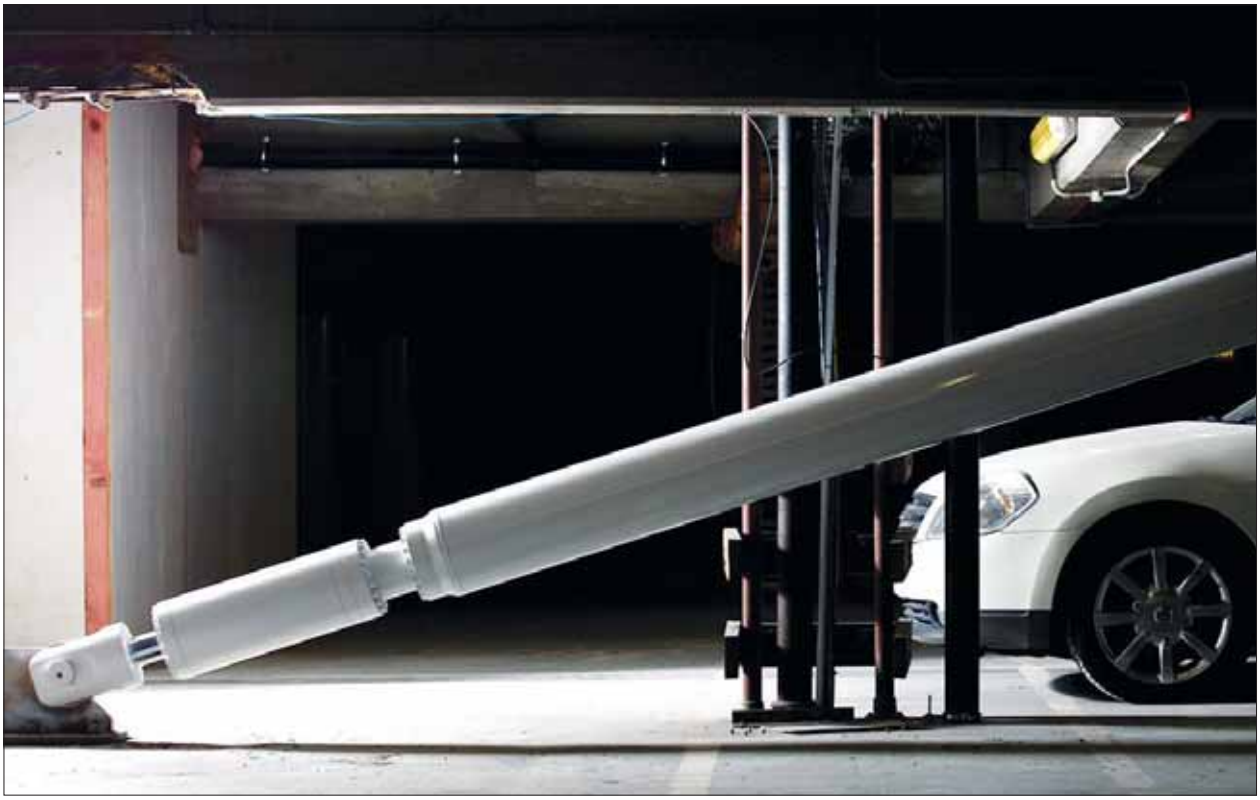


تحلیل اقتصادی استفاده از سیستم‌های نوین کنترل سازه با توجه به هزینه‌های چرخه عمر

چارامیترو پولو، نیکاسد لاگاروس
مترجم: احمد سپهری

مقدمه

طرح لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی در حال حاضر بر اساس معیار طراحی ایمنی جانی پایه‌گذاری شده است و این بدان معناست که ما نیازمند ساختمانی هستیم تا در هنگام زلزله به منظور ایمنی افراد فرو نریزد ولی با این حال می‌توان آن‌ها را طوری طراحی کرد تا مقداری آسیب سازه‌ای را نیز تجربه کنند. این رویکرد طراحی باعث خسارات اقتصادی بزرگی به دلیل آسیب به اجزای غیر سازه‌ای و سازه‌ای در زلزله‌هایی با شدت نسبتاً متوسط می‌گردد، بنابراین چنین طرحی برای ساخت گران خواهد بود. بنابراین آیین‌نامه‌ها الزام می‌کنند که ساختمان‌هایی که با این فلسفه طراحی می‌شوند، در زلزله با شدت کم، آسیب نمی‌بینند و در مقابل برخی آسیب‌های غیرسازه‌ای در زمین‌لرزه‌های متوسط و برخی آسیب‌های سازه‌ای را در زمین لرزه سطح طراحی تجربه خواهند کرد. سازه‌های طراحی شده با توجه به این فلسفه، با توجه به روند طراحی مشخص شده در آیین‌نامه و معیارهای آن، در حفاظت از زندگی انسان‌ها بسیار خوب عمل کرده‌اند.

زلزله‌های گذشته نیز این امر را تأیید می‌کنند که این روش طراحی برای محافظت از زندگی انسان کارایی مناسب را دارا می‌باشد. با این حال، این رویکرد طراحی نیز با زیان‌های بزرگی همراه است که عمدتاً به دلیل آسیب‌های غیرسازه‌ای در سطوح متوسط لرزه‌ای است. این امر در زلزله‌هایی نظیر لومو پریتا در سال ۱۹۸۹، زلزله نورتریج در سال ۱۹۹٤ و زلزله کوبه در سال ۱۹۹۵ مشاهده شد؛ در حالی که شدت حرکت زمین در حد متوسط بود اما میزان آسیب اقتصادی بیش از حد انتظار بود. بنابراین طرح‌های مبتنی بر آیین‌نامه از دیدگاه عملکرد اقتصادی مورد رضایت نمی‌باشد. این امر منجر به پیدایش رویکرد جدید به نام رویکرد طراحی مبتنی بر عملکرد شده است که علاوه بر این که هدف ایمنی جانی را برآورده می‌کند، همزمان زیان اقتصادی را نیز به میزان قابل قبولی کاهش می‌دهد. هدف این رویکرد رسیدن به طرحی قابل اعتماد و عملکردی قابل پیش‌بینی از ایمنی و اقتصاد سازه در مقابل زلزله می‌باشد. رویکرد طراحی مبتنی بر عملکرد، نوعی طراحی چند سطحی است که در سطوح خطر مختلف لرزه‌ای، سطوح مختلف عملکرد ساختمان را مورد توجه قرار می‌دهد.

تحلیل اقتصادی چرخه عمر (LCCA)[1]

در طراحی بسیاری از سیستم‌های مهندسی مانند ساختمان‌ها و سازه‌های پل، تجزیه و تحلیل هزینه چرخه عمر سازه (LCCA) یک رویکرد مهم برای مقایسه روش‌های جایگزین طراحی و تصمیم‌گیری‌های طراحی با توجه به هزینه اولیه و آینده این سیستم‌ها است. هزینه چرخه عمر یک ساختمان، شامل کل هزینه‌ای می‌باشد که برای ایجاد یک ساختمان و سایر امکانات آن در شرایط کاری مورد انتظار در چرخه عمر این ساختمان مورد نیاز است.

تجزیه و تحلیل هزینه‌های چرخه عمر می‌تواند به عنوان یک ابزار مهم در ارزیابی و مقایسه اثربخشی سیستم‌های مختلف کنترل سازه مورد استفاده قرار گیرد؛ سیستم‌هایی نظیر انواع میراگرها و جداگرهای لرزه‌ای که می‌توانند برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه ساختمانی مورد

1-Life-Cycle Cost Analysis

اســتفاده قرار گیرد. بنابراین می‌توان با مقایســه و به حداقل رساندن هزینه‌های چرخه عمر به معیاری کارفرما پسند در جهت انتخاب یک سیستم استهلاک انرژی به عنوان طرحی جایگزین سیستم‌های متداول لرزه‌ای مورد استفاده در نواحی لرزه‌خیز دست یافت.

به طور کلی برای بررســی هزینه چرخه عمر ساختمان‌هایی که با استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی طراحی می‌گردند، به سه هزینه جزئی زیر بایستی توجه نمود:

- هزینه اولیه
- هزینه خرابی
- هزینه برای سیستم‌های میراگر و جداسازی

در ادامه به معرفی هر یک از این هزینه‌ها می‌پردازیم.

هزینه اولیه

هزینــه اولیه می‌تواند به عنوان یــک هزینه ثابت برای تجزیه و تحلیل هزینه‌های چرخه عمر سازه در نظر گرفته شود، زیرا فرض می‌شود در ابتدای دوره و در زمان صفر رخ داده است. این هزینه، هزینه لازم برای ساخت ســازه ساختمان بدون احتساب هزینه سیستم‌های میراگر و یا جداگر است. این هزینه را خود می‌توان به سه نوع هزینه تقسیم نمود:

هزینه برای عناصر سازه‌ای از جمله مصالح، ساخت و نصب؛ این هزینه شامل هزینه اجرای ستون‌ها، تیرها و دال‌های سازه‌ای ساختمان است. این هزینه به طور مستقیم تحت تأثیر شرایطی از بارگذاری قرار می‌گیرد که ساختمان در برابر آن طراحی شده است. نوع مواد مورد استفاده و معیارهای طراحی نیز در مقدار این هزینه موثر می‌باشد.

هزینه‌هایی مانند هزینه نصب عناصر غیر سازه‌ای اصلی؛ شامل عناصر معماری، سیســتم‌های مکانیکی، سیســتم‌های الکتریکی و عناصر غیرسازه‌ای اختیاری

هزینه‌های غیرمستقیم؛ هزینه‌های غیرمستقیم هزینه‌هایی است که به طور مستقیم به ســاخت سازه ساختمان مربوط نمی‌شود. هزینه‌های قرارداد، هزینه‌های معماری و سود و ... را می‌توان در اینجا ذکر کرد.

هزینه خرابی

هزینه خرابی مرتبط با آسیب یا شکست سازه ساختمان و محتویات آن می‌باشــد. در مواجهه با رخدادی نظیر یک زمین لرزه شدید، این مسأله امری انکار ناپذیر می‌باشد. هزینه‌های خرابی شامل هزینه‌های مستقیم تعمیرات عناصر ســازه‌ای و غیرســازه‌ای برای بازگرداندن به عملکرد اولیه آن‌ها اســت. همچنین این هزینه شــامل هزینه‌های غیرمســتقیم مربوط به عواقب ناشــی از خرابی مانند از دست دادن اجــاره، هزینه نقل‌مــکان، از دســت دادن کســب‌وکار و غیره نیز می‌باشــد. برای برآورد سیستماتیک از این هزینه‌ها، دستورالعمل‌های FEMA 227 (۱۹۹۲) و ATC-13 (۱۹۸۵) این هزینه‌ها را اساساً به شش عنصر به شرح زیر طبقه‌بندی می‌کنند:

- هزینه خسارت / تعمیر
- هزینه ناشی از دست دادن محتویات ساختمان
- هزینه نقل‌مکان
- هزینه زیان اقتصادی
- هزینه صدمه و آسیب انسانی
- هزینه مرگ و میر انسانی

هزینه خســارت / تعمیر؛ شــامل هزینه‌های تعمیر مــورد نیاز برای بازگرداندن خسارات سازه‌ای و غیر سازه‌ای است. هزینه‌های جزئی که ممکن است برای انجام تعمیرات عناصر آسیب دیده لازم باشد نیز در این هزینه گنجانده شده است. در حالی که آسیب به اعضای سازه‌ای بر ایمنی ســاختمان‌ها تأثیر می‌گذارد، آسیب به اجزای غیرسازه‌ای بر افزایش هزینه‌های ساختمان اثرگذار خواهد بود. به طور متوسط، ارزش اجزای سازه‌ای ۲۵درصد از کل ارزش ساختمان است. این بدان معنی اســت که کل هزینه‌های چرخه عمر ممکن است به دلیل هزینه‌های آسیب اجزای غیر سازه‌ای نسبت به آسیب اجزای سازه‌ای، تحت تأثیر قــرار گیرد. به عنوان مثال، می‌توان انتظار آســیب کم و یا حتی هیچ آسیبی از اجزای سازه‌ای تحت زلزله‌های خفیف داشته باشیم، در حالی که همیشه احتمال برخی از آسیب‌های جزئی غیرسازه‌ای حتی تحت زلزله‌های خفیف و با شدت کم وجود دارد.

هزینه از دست دادن محتویات؛ شامل هزینه‌ای آسیب‌های فیزیکی به محتویاتی است که برای حفظ عملکرد مورد نظر ساختار لازم است. این هزینه با تجهیزات موجود در ساختمان متفاوت است.

هزینه نقل مکان؛ شامل هزینه‌هایی است که برای نقل‌مکان از ساختمان آسیب‌دیده در چرخه تعمیر یا بازسازی موردنیاز است.

هزینه زیان اقتصادی؛ به دو عامل تقسیم می‌شود: از دست دادن اجاره و از دست دادن درآمد. اجاره ساختمان یکی از بزرگ‌ترین منابع درآمد ساختمان‌های تجاری و حتی مسکونی است. مقدار خسارت اجاره‌ای بســتگی به نرخ اجاره ساختمان یا واحد دارد. نرخ اجاره همچنین با شرایط اقتصادی مکانی که ســاختمان در آن قرار دارد تغییر می‌کند. این درآمد در دسترس نخواهد بود تا مادامی که ساختمان آسیب‌دیده بازسازی گردد و این بدان معنی است که به زمان ترمیم بستگی دارد. از سوی دیگر، از دست دادن درآمد، به دلیل توقف مستقیم فعالیت تجاری که در آن واحد جریان دارد نیز نشان‌دهنده زیان است. فعالیت تجاری مستقیم تمام فعالیت‌های اقتصادی را به غیر از اجاره ساختمان شامل می‌شود. برای یک ساختمان که فقط برای اجاره استفاده می‌شود، این هزینه ممکن است وجود نداشته باشد.

هزینه جراحت و صدمه انسانی؛ به معنای هزینه‌های مربوط به آسیب به یک فرد توسط پس از وقوع زلزله است. برای تخمین برآورد، این هزینه اغلب به هزینه‌های جراحت جزئی و جدی تقسیم می‌شود.

هزینه مرگ و میر انســانی؛ نیز هزینه‌ای می‌باشد که با از دست دادن زندگی افراد داخل ســاختمان پس از وقوع زلزله همراه است. اگرچه هدف از آیین‌نامه ایمنی جانی می‌باشد ولی با این حال تلفات انسانی می‌تواند رخ دهد.

هزینه وسایل میراگر و جداگر

در صورت استفاده از سیستم‌های نوین لرزه‌ای به منظور ارتقای سطح عملکرد لرزه‌ای ســازه، هزینه‌های مرتبط با آن در نظر گرفته می‌شود. این هزینه شامل تمام هزینه‌های مورد نیاز برای نصب و نگهداری این

دستگاه‌ها (میراگرها و جداگرها) در شرایط کاری می‌باشد. این هزینه شامل موارد زیر است:

- هزینه تهیه میراگر و یا جداگر
- هزینه نصب
- هزینه نگهداری

هزینه تأمین سیستم‌های کنترلی با توجه به نوع دستگاه میراگر و یا جداگر مورد استفاده و همچنین ظرفیت آن متفاوت است. با استفاده از دستگاه‌های با ظرفیت بیشتر، هزینه بیشتری نیز به پروژه تحمیل خواهد شد. هزینه نصب نیز اغلب شامل هزینه سیستم بادبندی در مورد میراگرها و یا المان‌های اضافی تراز پی در مورد سیستم‌های جداساز و هزینه نیروی کار متخصص نصب‌کننده آن‌ها می‌باشد.

هزینه نگهداری نیز شامل آن هزینه‌هایی می‌باشد که نیاز است تا سیستم کنترلی در شرایط کاری نگه داشته شود. البته این امر بستگی به نوع دستگاه مورد استفاده دارد. برای مثال، یک دستگاه کنترل فعال یا نیمه فعال نیاز به نگهداری به مراتب بالاتری از یک دستگاه غیرفعال دارد. هزینه نگهداری را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: هزینه‌های نگهداری منظم و هزینه‌های نگهداری خاص. هزینه‌های نگهداری منظم، هزینه‌ای است که هر ساله در طی مدت دوره بهره‌برداری اتفاق می‌افتد مانند هزینه کنترل و بازدید سالیانه سیستم‌های میراگر و جداگر. هزینه‌های نگهداری ویژه هزینه‌ای است که به دلیل یک رویداد ویژه مانند زمین‌لرزه قوی رخ می‌دهد. به طور مثال در میان دستگاه‌های میراگر و جداگر، سیستم میراگر تسلیمی ممکن است نیاز به هزینه نگهداری ویژه‌ای برای جایگزینی ورق‌های فلزی آسیب‌دیده پس از یک زلزله شدید داشته باشد در حالی که یک میراگر ویسکوز نیازی به چنین هزینه‌ای ندارد.

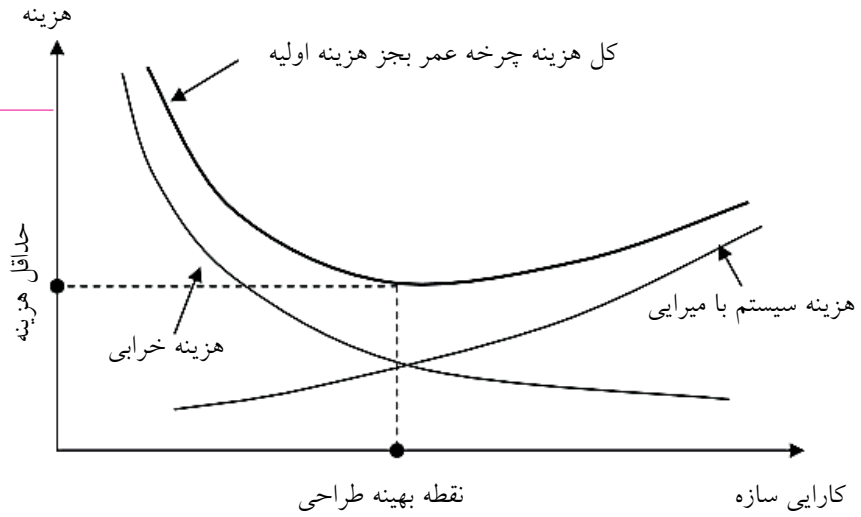
بهینه‌سازی در طراحی مبتنی بر تحلیل اقتصادی چرخه عمر

همان‌طور که در بخش قبلی بحث شده است، هزینه مورد انتظار برای چرخه عمر یک ساختمان طراحی شده برای بارهای لرزه‌ای، مجموع سه هزینه اساسی است. در میان این هزینه‌ها، هزینه خرابی بستگی به روند طراحی سیستم‌های سازه‌ای و همچنین نصب یا عدم نصب سیستم‌های استهلاک انرژی نظیر میراگرها و جداگرها دارد. بنابراین این هزینه‌ها خود تابعی از یکدیگر می‌باشند. برای یک سازه مشخص، به منظور افزایش عملکرد سیستم سازه‌ای و کاهش پاسخ دینامیکی سازه، نیاز به افزایش هزینه در بخش تهیه و نصب دستگاه‌های استهلاک انرژی خواهیم داشت. همچنین منطقی است که فرض کنیم که با بهبود عملکرد لرزه‌ای سیستم، ساختمان آسیب‌های کمتری را تجربه کرده و بنابراین هزینه‌های تعمیر آن پس از زلزله به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

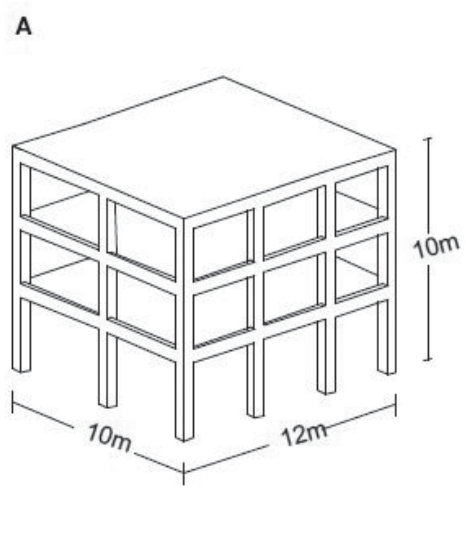
شکل ۱ تغییرات در هزینه‌های تعمیر و هزینه نصب دستگاه‌های استهلاک انرژی را به عنوان تابعی از عملکرد لرزه‌ای سیستم در شرایط کیفی مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱ می‌توان دریافت که با بهبود عملکرد لرزه‌ای سیستم، هزینه خرابی کاهش می‌یابد. در واقع برای بهبود عملکرد سازه، نیاز به سرمایه‌گذاری از نقطه نظر نصب دستگاه‌های استهلاک انرژی خواهیم داشت. این شکل همچنین نشان می‌دهد که ترکیب هزینه‌های خرابی و هزینه تامین دستگاه‌های استهلاک انرژی دارای یک حداقل در یک سطح عملکرد خاص تعریف شده، به عنوان عملکرد بهینه با حداقل هزینه چرخه عمر می‌باشد. مطالعات متعددی در زمینه به حداقل رساندن این هزینه ترکیبی و پیکربندی دستگاه‌های استهلاک انرژی در سازه صورت پذیرفته است.

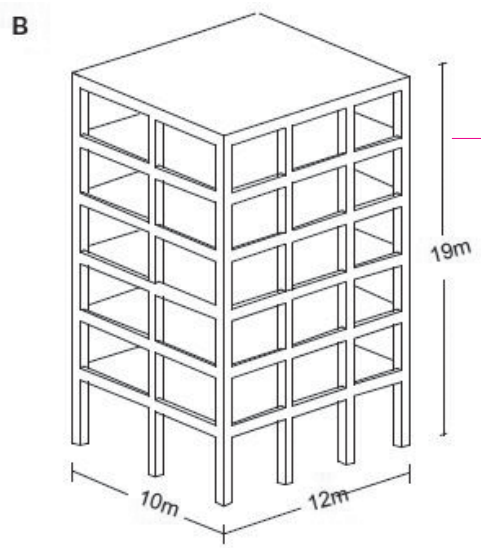
مطالعه موردی

در این بخش یک مقایسه موردی در باب هزینه‌های چرخه عمر مربوط به ساختمان‌های بتن‌آرمه‌ای که بدون جداساز یا جداسازی شده طراحی شده‌اند، بر اساس یک معیار هزینه کلی که در آن هزینه‌های اولیه و هزینه‌های چرخه عمر سازه در نظر گرفته می‌شود، انجام



شکل ۱
رابطه بین هزینه ترکیبی اولیه به‌عنوان تابعی از عملکرد سازه





شکل ۲
نمای سه بعدی
سازه ۳ و ۶ طبقه

می‌شود. بدین منظور دو ساختمان سه طبقه و شش طبقه از نوع بتن‌آرمه با سیستم قاب خمشی در نظر گرفته شده است. ساختمان مورد نظر یک بار به صورت پای ثابت و بار دیگر با استفاده از سیستم‌های جداسازی توسط جداگرهای LRB و HDRN طراحی شده است. به منظور دستیابی به یک ارزیابی عینی از عملکرد دو ساختمان، این ساختمان‌ها به روش طراحی بر اساس عملکرد با در نظر گرفتن هزینه اولیه و تغییر مکان نسبی بین طبقاتی مجاز برای سطوح خطر مختلف زلزله طراحی شده‌اند. پیکربندی کلی دو ساختمان در شکل ۲ نشان داده شده است.

به منظور مقایسه عملکرد لرزه‌ای، سازه‌های طراحی شده تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی با استفاده از شتاب نگاشت‌های مقیاس شده به طیف طراحی آیین‌نامه ASCE7 قرار گرفتند. شکل ۳ تاریخچه زمانی شتاب بام ساختمان سه طبقه در سه حالت پای ثابت و جداسازی شده را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج تحلیل، همان‌طور که انتظار می‌رود، کاهش قابل توجهی در حداکثر شتاب‌های طبقه در ساختمان‌های جداسازی شده مشاهده می‌گردد.

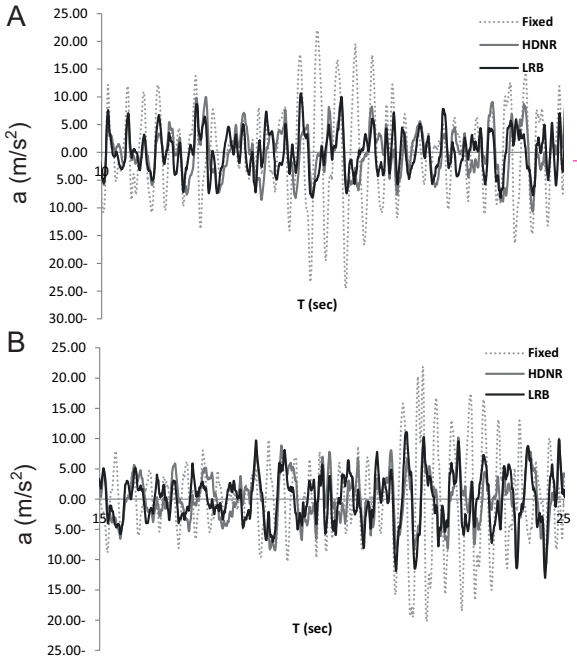
به طور کلی کاهش مناسب پاسخ لرزه‌ای در حالت طراحی با سیستم جداسازی LRB و سیستم HDNR در مقایسه با طراحی پای ثابت مشاهده می‌گردد. دو ساختمان جداسازی شده رفتار انعطاف‌پذیرتری را با فرکانس و دامنه شتاب پایین‌تر نسبت به ساختمان پای ثابت نشان می‌دهد. این امر منجر به کاهش قابل توجهی در نیروهای طراحی لرزه شده و از این رو به کاهش آسیب‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای می‌انجامد.

شکل ٤ تغییر مکان نسبی بام ساختمان سه طبقه را نشان می‌دهد که در آن استفاده از سیستم جداسازی لرزه‌ای باعث کاهش میزان تغییر مکان نسبی بام در سطح زلزله طراحی شده است.

لازم به ذکر است که برای هر دو حالت طراحی LRB و HDRN، تغییر مکان نسبی طبقات دارای یک توزیع یکنواخت در هر طبقه می‌باشد، در حالی که برای حالت پای ثابت، تغییر مکان نسبی طبقات دارای مقادیر بیشتر و روند کاهش‌یافته از پایین به بام را نشان می‌دهد.

هزینه اولیه طرح‌های بهینه‌شده برای ساختمان‌های ثابت و جداسازی شده در جدول ۱ ارائه شده است. این هزینه بر اساس متره سازه به علاوه هزینه واحدهای جداساز به همراه نصب آن به دست آمده است. همانطور که مشاهده می‌گردد هزینه اولیه سازه جداسازی شده همواره متفاوت و مقداری بیشتر از طراحی همان سازه با پای ثابت می‌باشد. مقدار این تفاوت به پارامترهای متعددی نظیر تعداد طبقات، طیف طراحی، سطح عملکرد مورد انتظار سازه، محل احداث پروژه و ... بستگی دارد.

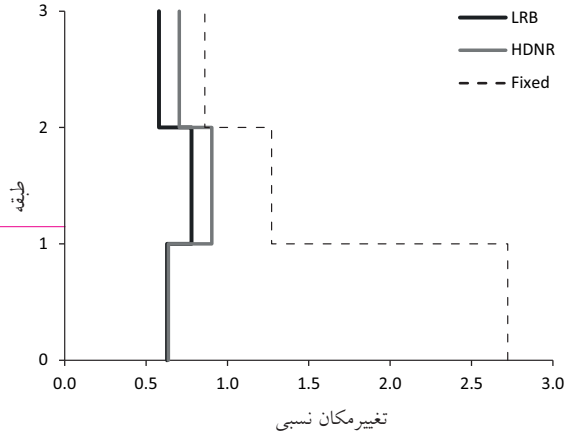
شکل ۵ هزینه کل طرح‌های بهینه‌شده ساختمان‌های سه طبقه با پای ثابت، با جداگر HDNR و جداگر LRB را در قبال هزینه‌های محاسبه شده چرخه عمر نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که



شکل ۳
شتاب بام طبقات
در سه سیستم برای
سازه ۳ طبقه در دو
جهت مختلف A و B
زلزله La Union

جدول ۱ هزینه‌های اولیه پس از طراحی بهینه (به یورو)

طبقه	طراحی	هزینه روسازه	هزینه پی	هزینه جداگر	هزینه کل
سه طبقه بتن آرمه	پای ثابت	۱۴۳/۵۰۰	۳۵/۰۰۰	–	۱۷۸/۵۰۰
	با جداگر LRB	۱۴۷/۰۰۰	۲۳/۶۰۰	۲۷/۰۰۰	۱۹۷/۶۰۰
	با جداگر HDNR	۱۵۱/۵۰۰	۲۴/۵۰۰	۲۹/۰۰۰	۲۰۵/۰۰۰
شش طبقه بتن آرمه	پای ثابت	۲۷۹/۵۰۰	۷۱/۰۰۰	–	۳۵۰/۵۰۰
	با جداگر LRB	۲۷۳/۰۰۰	۴۷/۵۰۰	۵۴/۰۰۰	۳۷۴/۵۰۰
	با جداگر HDNR	۲۷۵/۰۰۰	۴۷/۷۰۰	۴۵/۰۰۰	۳۶۷/۷۰۰



شکل ۴
حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات در سه سیستم برای سازه سه طبقه

سیستم جداسازی HDNR ۹ درصد ارزان‌تر از سیستم LRB و ۱۷ درصد ارزان‌تر در مقایسه با سازه با پای ثابت است. با درنظر گیری هزینه چرخه عمر، سیستم جداسازی LRB ۹ درصد ارزان‌تر نسبت به سازه با پای ثابت می‌باشد.

شکل ٦ سهم هزینه اولیه و هزینه چرخه عمر را در کل هزینه نشان می‌دهد. برای سازه با پای ثابت هزینه اولیه حدود ۵۲ درصد از کل هزینه است، در حالی که برای LRB و HDRN به ترتیب ۵۷ و ٦۰درصد است. هزینه حاکم برای تمام طرح‌ها هزینه اولیه است، دومین هزینه غالب، از دست دادن محتویات ساختمان در اثر شتاب طبقات است، در حالی که هزینه غالب سوم هزینه خسارت / تعمیر می‌باشد.

هزینه اولیه سازه طراحی شده با پای ثابت، ۱۰درصد کمتر از HDNR و ۱۳ درصد کمتر از LRB است. به نظر می‌رسد که هزینه صدمه انسانی (جزئی / عمده) و مرگ و میر بخش کمی از کل هزینه برای هر سه طرح (کمتر از ۰/۱درصد) است. در مقایسه با سه طرح با اشاره به کل هزینه، می‌توان دید که آن‌ها تقریباً یکسان هستند.

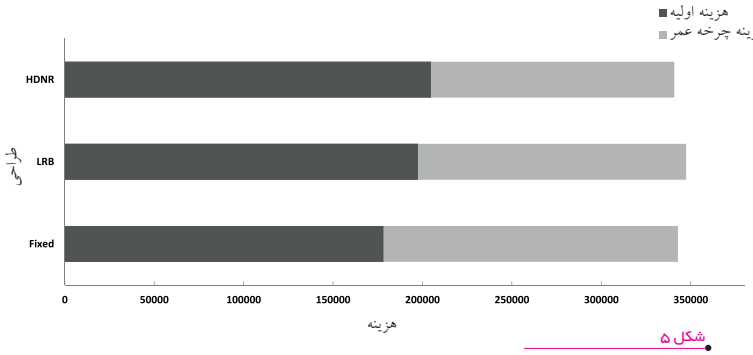
نتایج به دست آمده برای ساختمان شش طبقه در شکل ۷ نشان داده شده است. هزینه اولیه حدود ٥٤ درصد از کل هزینه سازه با پای ثابت است در حالی که برای سازه دارای جداساز LRB و HDRN به ترتیب ٦٦ درصد و ۷۲ درصد است. در حالت هزینه چرخه عمر، سازه دارای جداساز HDNR و LRB حدود ۵۱ درصد و ۳٤ درصد ارزان‌تر نسبت به سازه با پای ثابت هستند در حالی که سازه دارای جداساز HDNR ۲۵ درصد ارزان‌تر نسبت به سازه دارای جداساز LRB است. شکل ۸ سهم اجزاء هزینه اولیه و هزینه چرخه عمر را به کل هزینه چرخه عمر نشان می‌دهد. گرچه هزینه اولیه، هزینه غالب برای تمام طرح‌ها است، هزینه غالب در مورد هزینه‌های چرخه عمر، در همه طرح‌ها، خسارات غیرسازه‌ای به دلیل شتاب طبقه بوده، در حالی که هزینه خسارت / تعمیر دومین هزینه تعیین‌کننده است. همچنین هزینه از دست دادن محتویات داخل ساختمان چهار برابر هزینه تعمیر است. نتایج عددی برای ساختمان شش طبقه نشان‌دهنده مشاهداتی است که برای ساختمان سه طبقه نیز به دست آمد و آن اینکه از دست دادن محتویات به علت حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات در مقایسه با علت شتاب طبقات قابل توجه نیست، در حالی که هزینه‌های آسیب و صدمه انسانی و هزینه‌های مرگ و میر تنها بخش ناچیزی از هزینه کل برای هر سه طرح می‌باشد (کمتر از ۰/۱درصد).

به طور خاص، با مقایسه سازه با پای ثابت و سازه دارای جداساز HDNR و LRB با اشاره به هزینه اولیه، می‌توان دید که سازه با پای ثابت به ترتیب ۵ درصد و ۷ درصد ارزان‌تر نسبت به دو طرح جداسازی شده است. در حالی که سازه دارای جداساز HDNR ۲ درصد نسبت به سازه دارای جداساز LRB ارزان‌تر است.

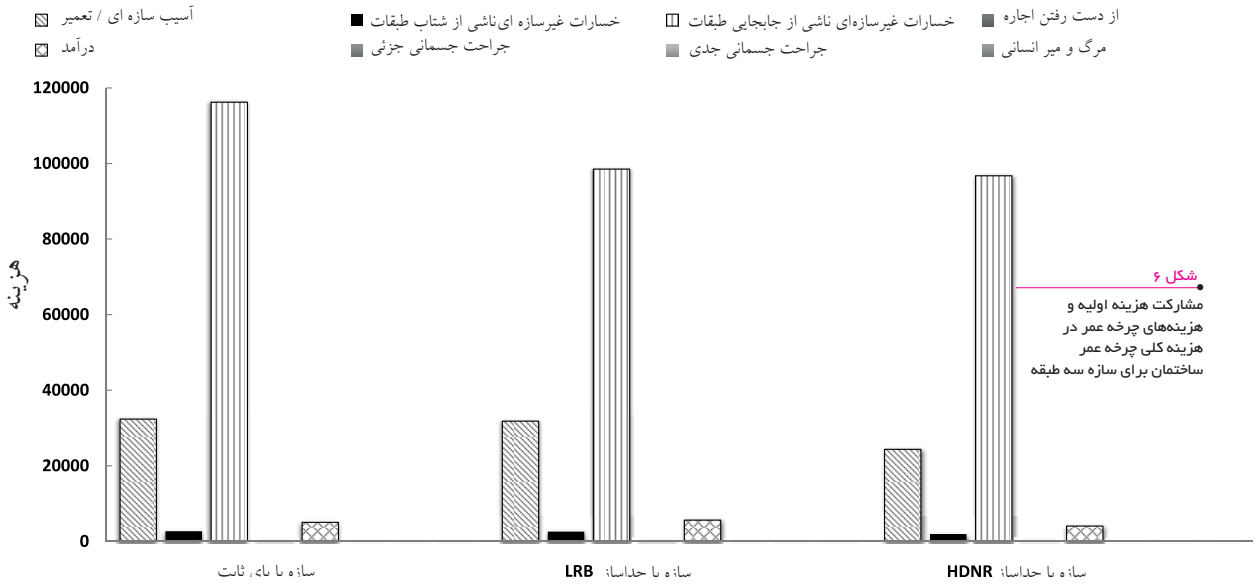
در سازه شش طبقه، در مقایسه سه طرح با اشاره به کل هزینه‌ها می‌توان دید که آن‌ها به طور قابل توجهی متفاوت هستند. به طور خاص، سازه با پای ثابت، به ترتیب ۱۳ درصد و ۲۱ درصد گران‌تر نسبت به سازه دارای جداساز LRB و HDNR طراحی شده است.

نکته نهایی و جمع‌بندی

به طور خاص، هر دو نمونه ساختمان به طور بهینه با توجه به شرایط تیکه‌گاهی پای ثابت و یا جداسازی شده با سیستم‌های جداسازی LRB و HDNR طراحی شده‌اند. نتایج عددی نشان دهنده کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در رابطه با حداکثر تغییر مکان نسبی و شتاب طبقات برای مدل‌های جدا شده پایه است. علاوه بر این، نشان داده



شکل ۵
اجزای مختلف هزینه‌های چرخه عمر ساختمان برای سازه سه طبقه

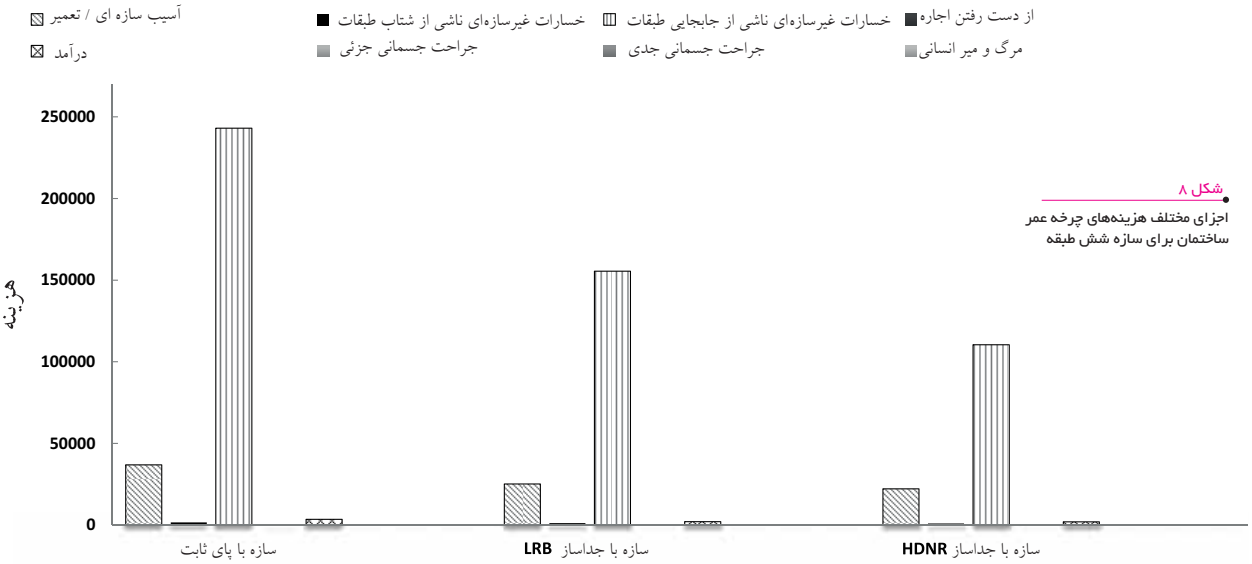


شکل ۶
مشارکت هزینه اولیه و هزینه‌های چرخه عمر در هزینه کلی چرخه عمر ساختمان برای سازه سه طبقه

شده است که سازه‌های جداسازی شده انعطاف‌پذیری بیشتری را از خود نشان می‌دهند که در آن حرکت شتابدار نسبت به سازه با پای ثابت کمتر است.

هزینه اولیه ساختمان جدا شده با LRB کمتر از ساختمان دارای جداگر HDNR است. هر دو سیستم جداسازی از نظر هزینه اولیه به میزان قابل توجهی گران‌تر از ساختمان با تکیه‌گاه ثابت هستند. با این حال، هنگامی که هزینه‌های چرخه عمر در نظر گرفته شود، ساختمان‌های جداسازی شده، یک جایگزین ارزان‌تر برای سازه با تکیه‌گاه ثابت هستند. به نظر می‌رسد که هزینه غالب برای تمام حالت‌ها، آسیب و از دست دادن محتویات داخل سازه به علت شتاب طبقات باشد، در حالی که هزینه‌های خسارت / تعمیر هزینه غالب بعدی است. همچنین لازم به ذکر است که هزینه ناشی از آسیب و از دست دادن محتویات داخل سازه به دلیل تغییر مکان نسبی طبقات، نسبت به آنچه که با شتاب‌های طبقات مرتبط است، ناچیز است. در تمام موارد ، آسیب و صدمه انسانی (جزئی / عمده) و هزینه‌های مرگ‌ومیر بخش ناچیزی از هزینه کلی است. با مقایسه هزینه بین دو ساختمان جداسازی شده، مشاهده می‌گردد که هزینه چرخه عمر سازه با سیستم HDNR ارزان‌تر از سیستم با LRB است و این در حالی است که برتری هزینه اولیه این دو سیستم با توجه به نوع پیکربندی و تعداد طبقات متفاوت می‌باشد.

شکل ۷
مشارکت هزینه اولیه و هزینه‌های چرخه عمر در هزینه کلی چرخه عمر ساختمان – سازه شش طبقه



شکل ۸
اجزای مختلف هزینه‌های چرخه عمر ساختمان برای سازه شش طبقه