر دررفت میان طبقه مدل‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه دارای سیستم پیش‌نهادی، در مقایسه با مدل‌های دیوار بتنی متداول، به ترتیب ۵۰٪، ۴۰٪ و ۳۴٫۵٪ کاهش یافته است. این روند کاهشی در خصوص پاسخ میانگین شتاب طبقات در مورد مدل‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه به ترتیب برابر با ۶۳٫۹٪، ۵۷٫۴٪ و ۵۲٫۸٪ به دست آمده است. همچنین برای مدل‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه، هزینه عمر مفید مدل پیش‌نهادی به ترتیب ۱۰٪، ۱۸٪ و ۳۰٪ از هزینه عمر مفید مدل دیوار برشی متداول کمتر است. از بررسی‌های انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که سیستم پیش‌نهادی با توجه به ویژگی تعمیرپذیری، تقاضای لرزه‌ای و هزینه‌های عمر مفید ساختمان را در مقایسه با سیستم دیوار برشی متداول به طرز قابل توجهی کاهش می‌دهد. این مطلب باعث می‌شود که عملکرد لرزه‌ای و تاب آوری لرزه‌ای در مناطق لرزه خیز با استفاده از سیستم پیش‌نهادی افزایش یابد.

واژه‌های کلیدی: سازه بلندمرتبه بتنی، اتصال تعمیرپذیر، رکورد زلزله، دررفت، شتاب، هزینه عمر مفید

با توجه به روند رو به رشد جمعیت، به ویژه در نواحی شهری، شمار سازه‌های بلند مرتبه به دلیل کمبود زمین و مشکلات اقتصادی، افزایش یافته است. از طرفی به دلیل موقعیت استقرار کشور ایران بر روی کمربند لرزه‌ای، استفاده از سیستم دیوار برشی بتن آرمه در خصوص ساختمان‌های بلند مرتبه بتنی، به عنوان یکی از کاربردی ترین سیستم‌های باربر جانبی، مطرح است. مرسوم ترین سیستم باربر جانبی در سازه‌های بتنی، استفاده از دیوارهای برشی بتنی درجا می‌باشد که موجب افزایش سختی و پایداری سازه خواهند شد. علیرغم مزایای دیوارهای برشی درجا، بر اساس تجارب به دست آمده از زلزله‌های گذشته مشاهده شده است که استهلاک انرژی ناشی از زلزله، موجب تشکیل مفاصل پلاستیک در دیوارهای بتنی درجا شده است. لذا به منظور رفع این نقص، می‌توان از اتصالات تعمیر پذیر در دیوارهای بتنی پیش ساخته استفاده نمود. استفاده از این سیستم پیش‌ساخته، علاوه بر ارتقای سطح تاب آوری بالای سازه، موجب کاهش آسیب ایجاد شده در اجزای اصلی سازه بتنی خواهد شد که این موضوع از طریق تمرکز خرابی در اتصال فولادی انجام می‌شود. لذا در پژوهش حاضر، هدف اصلی ارزیابی رفتار لرزه‌ای و عمر مفید سازه‌های بلندمرتبه بتنی با استفاده از اتصالات تعمیرپذیر تحت اثر رکوردهای زلزله می‌باشد. استفاده از دیوارهای برشی بتن آرمه در ساختمان‌های بلند مرتبه علاوه بر افزایش سختی و مقاومت جانبی، در مقایسه با سازه‌های فولادی، هزینه‌های اولیه ساخت کمتری دارد. با وجود این مزایا، نقاط ضعفی در مورد دیوارهای برشی بتن آرمه وجود دارد که نیاز به دقت نظر بیشتری دارند. اولین مسأله، بحث زمان ساخت دیوارهای بتن آرمه برای سازه‌های بلند مرتبه می‌باشد. زیرا به طور کلی برای احداث سازه‌های بتن آرمه درجا، نیاز به زمان ساخت به مراتب بیشتری نسبت به سازه‌های فولادی می‌باشد. دومین مسأله در مورد دیوارهای برشی بتن آرمه درجا، مشکلات مربوط به بتن‌ریزی، نحوه عمل‌آوری بتن و همچنین کیفیت طرح اختلاط بتن می‌باشد. از دیگر موارد چالش برانگیز در مورد دیوارهای بتن آرمه، بحث رفتار غیرخطی آن در مقابل نیروی زلزله می‌باشد. زیرا برای استهلاک انرژی زلزله، در پایه دیوار بتن آرمه، مفصل پلاستیک تشکیل می‌شود. به طور مشخص، با تشکیل مفصل پلاستیک، ترک‌های زیادی در پایه دیوار ایجاد شده که غالباً، قابلیت تعمیر نخواهند داشت. به منظور جبران ضعف‌های مربوط به دیوارهای بتنی، استفاده از سیستم‌های سازه‌های تعمیرپذیر، به عنوان گزینه‌ای ایده آل مطرح است. لازم به ذکر است، سیستم سازه‌های تعمیرپذیر، به سیستمی اطلاق می‌شود که بتوان هر یک از اعضای آن را در صورت آسیب دیدن به آسانی و در اسرع وقت با یک عضو جدید جایگزین نمود. به عبارت دیگر، هر یک از اعضای سازه تعمیرپذیر که انتظار رفتار غیرخطی از آن می‌رود، نقش فیوز لرزه‌ای را ایفا کرده که در صورت آسیب دیدن، می‌توان آن را با عضو جدید جایگزین نمود. با این کار تاب آوری لرزه‌ای سیستم‌های بتنی پیش ساخته به طرز قابل توجهی افزایش یافته، که این امر به نوبه خود باعث تسریع در بهره برداری مجدد ساختمان‌ها پس از یک زلزله شدید می‌شود. در واقع اتصال تعمیرپذیر، با جذب انرژی تحت اثر اعمال بارگذاری جانبی، دچار تغییر شکل شده و آسیب خواهد دید. در این حالت، المان‌های اصلی سازه، پس از وقوع زلزله، سالم مانده و می‌توان اتصال با قابلیت تعمیرپذیری را با اتصال دیگری تعویض نمود. بر اساس موارد مطرح شده، ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌های بلندمرتبه دارای سیستم دیوار برشی بتنی، با در نظر گرفتن اتصالات تعمیرپذیر تحت اثر رکوردهای زلزله، موضوع مهمی است که در پژوهش حاضر مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از دیوار برشی بتنی به همراه اتصالات تعمیرپذیر، دارای مزایایی از قبیل سرعت بالای اجرا، مقاوم و تاب آوری بالای سازه، قابلیت تمرکز خرابی در اتصال فولادی و در نتیجه کاهش آسیب ایجاد شده در اجزای اصلی سازه می‌باشد.

بی و همکاران^۱ در سال ۲۰۲۱ میلادی، در پژوهشی یک نمونه اتصال تعمیرپذیر تیر-ستون هیبریدی را برای سازه‌های بتنی

^۱ Ye et al, 2021

پیشنهاد دادند [۱]. هدف از پیشنهاد این سیستم، ایجاد اتصال صلب برای قاب‌های بتنی پیش ساخته تعمیرپذیر بوده است. نتایج تجربی چرخ‌های به دست آمده از این مطالعه، نشان داد که اتصال تیر-ستون هیبریدی جدید می‌تواند اثر تمرکز تنش را در اتصال کاهش داده و عملکرد مکانیکی قابل مقایسه با اتصالات متداول ایجاد نماید. در سال ۲۰۲۰، لی و همکاران^۲ به طور تجربی یک اتصال تیر-ستون بتنی پیش ساخته با اتصال دهنده فولادی جاذب انرژی را پیشنهاد کردند [۲]. این اتصال دهنده فولادی دارای شکاف‌های افقی در بالا و پایین است که در کشش و فشار به شدت تغییر شکل داده و بنابراین ظرفیت لنگر خمشی را برای اتصال فراهم می‌کنند. در این حالت، تن‌ها اتصال دهنده‌های فولادی دچار خسارت شده و اعضای تیر و ستون پیش ساخته، بدون خسارت باقی می‌مانند. در واقع این میراگرهای فولادی دارای شکاف افقی هستند که با تغییر شکل خمیری خود، باعث بهبود ظرفیت خمیری اتصال شده و ظرفیت تعمیرپذیری سیستم پیشنهادی را افزایش داده است. کی و همکاران^۳ در سال ۲۰۲۱، یک اتصال تیر به ستون بتنی پیش ساخته با میراگرهای فولادی دارای رفتار کمانشی را مورد بارگذاری تجربی چرخ‌های قرار دادند [۳]. در این اتصال، از ورق‌های فولادی، به عنوان میراگر، در دو طرف تیرهای بتنی استفاده شده که به وسیله پیچ و مهره به ستون وصل می‌شوند. برای افزایش شکل پذیری و تغییر شکل خمیری، در بالا و پایین ورق‌های فولادی، شیارهای افقی ایجاد شده است. بر اساس نتایج این مطالعه، می‌توان ادعا نمود که اتصال پیشنهادی با میراگرهای فولادی تعویض پذیر، یک سیستم خسارت محدود را برای اعضای قاب بتنی پیش ساخته ایجاد کرده است. یانگ و همکاران^۴ یک اتصال خشک فولادی با میراگرهای اصطکاکی-چرخشی را برای وصل کردن تیرهای بتنی به ستون‌ها پیشنهاد کردند [۴]. مهم ترین مزیتی که میراگرهای اصطکاکی دارند، این است که تحت اثر بارهای وارد بدون خسارت باقی مانده و در طول زمان، عملکرد لرزه‌ای خود را حفظ می‌کنند. با وجود این ویژگی، در اتصال پیشنهادی ارائه شده در این پژوهش، کلیه میراگرهای اصطکاکی با پیچ و مهره به بدنه اصلی اتصال وصل می‌شوند تا در صورت آسیب دیدن، بتوان آن‌ها را با اعضای جدید جایگزین نمود. در سال ۲۰۲۰، هان و همکاران^۵ یک سیستم دیوار برشی بتنی پیش ساخته همراه با اتصالات خشک فولادی را به صورت تجربی، بررسی نمودند [۵]. در این سیستم، از یک پانل دیوار بزرگ، استفاده شده که به وسیله اتصال صلب فولادی به فونداسیون و تیرها وصل می‌شود. با توجه به اتصال فولادی پیچ و مهره‌های برای این سیستم، می‌توان این سیستم را یک سیستم دیوار برشی تعمیرپذیر تلقی نمود. در این سیستم، فلسفه طراحی به این شکل است که کلیه خسارت‌ها به عضو دیوار بتنی پیش ساخته وارد شده و سایر اعضا بدون خسارت باقی بمانند. فنگ و همکاران^۶ در سال ۲۰۲۱، یک سیستم دیوار بتنی پیش ساخته با ستون‌های کناری فولادی را پیشنهاد دادند [۶]. در این سیستم، دیوارهای پیش ساخته به وسیله اتصالات فولادی پیچ و مهره‌های به هم متصل می‌شوند. همچنین برای بالابردن ظرفیت جذب انرژی سیستم، دیوارهای پیش ساخته از طریق اتصالات پیچ و مهره‌های اصطکاکی به ستون‌های فولادی کناری متصل می‌شوند. از نتایج به دست آمده از این مطالعه می‌توان استنباط نمود که در تغییر مکان‌های نسبی بالا، ترک‌های گسترده‌ای در دیوارهای بتنی پیش ساخته تشکیل می‌شود. زمانی و همکاران در پژوهشی به ارزیابی آسیب پذیری لرزه‌ای احتمالاتی ساختمان‌های بلندمرتبه منظم با سیستم قاب خمشی بتن آرمه ویژه تحت زلزله‌های با زمان تناوب بلند، پرداختند [۷]. در این پژوهش، سه سازه ۱۵، ۲۵ و ۳۵ طبقه به صورت دوبعدی در نرم افزار اپنسیس طراحی شده و تحت اثر رکوردهای زلزله و با استفاده از روش تحلیل دینامیکی فزاینده مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده

² Li et al, 2020

³ Qi et al, 2021

⁴ Yang et al, 2022

⁵ Han et al, 2020

⁶ Fang et al, 2021

از این مطالعه نشان داد، آسیب پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های بلندمرتبه تحت زلزله‌های با زمان تناوب بلند، بیش تر است و هر چه از سطح آسیب جزئی به سمت آسیب متوسط، گسترده و کامل برویم، اختلاف میزان آسیب پذیری لرزه‌ای تحت رکوردهای زلزله با زمان تناوب بلند نسبت به زمان تناوب کوتاه، بیش تر خواهد شد. موسی پور و همکاران در پژوهشی به بررسی رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی بتن آرمه تقویت شده با ورق‌های پلیمری مسلح شده با الیاف پرداختند [۸]. دیوارهای مورد نظر در این پژوهش، شامل سه گروه دیوار با ارتفاع ۱۶، ۲۲، ۴ و ۳۲ متری بوده است. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان داد، ظرفیت باربری و شکل پذیری و جذب انرژی دیوارهای بتنی میان مرتبه و بلندمرتبه در اثر تقویت با ورق‌های تقویتی، افزایش یافته است. سیفی اسگ شهر و رفیعی در پژوهشی، پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بتن آرمه با سیستم دوگانه و پایه جداسازی شده در ساختگاه نزدیک به گسل را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند [۹]. در این مطالعه ساختمان‌های بتن آرمه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه که دارای سیستم دوگانه قاب خمشی ویژه همراه با دیوار برشی ویژه بوده و نیز در پلان مشابه و منظم هستند، به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده اند. نتایج نشان دهنده آن است که پاسخ ساختمان‌های جداسازی شده شامل میانگین، میانه و صدک‌های ۱۶٪ و ۸۴٪ دررفت و شتاب طبقات و همچنین میانگین و بیشینه برش پایه کاهش قابل ملاحظه‌ای نسبت به ساختمان با پای ثابت بر اساس دو آیین نامه ASCE و استاندارد ۲۸۰۰ داشته است.

علیرغم حجم قابل توجه مطالعات انجام شده در خصوص تحلیل رفتار سازه‌های بتنی و به کارگیری اتصالات تعمیرپذیر در اتصالات تیر به ستون، تا کنون شاهد انجام پژوهشی جامع و کامل در خصوص بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های بلند مرتبه بتنی دارای سیستم دیوار برشی پیش ساخته، با بهره مندی از اتصالات تعمیرپذیر تحت اثر رکوردهای زلزله نبوده‌ایم. لذا بررسی رفتار سازه‌های بتنی بلندمرتبه دارای دیوار برشی پیش ساخته با در نظر گرفتن اتصالات تعمیر پذیر، تحت اثر رکوردهای زلزله در پژوهش حاضر، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲. روش انجام پژوهش

در این پژوهش، ابتدا سیستم پیش‌هادی، شامل دیوار بتنی پیش ساخته با اتصالات تعمیرپذیر، با جزئیات سازه‌ای، ارائه شده و رفتار آن با مدل سازی اجزاء محدود، در محیط نرم افزار آباکوس، مورد ارزیابی قرار گرفته است. پس از ارزیابی رفتار کلی سیستم پیش‌هادی، سه مدل سه بعدی ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه در محیط نرم افزار ایتبس، طراحی اولیه شده و در ادامه به منظور تسریع در امر تحلیل‌های غیرخطی، مدل‌های دوبعدی از این مدل‌های سه بعدی استخراج شده و در نرم افزار اپنسیس توسعه داده شده و برای ارزیابی لرزه‌ای از تحلیل‌های غیرخطی تاریخیچه زمانی استفاده شده است. برای انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی، از ۷ رکورد زلزله استفاده شده که برای مطابقت طیف پاسخ آن‌ها با طیف طرح آیین نامه، مقیاس بندی می‌شود.

۲.۱. انتخاب رکوردهای زلزله برای تحلیل تاریخیچه زمانی

انتخاب رکوردهای مورد استفاده در پژوهش حاضر بر اساس دو معیار انتخاب شده است، اولین معیار فرض استقرار سازه بر روی خاک نوع ۲ می‌باشد. لذا تلاش شده است تا رکوردهای انتخابی، متناسب با خاک نوع ۲ استاندارد ۲۸۰۰ انتخاب شود. معیار دوم احتراز از وقوع پدیده ی تشدید در برآورد پاسخ لرزه‌ای سازه ی مورد بررسی بوده است. در شرایطی که فرکانس غالب رکورد انتخابی، منطبق بر فرکانس مود اصلی سازه باشد، شاهد تشدید دامنه نوسان و وقوع رزونانس خواهیم بود، در این شرایط پاسخ‌های به دست آمده غیرواقعی خواهند بود. به منظور جلوگیری از وقوع این حالت در پژوهش حاضر، رکوردهای مندرج در جدول (۱)

به گون‌های انتخاب شده اند که بر اساس طیف فوریه فرکانس مود اصلی سازه مورد مطالعه، منطبق بر فرکانس غالب رکورد زلزله انتخابی نباشد. لازم به ذکر است کلیه شتاب‌نگاشت‌ها، به مقدار حداکثر خود مقیاس شده اند. همچنین ضریب مقیاس آنچنان تعیین شده که در محدوده ۰/۲ تا ۱/۵ برابر پریود سازه، مقادیر متوسط‌ها در هیچ حالت کمتر از ۱/۴ برابر مقدار نظیر آن در طیف استاندارد نباشد. برای انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی، هفت رکورد زلزله قوی از پایگاه PEER انتخاب شده است. سرعت موج برشی رکوردهای زلزله بین ۳۷۵ تا ۷۵۰ متر بر ثانیه انتخاب شده اند و متناسب با خاک نوع دو استاندارد ۲۸۰۰ ایران می‌باشد.

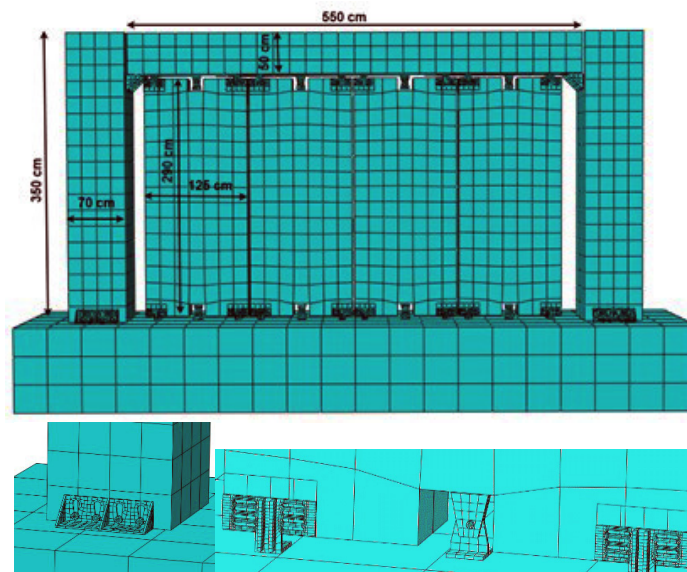
جدول (۱): مشخصات رکوردهای زلزله و ضریب مقیاس آن‌ها

شماره رکورد	نام زلزله	نام ایستگاه	حداکثر شتاب (g)	فاصله از گسل (کیلومتر)	ضریب مقیاس
۱	Cape Mendocino	Cape Mendocino	۱/۴۹۳	۶/۹۶	۱
۲	Cape Mendocino	Petrolia	۰/۵۹۱	۸/۱۸	۱
۳	Chi-Chi, Taiwan	TCU049	۰/۲۷۵	۳/۷۶	۱/۸۲
۴	Loma Prieta	Saratoga - Aloha Ave	۰/۵۰۱	۸/۵۰	۱/۵۷
۵	Northridge-01	Jensen Filter Plant Administrative	۰/۴۱	۵/۴۳	۱/۰۲
۶	Northridge-01	Sylmar - Olive View Med FF	۰/۶۰۴	۵/۳	۱
۷	Tabas, Iran	Tabas	۰/۸۵۳	۲/۰۵	۰/۷

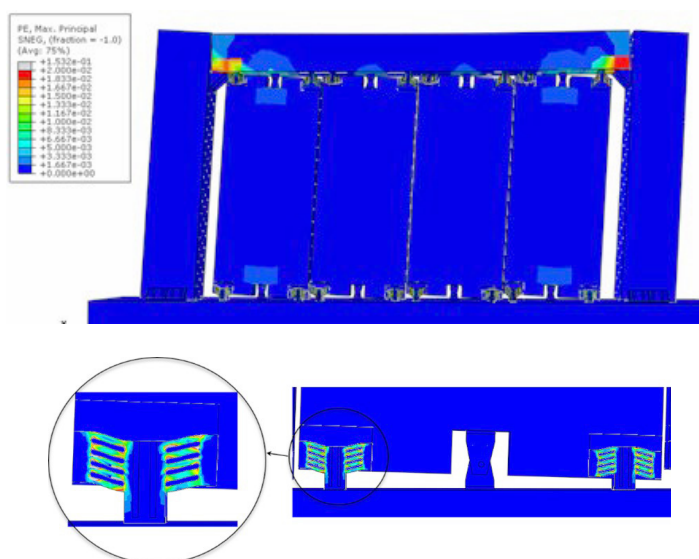
۲.۲. معرفی سیستم پیش‌نهادی دیوار برشی با اتصالات تعمیرپذیر

سیستم پیش‌نهادی دیوار بتنی پیش ساخته با اتصالات تعمیرپذیر که در پژوهش حاضر ارائه شده است، در شکل (۱) قابل مشاهده است. لازم به ذکر است، مشخصات سیستم پیش‌نهادی به صورت شماتیک برای یک قاب یک طبقه و یک دهانه نمایش داده شده است. جزئیات نمایش داده شده، تن‌ها الگویی برای نشان دادن مشخصات سیستم پیش‌نهادی است. در سیستم پیش‌نهادی، از چندین پانل دیوار پیش ساخته استفاده می‌شود که درون یک قاب بتنی پیش ساخته قرار گرفته است. مشخصات این اتصالات لازم است به گون‌های باشد که در اثر بارهای ثقیلی وارده، مقاومت خود را حفظ کنند. برای افزایش مقاومت جانبی و ظرفیت استهلاک انرژی سیستم، در چ‌هار گوشه هر پانل دیوار، اتصال دهنده‌های فولادی شیاردار (میراگرهای فولادی شیاردار)، قرار داده شده است. این میراگرها با پیچ و مهره به اعضای دیوار و تیر وصل شده و در نتیجه قابل تعویض می باشند. توجه به این نکته ضروری است که با توجه به مطالعات گذشته، نشان داده شده است که میراگرهای فولادی شیاردار، ضمن سادگی در ساخت و ارزان بودن، دارای ظرفیت استهلاک انرژی بسیار مناسبی هستند [۱۰]. لذا در سیستم پیش‌نهادی، از میراگرهای فولادی شیاردار استفاده شده است. یکی از انتخاب‌های بسیار مناسب برای کاهش خسارت به ستون‌های بتنی پیش ساخته، استفاده از اتصالات گهوارهای در پایه ستون‌ها است. برای فراهم نمودن یک اتصال گهوارهای، در پایه ستون از یک سری کلید برشی استفاده می‌شود. در هر کلید برشی، چندین سوراخ قائم ایجاد شده تا ضمن جلوگیری از لغزش ستون‌ها، اجازه هر گونه حرکت قائمی را در اثر مکانیزم گهوارهای بدهد. در شکل (۲)، توزیع کرنش پلاستیک سیستم پیش‌نهادی، تحت اثر بارگذاری چرخ‌های در تغییر مکان نسبی ۲٫۷ درصد نشان داده شده است. به طور کلی، می‌توان مشاهده نمود که میراگرهای فولادی

شیاردار، کرنش پلاستیک بالایی تجربه کرده و اعضای اصلی سیستم از قبیل دیوارها، تیر و ستون‌های کناری، خسارت محدودی دارند.



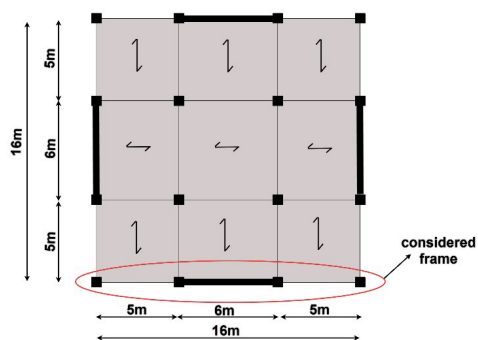
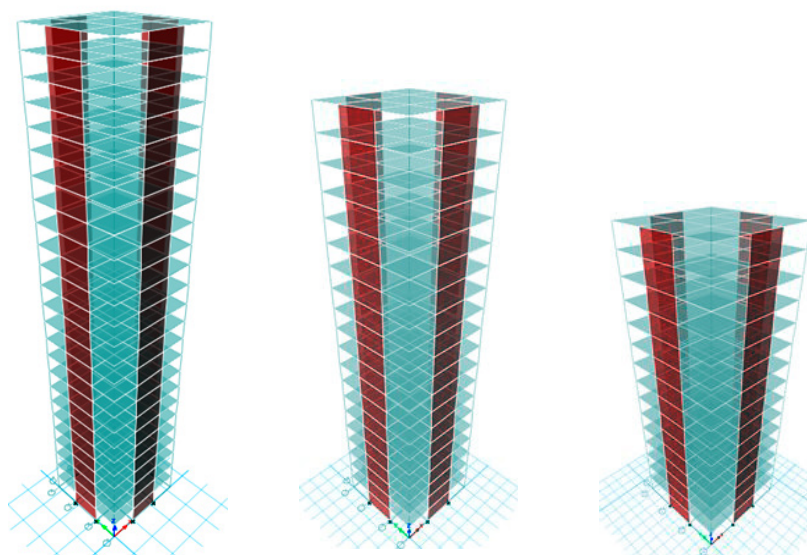
شکل (۱): مدل سازی سیستم پیش‌نهادی دیوار برشی با اتصالات تعمیرپذیر در محیط آباکوس



شکل (۲): توزیع کرنش پلاستیک سیستم پیش‌نهادی در تغییرمکان نسبی ۲٫۷ درصد

۲.۳. صحت سنجی سیستم پیش‌نهادی

به منظور اطمینان از روند مدلسازی دیوارهای بتن آرمه، یک مدل تجربی تحت عنوان CW0، که توسط لو و همکاران [۱۱] توسعه داده شده است، مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل سازی فایبری، دیوارهای بتن مسلح از تکنیک مدلسازی تیر-خرپا استفاده شده است. در این تکنیک اعضای مرزی و اعضای جان دیوار به وسیله المان غیرخطی تیر-ستون شبیه سازی شده و برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی اعضای بتنی، در هر المان تیر-ستون، پنج نقطه انتگرال وزنی لحاظ شده که در آن‌ها مقاطع فایبری



شکل (۴): موقعیت قاب‌های دو بعدی مد نظر در پلان و تصویر سه بعدی سازه‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر



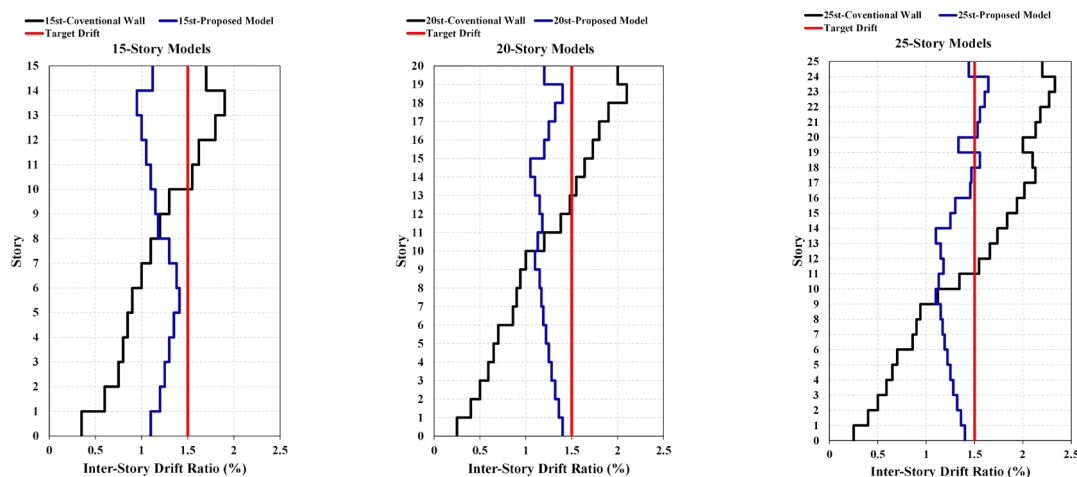
شکل (۵): ابعاد مقاطع طراحی شده در مدل‌های دو بعدی مورد مطالعه در تحلیل‌های غیرخطی

۴. تحلیل نتایج

به منظور ارزیابی بهتر عملکرد لرزه‌ای مدل‌های مورد مطالعه، در هر تراز ارتفاعی، رفتار لرزه‌ای قاب‌های مورد مطالعه با یک مدل مشابه دیوار برشی متداول (قاب فاقد مدل پیش‌هادی) مقایسه شده است. مشخصات طراحی مدل دیوار برشی متداول مشابه با جزئیاتی است که برای مدل‌های پیش‌هادی در نظر گرفته شده است. با این تفاوت که به جای چهار پانل دیوار کوچک مورد استفاده در مدل‌های پیش‌هادی، در مدل مرسوم، از یک پانل دیوار بزرگ که در تمام طول دهانه قاب گسترده است، استفاده شده است. پاسخ‌های لرزه‌ای مورد بررسی در پژوهش حاضر، شامل پاسخ دررفت میان طبقه و پاسخ شتاب طبقه می‌باشد که در ادامه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

۴.۱. پاسخ دررفت میان طبقه

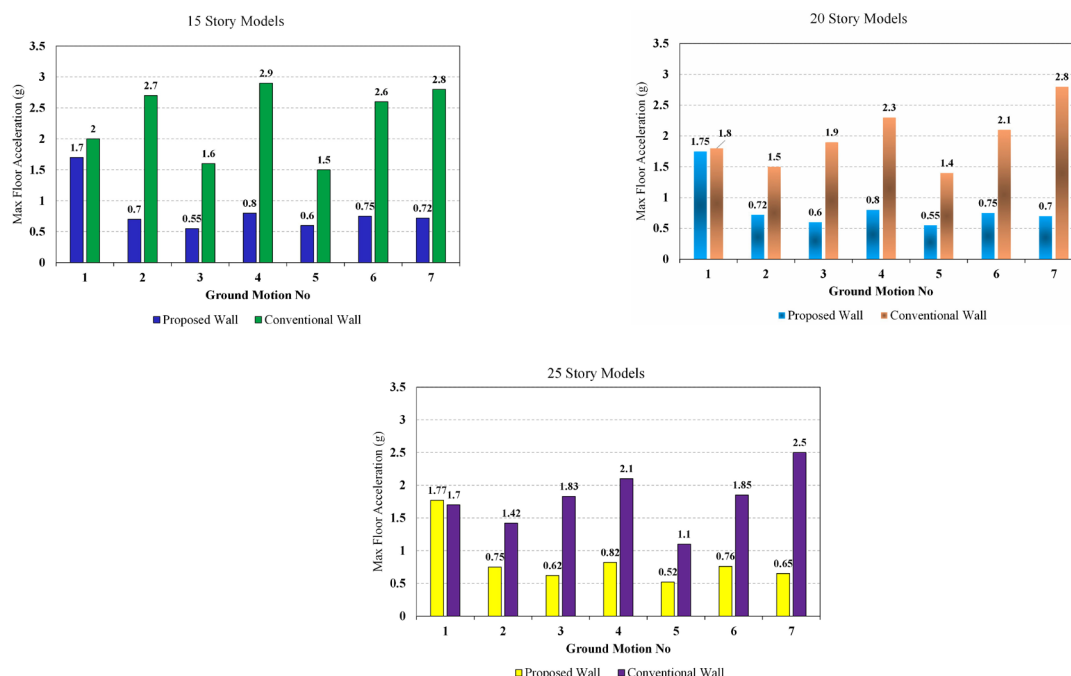
یکی از پارامترهای مهم در تحلیل رفتار لرزه‌ای سازه، پاسخ دررفت میان طبقه می‌باشد. مقدار مجاز این پارامتر بر اساس آیین نامه برابر با ۱٫۵٪ منظور شده است. لازم به ذکر است، به دلیل استفاده از ۷ رکورد زلزله، پاسخ‌های ارائه شده، میانگین بازتاب سازه به ازای ۷ رکورد اعمالی می‌باشد. در شکل (۶)، توزیع ارتفاعی مقدار میانگین حداکثر دررفت میان طبقه‌های برای مدل‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه تحت رکوردهای زلزله، قابل مشاهده است. در مقایسه با مدل‌های دیوار بتنی متداول، مدل‌های پیش‌هادی دارای دررفت میان طبقه‌های کمتری در طبقات فوقانی قاب‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه می‌باشند. در توجیه‌های نتیجه، می‌توان ادعان نمود که دیوارهای برشی بتنی متداول، برای سازه‌های بلند مرتبه دارای رفتار کاملاً طرهای بوده‌ک‌ه‌این امر، باعث افزایش دررفت میان طبقه‌های در طبقات فوقانی می‌شود. به طور کلی این نتایج نشان می‌دهند، هر چه تعداد طبقات بیشتر می‌شود، مدل دیوار برشی بتنی متداول، عملکرد مطلوب خود از نظر دررفت طبقات را به دلیل عملکرد طرهای از دست می‌دهد. از طرفی این رفتار، با توجه به تاثیر مشارکت مودهای بالاتر در سازه‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه، قابل توجیه است. همچنین مشاهده می‌شود، در قاب‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه که در آن‌ها از سیستم پیش‌هادی استفاده شده است، دررفت در تمامی طبقات از مقدار مجاز تعیین شده توسط آیین نامه (۱٫۵٪)، کم تر است. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود، حداکثر دررفت میان طبقه مدل‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه دارای سیستم پیش‌هادی، در مقایسه با مدل‌های دیوار بتنی متداول، به ترتیب ۵۰٪، ۴۰٪ و ۳۴٫۵٪ کاهش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، سیستم پیش‌هادی در سازه ۱۵ طبقه در مقایسه سازه ۲۰ و ۲۵ طبقه، عملکرد مطلوب تری در کاهش پارامتر دررفت طبقات فوقانی از خود نشان داده است.



شکل (۶): توزیع ارتفاعی میانگین حداکثر دررفت میان طبقه‌های برای مدل‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه

۴.۲. پاسخ شتاب طبقات

یکی از پارامترهای لرزه‌ای به منظور ارزیابی عملکرد اعضای غیرسازه‌ای، شتاب طبقات می‌باشد. برای این منظور، در شکل (۷) حداکثر شتاب طبقات برای مدل‌های مورد مطالعه تحت رکوردهای مختلف نمایش داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که مدل‌های پیش‌هادی، شتاب طبقات به مراتب کمتری نسبت به مدل‌های دیوار بتنی متداول را تجربه می‌کنند. بر اساس نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود میانگین شتاب طبقات برای مدل‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه دارای سیستم پیش‌هادی به ترتیب برابر با $0.83g$ ، $0.84g$ و $0.84g$ و برای مدل قاب‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه دارای دیوار برشی متداول، به ترتیب برابر با $2.3g$ ، $1.97g$ و $1.79g$ حاصل شده است. لذا بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود، استفاده از سیستم پیش‌هادی، میانگین شتاب طبقات در سازه ۱۵ طبقه را در مقایسه با مدل دیوار برشی متداول، 63.9% کاهش داده است. این روند کاهشی در خصوص سازه ۲۰ و ۲۵ طبقه به ترتیب برابر با 57.4% و 52.8% به دست آمده است. این نتایج به دلیل این واقعیت هست که مدل‌های پیش‌هادی، دارای سختی جانبی کمتر و میرایی بیشتری نسبت به مدل‌های دیوار برشی متداول می‌باشند. به عبارت دیگر، با توجه به استفاده از یک دیوار لارج پانل برای مدل دیوار متداول، سختی اولیه قابل توجهی برای این مدل‌ها ایجاد شده که این امر به نوبه خود باعث افزایش شتاب طبقات می‌شود. با دقت در نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت، استفاده از سیستم پیش‌هادی در رابطه با کاهش پارامتر شتاب طبقات، در سازه ۱۵ طبقه در مقایسه با سازه‌های ۲۰ و ۲۵ طبقه، عملکرد بهتری از خود نشان داده است.



شکل (۷): حداکثر شتاب طبق‌های مدل‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه مورد مطالعه تحت اثر رکوردهای مختلف

به طور کلی، این نتایج نشان می‌دهند که در مقایسه با سیستم دیوار برشی بتنی متداول، سیستم پیش‌هادی دارای عملکرد بسیار مطلوب تری برای کنترل خسارت به اعضای غیرسازه‌ای می‌باشد. نتایج مطالعات [۱۲] نشان می‌دهد که با کاهش خسارت به اعضای غیرسازه‌ای، بخش قابل توجهی از هزینه‌های ساختمان پس از تجربه نمودن یک زلزله مخرب کاهش می‌یابد.

۴.۳. هزینه عمر مفید سازه‌های مورد مطالعه

به منظور کاربردی تر شدن پژوهش حاضر و تجاری سازی آن، هزینه عمر مفید سازه‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه، به ازای دو سیستم مورد مطالعه (سیستم پیش‌نهادی و دیوار برشی متداول) بررسی و مقایسه شده است. به این منظور ابتدا هزینه اولیه مصالح ساخت، با توجه به مقاطع طراحی شده در قاب‌های مورد مطالعه تعیین و در ادامه با استفاده از رابطه (۱)، هزینه کل عمر مدل‌ها (شامل هزینه‌های اولیه ساخت و هزینه چرخه عمر ساختمان) تعیین شده است. برای تعیین هزینه چرخه عمر ساختمان، در ابتدا، هر یک از مدل‌های مورد مطالعه تحت سه شدت مختلف زلزله با دوره بازگشت‌های ۵۰٪ در ۵۰ سال، ۱۰٪ در پنجاه سال و ۲٪ در پنجاه سال، مورد بررسی قرار گرفته و نیازهای لرزه‌ای دریفت طبقات و شتاب طبقات که برای تعیین روابط (۲) تا (۵) مورد نیاز هستند، استخراج می‌شوند. پس از استخراج نیازهای لرزه‌ای، برای تخمین اعداد موجود در رابطه (۵) که احتمال رخداد سالانه را نشان می‌دهد، سه نقطه نسبت نیاز لرزه‌ای به شدت زلزله، مشخص می‌شوند. در این رابطه، C_{tot} هزینه کل ساختمان، C_{in} هزینه اولیه ساخت و C_{ls} هزینه چرخه عمر ساختمان می‌باشند. لازم به ذکر است که در پروژه حاضر تنها هزینه‌های مربوط به مصالح سازه ساختمان به عنوان هزینه اولیه ساخت در نظر گرفته می‌شود.

$$C_{tot} = C_{IN} + C_{LS} \quad C_{tot} = C_{IN} + C_{LS} \quad (۱)$$

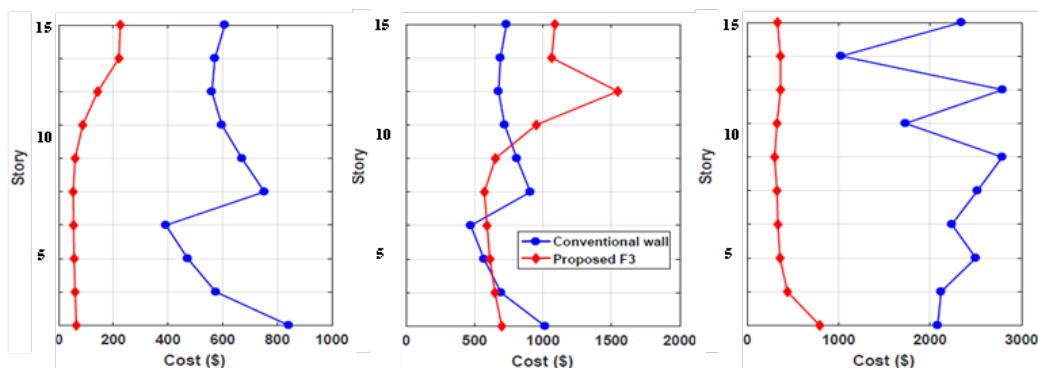
$$C_{LS} = \frac{v}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \sum_{i=1}^N (C_{dam}^i + C_{con}^{\theta,i} + C_{con}^{acc,i}) P_i \quad (۲)$$

$$P_i = P_i(\Delta > \Delta_i) - P_{i+1}(\Delta > \Delta_{i+1}) \quad P_i = P_i(\Delta > \Delta_i) - P_{i+1}(\Delta > \Delta_{i+1}) \quad (۳)$$

$$P_i(\Delta > \Delta_i) = \left(-\frac{1}{vt}\right) * \ln[1 - \bar{P}_i(\Delta > \Delta_i)] \quad P_i(\Delta > \Delta_i) = \left(-\frac{1}{vt}\right) * \ln[1 - \bar{P}_i(\Delta > \Delta_i)] \quad (۴)$$

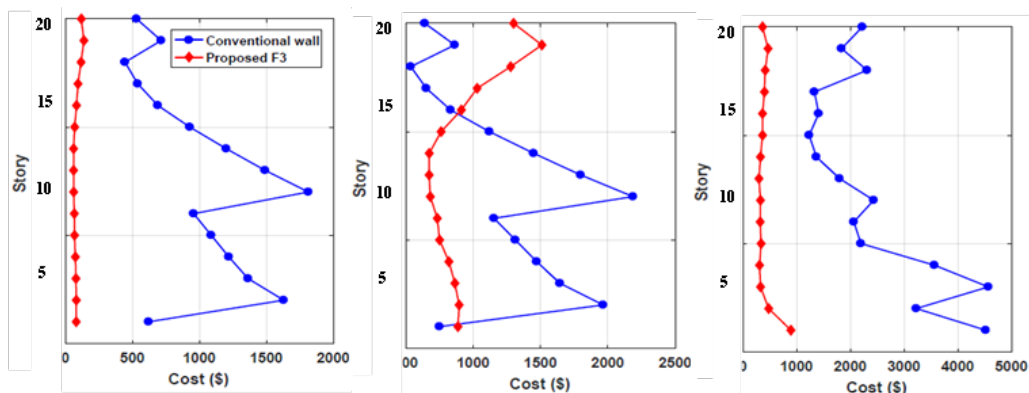
$$\bar{P}_i(\Delta > \Delta_i) = \gamma e^{-k\Delta_i} \quad \bar{P}_i(\Delta > \Delta_i) = \gamma e^{-k\Delta_i} \quad (۵)$$

در شکل‌های (۸) تا (۱۰) هزینه‌های سازه‌ای، غیرسازه‌ای وابسته به دريفت و غیرسازه‌ای وابسته به شتاب طبقات به تفکیک در هر طبقه از مدل‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه، نشان داده شده است. بر اساس نتایج، مشاهده می‌شود که هزینه‌های مربوط به خسارت اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای مدل دیوار برشی بتنی متداول به مراتب بیشتر از مدل سیستم پیش‌نهادی می‌باشد. این نتایج موید آن است که سیستم پیش‌نهادی با توجه به خسارت محدود بودن و استفاده از میراگرهای فولادی تعویض پذیر، هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری ساختمان را تا حد زیادی کاهش می‌دهد.



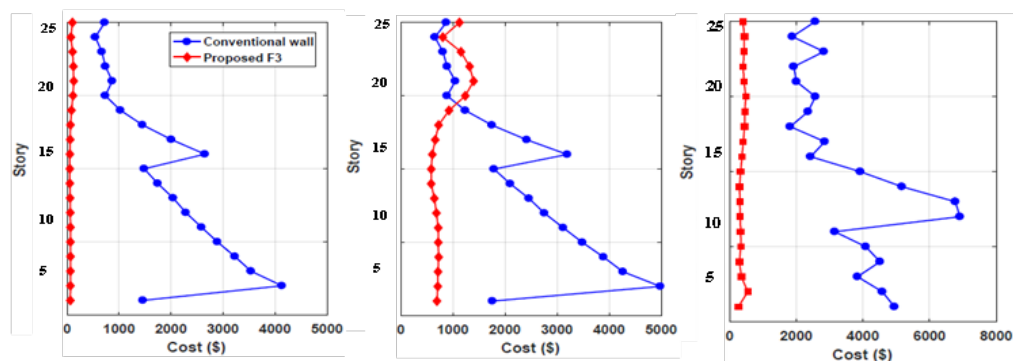
الف) هزینه اعضای غیرسازه‌ای وابسته به شتاب طبقات
ب) هزینه اعضای غیرسازه‌ای وابسته به دريفت طبقات
ج) هزینه اعضای سازه‌ای

شکل (۸): هزینه چرخه عمر در هر طبقه مدل‌های ۱۵ طبقه



الف) هزینه اعضای غیرسازه‌های وابسته به شتاب طبقات
ب) هزینه اعضای غیرسازه‌های وابسته به دریافت طبقات
ج) هزینه اعضای سازه‌های

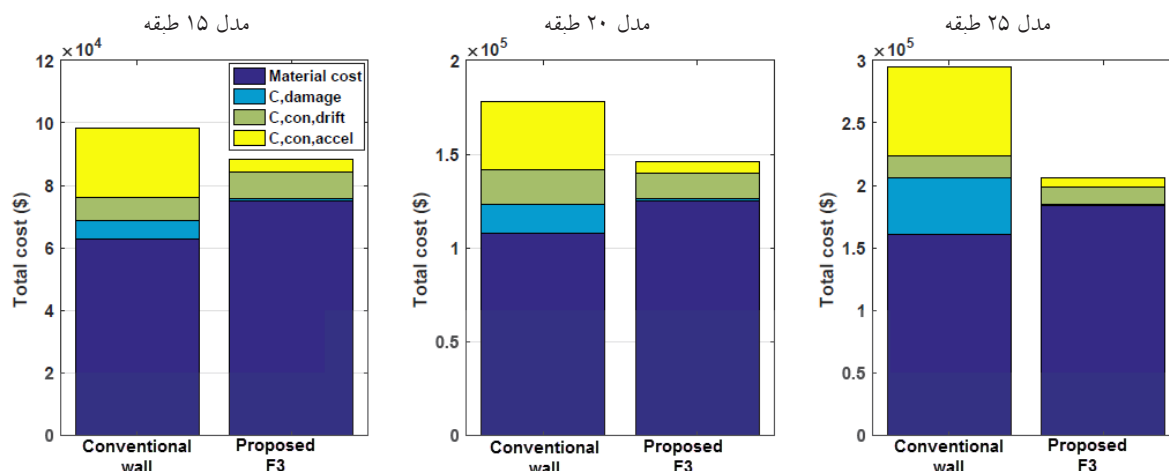
شکل (۹): هزینه چرخه عمر در هر طبقه مدل‌های ۲۰ طبقه



الف) هزینه اعضای غیرسازه‌های وابسته به شتاب طبقات
ب) هزینه اعضای غیرسازه‌های وابسته به دریافت طبقات
ج) هزینه اعضای سازه‌های

شکل (۱۰): هزینه چرخه عمر در هر طبقه مدل‌های ۲۵ طبقه

در شکل (۱۱)، هزینه کل عمر مدل‌ها نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزودن هزینه‌های چرخه عمر ساختمان به هزینه‌های اولیه ساخت، مدل‌های پیشنهادی دارای هزینه عمر مفید ساختمان به مراتب کمتری در مقایسه با مدل‌های سیستم دیوار برشی بتنی متداول می‌باشند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، برای هر سه سطح ارتفاعی ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه، مدل‌های پیشنهادی دارای هزینه عمر مفید کمتری نسبت به مدل‌های دیوار برشی متداول می‌باشند. به نحوی که برای مدل‌های ۱۵ طبقه، هزینه عمر مفید مدل پیشنهادی ۱۰٪ از هزینه عمر مفید مدل دیوار برشی متداول کمتر است. همچنین برای مدل‌های ۲۰ و ۲۵ طبقه این روند کاهشی به ترتیب برابر با ۱۸٪ و ۳۰٪ حاصل شده است.



شکل (۱۱): مقایسه هزینه کل عمر ساختمان مدل‌های مورد مطالعه

۵. نتیجه گیری

مهم ترین نتایج به دست آمده از این مطالعه، به شرح زیر قابل بیان است:

۱. بر اساس نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود حداکثر دریافت میان طبقه مدل‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه دارای سیستم پیشنهادی، در مقایسه با مدل‌های دیوار بتنی متداول، به ترتیب ۵۰٪، ۴۰٪ و ۳۴٫۵٪ کاهش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، سیستم پیشنهادی در سازه ۱۵ طبقه در مقایسه سازه‌های ۲۰ و ۲۵ طبقه، عملکرد مطلوب تری در کاهش پارامتر دریافت طبقات فوقانی از خود نشان داده است.

۲. استفاده از سیستم پیشنهادی، میانگین شتاب طبقات در سازه ۱۵ طبقه را در مقایسه با مدل دیوار برشی متداول، ۶۳٫۹٪ کاهش داده است. این روند کاهشی در خصوص سازه ۲۰ و ۲۵ طبقه به ترتیب برابر با ۵۷٫۴٪ و ۵۲٫۸٪ به دست آمده است. این نتایج به دلیل این واقعیت هست که مدل‌های پیشنهادی، دارای سختی جانبی کمتر و میرایی بیشتری نسبت به مدل‌های دیوار برشی متداول می‌باشند. به عبارت دیگر، با توجه به استفاده از یک دیوار لارج پانل برای مدل دیوار متداول، سختی اولیه قابل توجهی برای این مدل‌ها ایجاد شده که همین امر به نوبه خود باعث افزایش شتاب طبقات می‌شود. استفاده از سیستم پیشنهادی در رابطه با کاهش پارامتر شتاب طبقات، در سازه ۱۵ طبقه در مقایسه با سازه ۲۰ و ۲۵ طبقه، عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

۳. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، برای هر سه سطح ارتفاعی ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه، مدل‌های پیشنهادی دارای هزینه عمر مفید کمتری نسبت به مدل‌های دیوار برشی متداول می‌باشند. به نحوی که برای مدل‌های ۱۵ طبقه، هزینه عمر مفید مدل پیشنهادی ۱۰٪ از هزینه عمر مفید مدل دیوار برشی متداول کمتر است. همچنین برای مدل‌های ۲۰ و ۲۵ طبقه این روند کاهشی، به ترتیب برابر با ۱۸٪ و ۳۰٪ حاصل شده است. از این نتایج می‌توان استنباط نمود که سیستم پیشنهادی با توجه به ویژگی تعمیرپذیری، هزینه‌های عمر مفید ساختمان را در مقایسه با سیستم دیوار برشی متداول به طرز قابل توجهی کاهش می‌دهد. این مطلب باعث می‌شود که تاب آوری لرزه‌ای در مناطق لرزه خیز با استفاده از سیستم پیشنهادی افزایش یابد.

- [1]. Ye M, Jiang J, Chen HM, Zhou HY, Song DD. Seismic behavior of an innovative hybrid beam-column connection for precast concrete structures. *Eng Struct*, 2021, 15(227), 111436.
- [2]. Li X, Wu G, Kurama YC, Cui H. Experimental comparisons of repairable precast concrete shear walls with a monolithic cast-in-place wall. *Eng Struct*, 2020, 216, 110671.
- [3]. Qi Y, Teng J, Shan Q, Ding J, Li Z, Huang C, et al. Seismic performance of a novel prefabricated beam-to-column steel joint considering buckling behaviour of dampers. *Eng Struct*, 2021, 15(229), 111591.
- [4]. Yang C, Xie L, Li A, Wang X. A dry-connected rotational friction dissipative beam-to-column joint for precast concrete frame: Full-scale experimental and numerical investigations. *Journal of Building Engineering*. 2022, 21, 104685.
- [5]. Han Q, Wang D, Zhang Y, Tao W, Zhu Y. Experimental investigation and simplified stiffness degradation model of precast concrete shear wall with steel connectors, *Eng Struct*, 2020, 220, 110943.
- [6]. Fang Q, Qiu H, Sun J, Dal Lago B, Jiang H. Performance study of precast reinforced concrete shear walls with steel columns containing friction-bearing devices. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2021 Aug; 21(3):1-9.
- [7]. Zamani AM, Pahlavan H, Shamekhi Amiri M and Rafiee F. Probabilistic Seismic Assessment of RC Tall Regular Building Having Special Moment Frames Subjected to Long-Period Earthquakes. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 2022, 8(4), pp270-291(In Persian).
- [8]. Mousapour R, RezvaniSharif M and BeheshtiAval SB. Investigation of Seismic Behavior of Reinforced Concrete Shear Walls Rehabilitated Whit Fiber Reinforced Polymer Sheets. *AmirKabir Journal of Civil Engineering*. 2021, 53(5), pp 1781-1800 (In Persian).
- [9] M. R. Seify Asghshahr, S. Rafiei, Seismic Response of Base-isolated Dual-system Reinforced Concrete Buildings at a Near-fault Site, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(4) (2022) 1607-1630.4555.
- [10]. Dal Lago B, Biondini F, Toniolo G. Experimental tests on multiple-slit devices for precast concrete panels. *Engineering Structures*. 2018 Jul 15; 167:420-30.
- [11]. Lu X, Wu H. Study on seismic performance of prestressed precast concrete walls through cyclic lateral loading test. *Magazine of Concrete Research*. 2017 Sep; 69(17):878-91.
- [12]. Khakurel S, Dhakal RP, Yeow TZ, Saha SK. Performance group weighting factors for rapid seismic loss estimation of buildings of different usage. *Earthquake Spectra*. 2020 Aug; 36(3):1141-65.