

ارزیابی کاربرد توام جداسازی‌های جرمی قائم و افقی در ساختمان‌های خمشی فولادی

نوشین قربانی

کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

فرشید فتحی*

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

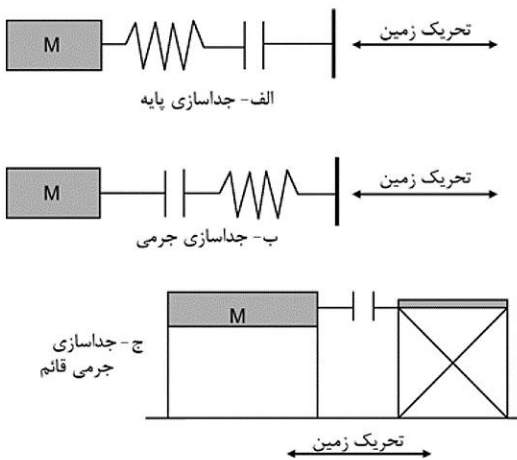
f-fathi@iaun.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۰ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۶/۱۳

چکیده

در چند دهه‌ی اخیر، کوشش‌های فراوانی جهت کاهش آسیب‌ها و خسارات ناشی از زلزله‌های نیرومند به سیستم‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای ساختمان‌ها، با استفاده از شیوه‌های مختلف کنترل لرزه‌ای سازه‌ها (فعال و انفعالی)، انجام پذیرفته است. یکی از سیستم‌های کنترل لرزه‌ای انفعالی یا غیرفعال متداول، جداسازی افقی ساختمان‌ها در تراز پایه‌ی آنها یا بیس‌آیزولیشن می‌باشد. نوع دیگری از سیستم‌های جداسازی لرزه‌ای که در سال‌های اخیر مطرح شده است، جداسازی جرمی قائم نام گرفته و سعی در تفکیک کردن سیستم سختی و سیستم جرمی موجود در سازه‌ها را دارد. در طی این مقاله، کارایی موثرتر استفاده‌ی توام از تکنیک‌های جداسازی افقی پایه و جداسازی جرمی قائم، همراه با بکارگیری ادوات میراگر (نظیر میراگرهای ویسکوز)، جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های خمشی فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور عملکرد سیستم ترکیبی پیشنهادی با انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی، تحت اثر مولفه‌های افقی شتاب زلزله‌ها، مطالعه شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان‌دهنده‌ی کاهش قابل توجه بیشینه‌ی پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان‌های مورد مطالعه، خصوصاً جابجایی‌ها، دررفت‌ها و برش‌های پایه در مقایسه با دیگر انواع سیستم‌های سازه‌ای متداول با مشخصات مشابه بوده است. در این تحقیق، علاوه بر نشان دادن کارایی سیستم کنترلی پیشنهادی، برخی از پارامترهای اثرگذار بر عملکرد آن نیز مورد بررسی و توجه قرار داده شده است.

کلید واژگان: جداسازی قائم جرمی، جداسازی افقی پایه، کنترل لرزه‌ای سازه‌ها، ساختمان‌های خمشی فولادی، تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی، بیس‌آیزولیشن



شکل ۱- مدل پیشنهادی برای جداسازی جرمی [۱۳]

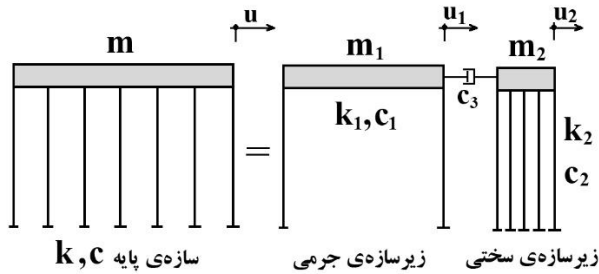
نتایج تحلیل‌های عددی ارائه شده در تحقیق مذکور، نشان‌دهنده‌ی کارایی روش جداسازی جرمی در کاهش پاسخ‌های سازه‌ها می‌باشد. در سال ۲۰۰۸، ایده‌ی جداسازی جرمی مجدداً تحت عنوان جداسازی لرزه‌ای قائم مطرح و در یک مطالعه‌ی تحلیلی با دو رویکرد پارامتریک و عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. در رویکرد پارامتریک، با تعریف یک پارامتر جداسازی برای سازه و تعیین ویژگی‌های دینامیکی سیستم، مقدار ضریب میرایی بهینه بدست آمده‌است. نتایج به‌دست آمده نقش اثرات سختی نسبی و نسبت جرم در دو زیرسیستم را نشان می‌دهد. در رویکرد عددی، پاسخ طیفی این سازه‌ها تحت اثر زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نیروی ورودی زلزله به سازه‌های جداسازی شده جرمی قائم در مقایسه با سازه‌های معمولی کاهش قابل‌توجهی داشته است [۱۴]. ایده‌ی جداسازی جرمی قائم همچنان مورد توجه بوده و تحقیقات متنوعی بر روی آن انجام می‌پذیرد [۱۵-۱۶].

باتوجه به شباهت ساختاری بین سیستم کنترلی ساختمان‌های اتصال‌یافته و ساختمان‌های جداسازی شده‌ی جرمی قائم، می‌توان نتیجه گرفت که تمامی پارامترهای اثرگذار بر کارایی گروه اول بر روی کارایی گروه دوم نیز موثر خواهد بود. در طی تحقیقات انجام شده توسط فتیحی و بهار، بر روی ساختمان‌های اتصال‌یافته‌ی مجاور، یک سیستم کنترلی ترکیبی (هایبرید) در آن پایه‌ی یکی از ساختمان‌های اتصال‌یافته به جداساز افقی

۱- مقدمه

روش کنترلی ساختمان‌های اتصال‌یافته بیش از چهاردهه‌ی پیش، نخستین بار توسط کلین و همکاران در سال ۱۹۷۲ برای کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای ناشی از باد در سازه‌های بزرگ ارائه شد و پس از آن برای کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان‌های مجاور توسعه یافت [۱]. اساس کار این روش کنترلی، اتصال دو یا چند ساختمان مجاور (با مشخصات دینامیکی مختلف) به کمک عناصر رابط از نوع انفعالی (غیرفعال)، نیمه‌فعال و یا فعال، به یکدیگر می‌باشد. کارایی این شیوه‌ی کنترلی در طول زمان و در طی تحقیقات مختلفی هم بصورت تحلیلی و هم بصورت آزمایشگاهی ارزیابی و به اثبات رسیده است [۱۰-۲]. روش کنترلی ساختمان‌های مجاور اتصال‌یافته همواره برای پژوهشگران دارای جاذبه‌ی زیادی بوده و مطالعات متعددی همچنان در حال انجام بر روی آنهاست [۱۱-۱۲]. موفقیت و کارایی سیستم کنترلی ساختمان‌های مجاور اتصال‌یافته در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان‌های اولیه، منجر به مطرح شدن ایده‌ی تفکیک یک ساختمان (تکی) به دو زیرسازه و اتصال آن زیرسازه‌ها به کمک انواع میراگرها گردید. در این ارتباط، ضیایی‌فر و نگوچی در سال ۱۹۹۸ روش جداسازی جرمی پاره‌ای را برای سازه‌ها پیشنهاد کردند [۱۳]. در روش ارائه شده (جداسازی جرمی)، سازه یا سیستم اصلی به دو زیرسیستم سازه‌ای، شامل زیرسیستم جرمی و زیرسیستم سختی، تقسیم می‌شود. با تمرکز عمده‌ی جرم سازه در زیرسیستم جرمی که دارای سازه‌ای با سختی اندک است، پریرود این زیرسیستم افزایش یافته و نیروی دینامیکی وارد به آن کاهش می‌یابد. از طرف دیگر برای کاهش تغییرمکان‌های کلی سازه از زیرسیستم سختی با جرم اندک و با سختی قابل توجه استفاده می‌شود. برای اتصال دو زیرسیستم جرمی و زیرسیستم سختی از ادوات جذب‌کننده‌ی انرژی مانند میراگرهای ویسکوز استفاده می‌گردد، شکل ۱.

نیز موجب جذب و استهلاک بیشتر انرژی ورودی به سازه خواهد گردید.



شکل ۲- مدل تحلیلی ساده شده برای جداسازی جرمی قائم

هرگاه شتاب حرکت افقی زمین برابر \ddot{u}_g و جابجایی زیرسازهی جرمی برابر u_1 و جابجایی زیرسازهی سختی برابر u_2 باشد معادلات حرکت مطابق روابط (۱) و (۲) خواهند بود.

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 + c_3 (\dot{u}_1 - \dot{u}_2) = -m_1 \ddot{u}_g \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + c_2 \dot{u}_2 + k_2 u_2 + c_3 (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) = -m_2 \ddot{u}_g \quad (2)$$

روابط فوق را می‌توان ترکیب کرده و به فرم ماتریسی بصورت رابطه‌ی (۳) بیان نمود.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = [M]\{1\}\ddot{u}_g \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۳)، ماتریس‌های M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی ترکیبی و بردار U بردار جابجایی‌های سازه با جداسازی قائم جرمی است، که این کمیت‌ها از روابط (۴) تا (۷) حاصل می‌شوند.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

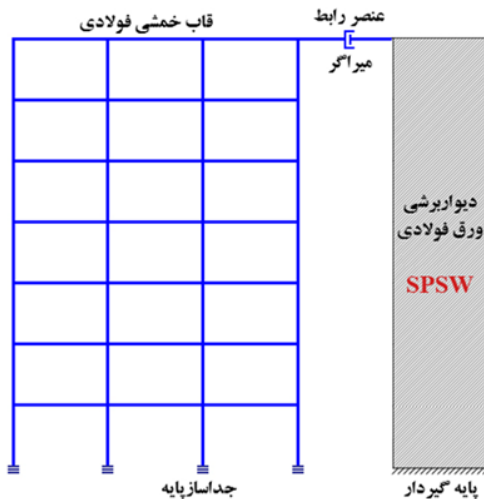
$$[C] = \begin{bmatrix} (c_1 + c_3) & -c_3 \\ -c_3 & (c_2 + c_3) \end{bmatrix} \quad (5)$$

مجهز شده است، مورد مطالعه قرار گرفت [۸، ۹]. این بررسی‌ها نشان داد که سیستم ترکیبی پیشنهادی نه تنها در مقایسه با سیستم اتصال یافته متداول، که هردو ساختمان دارای پایه‌های گیردار هستند، دارای کارایی بالاتری است، بلکه فاقد محدودیت‌های سیستم کنترلی مرسوم بوده و برای انواع مختلف ساختمان‌ها نیز قابل استفاده می‌باشد. همچنین در این مطالعه اتصال ساختمان‌ها توسط عناصر رابط مختلف (انفعالی و فعال) نیز مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. در سال ۲۰۱۷ این شیوه کنترلی ترکیبی، برای سازه‌های مجاور همسان تکمیل و توسعه یافت [۱۰]. تحقیق ارائه شده در مقاله حاضر درحقیقت تعمیم این روش کنترلی ترکیبی (هایبیرید)، برای یک ساختمان تکی بوده و با تفکیک چنین ساختمانی به دو زیرسازهی سختی و زیرسازهی جرمی صورت می‌پذیرد. زیرسیستم جرمی (قاب خمشی فولادی) به جداساز پایه مجهز شده و برای زیرسیستم سختی می‌توان از دیواربرشی فولادی یا بتن‌آرمه و یا از سیستم‌های مهاربندی استفاده نمود. اتصال دو زیرسازه در سیستم پیشنهادی با استفاده از میراگر ویسکوز انجام می‌گیرد. بنابراین هدف اصلی بررسی کارایی طرح ترکیبی پیشنهادی (شامل ترکیب جداسازی جرمی قائم و جداسازی افقی پایه) در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای و همچنین مقایسه‌ی عملکرد آن با دو نوع سیستم سازه‌ای دیگر با مشخصات مشابه می‌باشد.

۲- معرفی مدل ترکیبی پیشنهادی و روش تحلیل:

در شکل ۲ مفهوم جداسازی جرمی قائم برای یک سیستم یکدرجه آزاد نمایش داده شده است. در این شکل، سیستم یکدرجه آزاد اولیه با مقادیر جرم، سختی و میرایی به ترتیب برابر k ، m و c ، به زیرسازهی جرمی با مشخصات دینامیکی m_1 ، k_1 و c_1 و زیرسازهی سختی با مشخصات دینامیکی m_2 ، k_2 و c_2 تفکیک شده است. در این شیوهی جداسازی، جرم زیرسازهی جرمی، یعنی m_1 باید به مراتب بزرگتر از جرم m_2 باشد و همچنین سختی زیرسازهی سختی، یعنی k_2 باید به مراتب بزرگتر از سختی k_1 باشد. بدین ترتیب جرم قابل توجه m_1 در ساختاری با سختی کمتر، مقدار انرژی کمتری را در هنگام زلزله جذب می‌کند و همچنین زیرسازهی سخت، به دلیل داشتن جرم کمتر، نیروی لرزه‌ای کمتری را جذب خواهد نمود و تغییر مکان کلی سیستم را نیز کاهش خواهد داد. وجود عناصر رابط بصورت میراگر در شکل

دو زیرسازه‌ی تشکیل دهنده‌ی آن، مشخصات دینامیکی، تعداد، محل قرارگیری میراگرها، و همچنین مشخصات سیستم جداساز پایه‌ی آن دارد.



شکل ۳- سیستم ترکیبی پیشنهادی (جداسازی جرمی قائم و افقی توام)

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای این سیستم ترکیبی، شامل بررسی حداکثر پاسخ‌های جابجایی، دریفت طبقات و برش پایه در هر یک از دو زیرسازه‌ی آن و مقایسه‌ی این پاسخ‌ها با دیگر سازه‌های متداول با مقاطع مشابه، تحت اثر مولفه‌ی افقی شتاب زلزله‌های انتخابی، است. سیستم ترکیبی پیشنهادی و سیستم‌های مورد مقایسه‌ی آن تحت اثر سه رکورد زلزله، متناسب با محل ساختگاه انتخابی، به کمک نرم‌افزار تخصصی SAP2000 تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی می‌شوند. با توجه به ضوابط آئین‌نامه‌های لرزه‌ای، در هر تحلیل حداکثر پاسخ‌های حاصل از سه رکورد زلزله، ملاک مقایسه بین سیستم‌ها خواهد بود.

۲-۱- معرفی مدل‌های تحلیلی مورد مقایسه

ساختار مدل پیشنهادی در این تحقیق در بخش قبل معرفی شد و برای بررسی عملکرد آن یک مثال تحلیلی در بخش بعدی ارائه خواهد گردید. به منظور ارزیابی کارایی سیستم پیشنهادی در کاهش پاسخ‌های سازه‌ای، ضروری است که پاسخ‌های آن با پاسخ‌های نظیر در دیگر سیستم‌های سازه‌ای با مشخصات مشابه

$$(۶) \quad [K] = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}$$

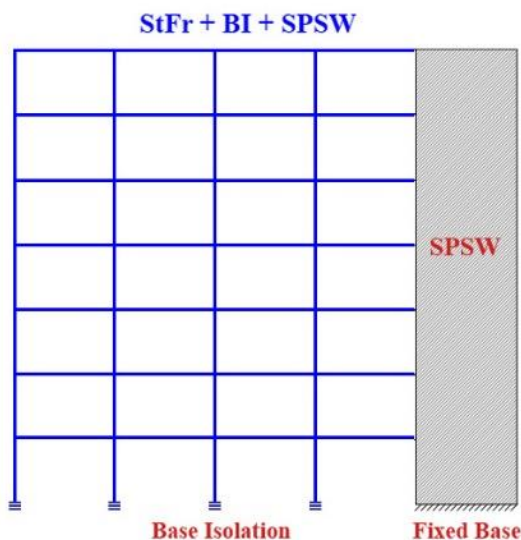
$$\{U\} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

(۷)

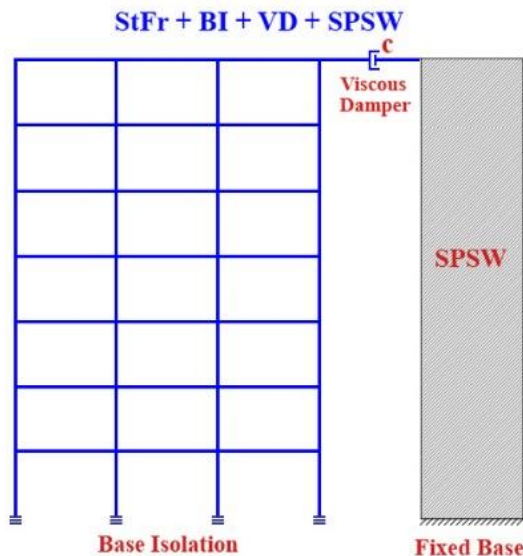
علاوه بر نکات ذکر شده قبلی درخصوص نسبت سختی‌ها و نسبت جرم‌های دو زیرسازه بر پاسخ کلی سازه‌ی جداسازی شده، عامل تعیین کننده دیگر مقدار میرایی افزوده شده به سیستم یعنی C_3 می‌باشد. اگر این میرایی درمقایسه با میرایی ذاتی سازه‌ها قابل توجه باشد، ماتریس میرایی دارای خاصیت تعامد نبوده و معادلات همبسته‌ای حاصل خواهند شد و نیاز به روش‌های عددی گام به گام برای تحلیل خواهد بود.

در ارتباط با مدل مورد بررسی در شکل ۲، دو نکته بسیار حائز اهمیت مطرح است: اول آنکه در صورت استفاده از چنین رویکردی برای ساختمان‌های بلند، تمامی کمیت‌های اسکالر ارائه شده در روابط (۴) الی (۷)، تبدیل به ماتریس خواهند شد و نیاز به استفاده از یکی از نرم‌افزارهای تخصصی برای تحلیل چنین سیستمی ضروری خواهد بود. نکته مهم‌تر، که اهمیت این پژوهش را آشکار می‌سازد آنست که در عمل هنوز یک شیوه کارآمد برای حداقل ساختن مقدار سختی زیرسیستم جرمی (k_1)، ارائه نشده است و در این مقاله با استفاده از جداساز پایه افقی برای زیرسازه‌ی جرمی، مقدار سختی جانبی آن حداقل شده و کارایی سیستم حداکثر گردیده است.

مدل پیشنهادی مورد مطالعه، ترکیبی از جداسازی قائم جرمی و جداسازی افقی در یک قاب خمشی مجهز به دیوار برشی فولادی است. این سیستم ترکیبی در شکل ۳ نمایش داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، زیرسیستم جرمی که عمده‌ی بارهای قائم را تحمل می‌کند (قاب خمشی فولادی)، مجهز به سیستم جداساز پایه‌ی افقی شده است. بدین صورت زمان تناوب اصلی این جزء بسیار افزایش یافته و نیروی دینامیکی کمتری را جذب خواهد کرد. همچنین مطابق شکل، زیرسیستم سختی شامل دیوار برشی فولادی است که با سختی قابل توجه خود (و جرم نسبی ناچیز)، جابجایی کلی سیستم را کاهش می‌دهد. اتصال دو زیرسیستم جرمی و زیرسیستم سختی توسط میراگرهای ویسکوز در تراز طبقه مورد نظر صورت می‌گیرد. کارایی این سیستم ترکیبی بستگی به نسبت‌های سختی و جرم



شکل ۴-ب- مدل قاب خمشی با جداساز پایه + دیواربرشی



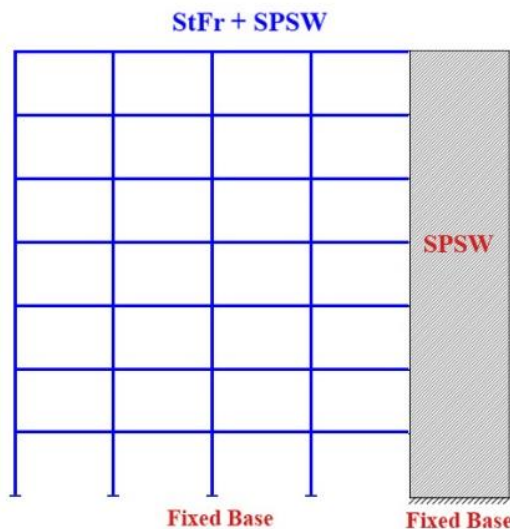
شکل ۴-ج- مدل ترکیبی پیشنهادی

شکل ۴- معرفی مدل‌های تحلیلی مورد مقایسه

ساختمان پایه‌ی مورد بررسی در مدل تحلیلی ارائه شده در بخش بعد، یک ساختمان ۱۴ طبقه فولادی با سیستم دوگانه‌ی متداول است (تذکر: تعداد طبقات موجود در مدل‌های مورد بررسی در بخش بعدی دو برابر تعداد طبقات نمایش داده شده در شکل ۴-الف، ب و ج می‌باشد).

مورد مقایسه قرار گیرد. مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق که تحت آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گرفته و پاسخ‌های آنها مقایسه می‌شوند شامل سه سیستم‌سازه‌ای، نمایش داده شده در شکل ۴. با توضیحات و اختصارات بکار رفته زیر می‌باشد:

الف) ساختمان پایه (سیستم دوگانه)، سیستم متداولی که متشکل از ترکیب قاب خمشی فولادی بعلاوه‌ی دیوار برشی فولادی است. با نمایش اختصاری (StFr + SPSW) در شکل ۴-الف،
 ب) سیستم ساختمانی متشکل از ترکیب قاب خمشی فولادی مجهز به جداساز پایه بعلاوه‌ی دیواربرشی فولادی، با نمایش اختصاری (StFr + BI + SPSW) در شکل ۴-ب،
 ج) مدل پیشنهادی در این تحقیق، متشکل از قاب خمشی فولادی با جداساز پایه و دیواربرشی فولادی، اتصال یافته توسط میراگر ویسکوز، با نمایش اختصاری (StFr + BI + VD + SPSW) مطابق شکل ۴-ج.



شکل ۴-الف- مدل پایه (قاب خمشی + دیواربرشی)

۲-۲- مشخصات مدل‌های تحلیلی

در این بخش به منظور ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی یک مثال تحلیلی ارائه شده است. مدل پایه در این مثال، یک سیستم دوگانه‌ی ۱۴ طبقه، شامل ترکیب قاب‌خمش فولادی ویژه و دیواربرشی فولادی ویژه، نظیر شکل ۴-الف (با تعداد طبقات متفاوت) می‌باشد. پلان تمامی طبقات ۲۵×۲۵ مترمربع، دارای ۳۶ ستون و همچنین تعداد دو دیوار برشی هر کدام به طول ۲/۲ متر برای هر جهت اصلی ساختمان است. ارتفاع طبقه اول برابر ۴/۵۰ متر و ارتفاع سایر طبقات برابر ۳/۵۰ متر می‌باشد. بار مرده و زنده وارد بر کف طبقات به ترتیب برابر $DL=5500 \text{ N/m}^2$ و $LL=2000 \text{ N/m}^2$ فرض شده است. سیستم سقف، دال بتن‌آرمه با ضخامت ۱۳ سانتی‌متر، بتن مصرفی با مقاومت فشاری $f'_c=25 \text{ MPa}$ و میلگرد مصرفی با مقاومت تسلیم $F_y=400 \text{ MPa}$ فرض شده است. پروفیل‌های فولادی مصرفی با مقاومت تسلیم $F_y=240 \text{ MPa}$ و مقاومت حدی $F_u=360 \text{ MPa}$ برای طراحی قاب‌خمش فولادی و دیوار برشی فولادی در نظر گرفته شده است.

طراحی مقاطع المان‌های مختلف سازه‌ای براساس تحلیل استاتیکی معادل، به روش حالت حدی و براساس ASCE7-16 و به کمک نرم‌افزار تخصصی ETABS16 انجام شده، که نتایج حاصل در جدول ۱ ارائه شده است. جداساز پایه‌ی مورد استفاده نظیر آنچه در مدل‌های ارائه شده در شکل‌های ۴-ب و ۴-ج مشاهده می‌گردد، از نوع جداساز پایه‌ی لاستیکی با سختی ۲۰۰ kN/m و میرایی ۱۷٪ بوده و طراحی آن براساس دستورالعمل نشریه ۵۲۳ انجام شده است [۱۷]. این جداسازها براساس ساختمان پایه ۱۴ طبقه با مشخصات ارائه شده در ابتدای این بخش با زمان تناوب اصلی ۱/۱۸۵ ثانیه طراحی شده‌اند. در سیستم ترکیبی پیشنهادی، شکل ۴-ج، قاب خمش فولادی (زیرسیستم جرمی) مجهز به این نوع از جداساز پایه بوده و پایه‌های دیواربرشی (زیرسیستم سختی) کاملاً گیردار است. مجدداً یادآوری می‌گردد که بر خلاف مدل‌های ایده‌آل شده در شکل‌های ۴-الف الی ج، تعداد طبقات ساختمان در این مثال تحلیلی، ۱۴ طبقه می‌باشد.

اتصال دو زیرسیستم جرمی و زیرسیستم سختی توسط میراگر ویسکوز خطی با میرایی ۴۰۰ kN.s/m، که نحوه‌ی

محاسبه‌ی ضریب میرایی بهینه‌ی آن در بخش‌های بعدی ارائه شده است، فراهم می‌شود.

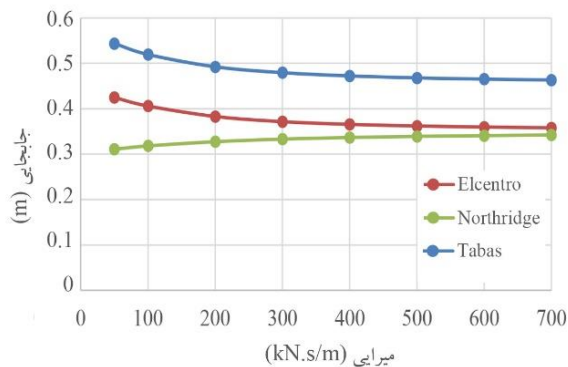
جدول ۱ - مشخصات مقاطع اعضای سازه‌ای

طبقات	مقطع تیرها	مقطع ستون‌ها	SPSW ضخامت
۴-۱	IPE400	IPB450	۶ میلی‌متر
۵-۸	IPE360	IPB400	۴ میلی‌متر
۹-۱۴	IPE330	IPB360	۳ میلی‌متر

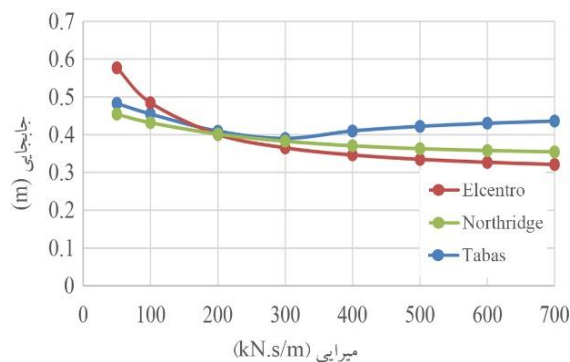
تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی به کمک نرم‌افزار تخصصی SAP2000 و بصورت سه‌بعدی انجام پذیرفته است. در مدل‌سازی ساختمان‌ها در این نرم‌افزار، نوع تحلیل غیرخطی و با استفاده از انتگرال‌گیری مستقیم انتخاب شده و میرایی مودال برابر ۰/۰۵ فرض شده است. برای بررسی رفتار غیرخطی مصالح و براساس مشخصات آنها مفاصل پلاستیک در تیرها و ستون‌ها تعریف شده است. میراگرهای ویسکوز از نوع خطی و مقدار ضریب میرایی آنها مطابق روش ارائه شده در بخش بعد بهینه گردیده است. جداسازهای لرزه‌ای از نوع لاستیکی (Rubber Isolator) در نرم‌افزار تعریف شده‌اند.

۲-۳- مشخصات زلزله‌های مورد بررسی

به منظور انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی، شتاب‌نگاشت‌هایی متناسب با ساختگاه انتخابی (حوزه‌ی دور) شامل زلزله‌های آل‌سنترو، نورث‌ریج و طیس از سایت PEER انتخاب و براساس طیف آئین‌نامه ASCE7-16 مقیاس شدند. زلزله‌ها به گونه‌ای مقیاس شدند که میانگین طیف‌های شتاب آن‌ها در پرونده‌های ۰/۲ تا ۱/۵ برابر پرپود اصلی ساختمان پایه، از طیف طرح آئین‌نامه ASCE7-16 کمتر نباشد. برای شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده در زلزله‌های آل‌سنترو، نورث‌ریج و طیس، PGAهایی به ترتیب معادل با ۰/۱۸۷۶، ۰/۵۹۹ و ۰/۶۲۷ برابر g حاصل شد که در شکل ۵ آمده است. در هر تحلیل تاریخچه‌ی زمانی، مطابق با نظر آئین‌نامه‌های ASCE7-16 و همچنین ۲۸۰۰ زلزله ایران، حداکثر پاسخ‌های حاصل از سه رکورد زلزله، ملاک مقایسه بین سیستم‌ها بوده است.



شکل ۶-الف- مقادیر حداکثر جابجایی در بام قاب خمشی



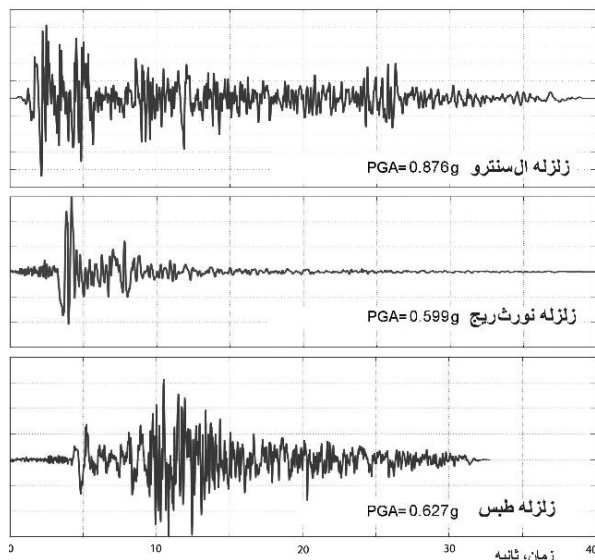
شکل ۶-ب- مقادیر حداکثر جابجایی در بالای دیواربرشی

شکل ۶- نمودارهای حداکثر جابجایی در نقاط کنترلی مدل ترکیبی پیشنهادی، در میرایی‌های مختلف (متر)

همان‌گونه که در هردو نمودار شکل ۶ مشاهده می‌گردد، عموماً با افزایش میزان میرایی در میراگر ویسکوز، جابجایی‌های حداکثر نقاط کنترلی کاهش می‌یابد. همچنین برای مقادیر میرایی‌های حدود 400 kN.s/m به بالا، تغییرات مقادیر پاسخ‌ها چندان قابل توجه نمی‌باشد، از این‌رو میرایی بهینه در تحلیل‌های بعدی و برای مقایسه پاسخ‌ها با سایر سیستم‌های سازه‌ای برابر 400 kN.s/m در نظر گرفته شده‌است.

۳- مقایسه‌ی پاسخ‌ها در مدل‌های مورد بررسی

در این قسمت به منظور بررسی کارایی سیستم ترکیبی پیشنهادی، با استفاده از مقدار میرایی بهینه بدست آمده در بخش قبل، مقادیر حداکثر پاسخ‌های مدل پیشنهادی با پاسخ‌های نظیر در دو مدل سازه‌ای دیگر (با مشخصات مشابه) مورد مقایسه



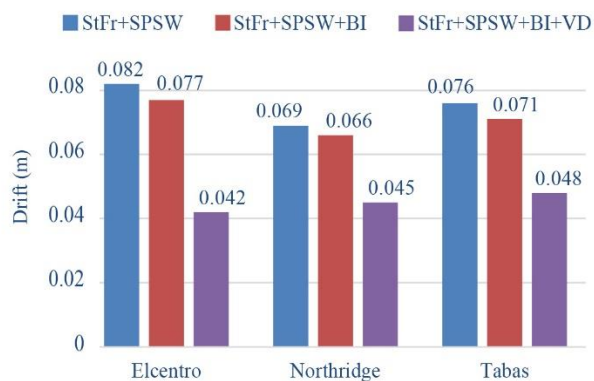
شکل ۵- شتابنگاشت‌های زلزله‌های مورد استفاده (مقیاس شده)

۲-۴- میرایی بهینه‌ی میراگرهای اتصال‌دهنده زیرسازه‌ها

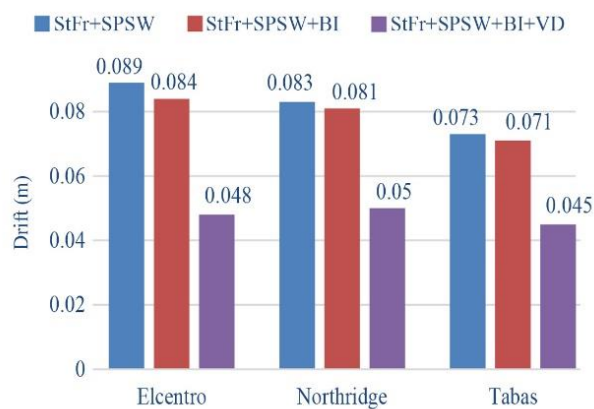
به‌منظور دست‌یابی به بالاترین کارایی برای سیستم ترکیبی پیشنهادی، در ابتدا باید ضریب میرایی بهینه برای میراگر ویسکوز محاسبه شود. میرایی بهینه‌ی میراگر ویسکوز به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که بیشینه‌ی جابه‌جایی بدست آمده در نقاط کنترلی، برای دو زیرسازه‌ی سیستم پیشنهادی، کمینه گردد. نقاط کنترلی شامل نقطه‌ی بالای دیوار برشی (در زیرسیستم سختی) و بام قاب خمشی (در زیرسیستم جرمی) است. پس از آن، براساس مقدار میرایی بهینه بدست آمده پاسخ‌های مختلف سیستم ترکیبی پیشنهادی با پاسخ‌های متناظر در دو سیستم سازه‌ای دیگر، معرفی شده در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب، مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

به‌منظور بهینه کردن ضریب میرایی میراگر ویسکوز برای سیستم پیشنهادی، مقادیر حداکثر جابجایی نقاط کنترلی سیستم ترکیبی پیشنهادی، به‌ازای میرایی‌های 50 الی 700 kN.s/m ، تحت اثر ۳ رکورد زلزله بررسی، که نتایج حاصل در شکل ۶ ارائه شده است. مقادیر حداکثر جابه‌جایی بام قاب خمشی فولادی در سیستم پیشنهادی، برای میرایی‌های مختلف در شکل ۶-الف، و مقادیر حداکثر جابه‌جایی بالای دیواربرشی در شکل ۶-ب آورده شده است.

در مقایسه با قاب‌های خمشی در دو مدل دیگر و در نمودارهای شکل ۷-ب حداکثر دریفت‌ها در زیرسازه سختی در مقایسه با دیوارهای برشی در دو مدل دیگر آورده شده است.



شکل ۷-الف- حداکثر دریفت در زیرسازه‌ی قاب خمشی



شکل ۷-ب- حداکثر دریفت در زیرسازه‌ی دیواربرشی

شکل ۷-ج- حداکثر دریفت طبقات در زیرسازه‌های مدل ترکیبی پیشنهادی در مقایسه با سایر مدل‌ها، متر

۳-۲- مقایسه پاسخ‌های جابجایی

از دیگر پاسخ‌های مورد توجه در طراحی سازه‌ها، جابجایی‌های حداکثر در نقاط کنترلی می‌باشد. در نمودارهای شکل ۸، بیشینه‌ی جابجایی در بالای دو زیرسازه‌ی سیستم پیشنهادی در مقایسه با مقادیر حداکثر جابجایی در اجزای متناظر در دو مدل سازه‌ای دیگر به ازای زلزله‌های مورد بررسی، ارائه شده است. در نمودارهای شکل ۸-الف حداکثر جابجایی در بام زیرسازه‌ی جرمی در مقایسه با قاب‌های خمشی در دو مدل دیگر

قرار می‌گیرد. این پاسخ‌ها، حداکثر پاسخ‌های حاصل از آنالیز دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی تحت اثر سه شتاب‌نگاشت انتخابی می‌باشند.

۳-۱- مقایسه پاسخ جابجایی‌های نسبی (دریفت)

از بین پاسخ‌های مختلف سازه‌ای، جابجایی نسبی طبقات (دریفت) دارای بیشترین اهمیت در طراحی است. در جدول ۲، بیشینه‌ی دریفت در دو زیرسازه‌ی سیستم پیشنهادی همراه با مقادیر حداکثر دریفت در اجزای متناظر در دو مدل سازه‌ای دیگر تحت اثر زلزله‌های مورد بررسی، ارائه شده است. در این جدول بیشینه‌ی دریفت‌ها برای سه سیستم مورد بررسی برحسب متر، آمده است و همچنین مقادیر ارائه شده در داخل پرانتزها درصد کاهش یا افزایش پاسخ‌ها را نسبت به ساختمان پایه (سیستم دوگانه، شکل ۴-الف) نمایش می‌دهد، که علامت منفی نشان‌دهنده کاهش است. از مقایسه اعداد در این جدول مشاهده می‌گردد که سیستم پیشنهادی بالاترین راندمان در کاهش پاسخ‌های دریفت در بین سیستم‌های متداول مورد بررسی را دارا می‌باشد. میانگین کاهش پاسخ دریفت در سیستم پیشنهادی و در زیرسازه‌ی جرمی (قاب خمشی) برابر ۴۰/۰۴ درصد کاهش نسبت به سازه‌ی پایه بوده و این مقدار کاهش در زیرسازه سختی (دیواربرشی) برابر ۴۲/۰۵ درصد بوده است.

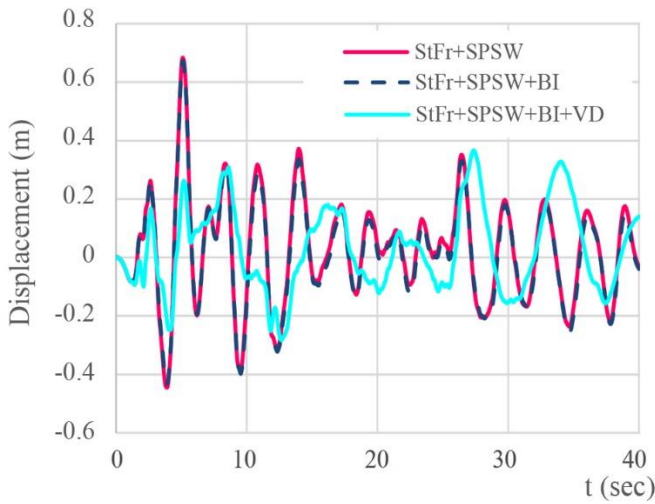
جدول ۲- حداکثر دریفت طبقات در مدل‌های مورد مقایسه، متر

زیر سسین تم	زلزله‌ها	مدل‌ها		
		StFr+SPSW	StFr+SPSW+BI	StFr+SPSW+BI+VD
قاب خمشی	Elcentro	0.082	0.077 (-6.30)	0.042 (-49.33)
	Northridge	0.069	0.066 (-3.42)	0.045 (-34.02)
	Tabas	0.076	0.071 (-6.53)	0.048 (-36.77)
دیوار برشی	Elcentro	0.089	0.084 (-6.00)	0.048 (-46.74)
	Northridge	0.083	0.081 (-2.92)	0.050 (-40.37)
	Tabas	0.073	0.071 (-3.19)	0.045 (-39.05)

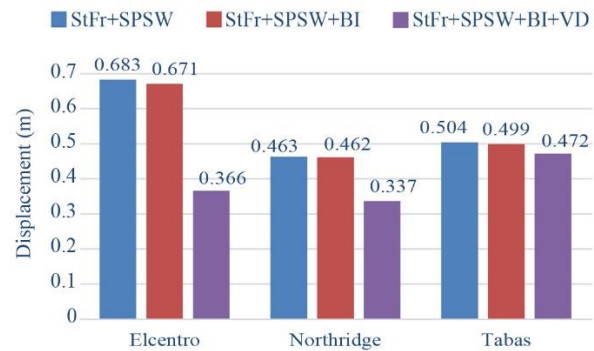
برای داشتن تصویر بهتری از کارایی سیستم ترکیبی پیشنهادی در کاهش حداکثر دریفت‌ها و به منظور مقایسه‌ی آنها با دو سیستم دیگر، تحت اثر زلزله‌های مورد بررسی، شکل ۷ ارائه شده است. در نمودارهای شکل ۷-الف حداکثر دریفت‌ها در زیرسازه‌ی جرمی

ارائه شده است. در شکل ۹-الف نمودارهای تاریخچه‌ی زمانی جابجایی در بام زیرسازه‌ی جرمی در مقایسه با قاب‌های خمشی در دو مدل دیگر و در شکل ۹-ب نمودارهای تاریخچه‌ی زمانی جابجایی در بالای زیرسازه سختی در مقایسه با دیوارهای برشی در دو مدل دیگر آورده شده است.

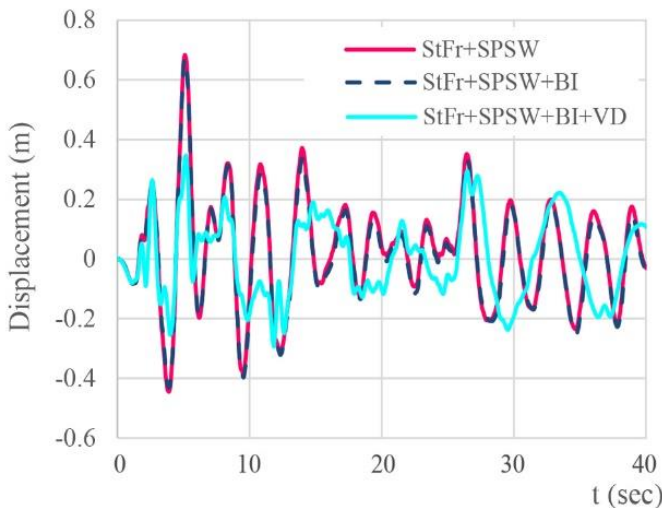
و در نمودارهای شکل ۸-ب حداکثر جابجایی در بالای زیرسازه سختی در مقایسه با دیوارهای برشی در دو مدل دیگر آورده شده است. همانگونه که از نتایج ارائه شده در این نمودار مشاهده می‌گردد سیستم پیشنهادی دارای بالاترین راندمان در کاهش پاسخ جابجایی بیشینه در بین سیستم‌های مورد بررسی می‌باشد. میانگین کاهش پاسخ جابجایی در سیستم پیشنهادی و در زیرسازه‌ی جرمی (قاب‌خمش) برابر ۲۶/۷۲ درصد کاهش نسبت به سازه‌ی پایه بوده و این مقدار کاهش در زیرسازه سختی (دیواربرشی) برابر ۲۹/۳۶ درصد بوده است.



شکل ۹-الف- نمودارهای جابجایی در بام قاب خمشی

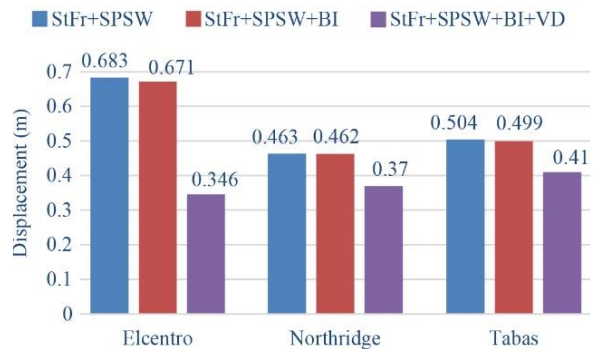


شکل ۸-الف- حداکثر جابجایی در بام زیرسازه‌ی قاب خمشی



شکل ۹-ب- نمودارهای جابجایی در بالای دیواربرشی

شکل ۹- نمودارهای تاریخچه‌ی زمانی جابجایی‌ها در بالای زیرسازه‌های مدل‌های مورد بررسی، متر



شکل ۸-ب- حداکثر جابجایی در بالای زیرسازه‌ی دیواربرشی

شکل ۸- حداکثر جابجایی در بالای زیرسازه‌های مدل ترکیبی پیشنهادی در مقایسه با سایر مدل‌ها، متر

در شکل ۹، به‌منظور درک بهتر رفتار مدل ترکیبی پیشنهادی در کاهش پاسخ سازه‌ها، نمودارهای تاریخچه زمانی پاسخ جابجایی‌های نقاط کنترلی (بام قاب‌خمش و بالای دیواربرشی) در مقایسه با نقاط متناظر در دو مدل دیگر تحت اثر زلزله ال سنترو

۳-۳- مقایسه برش‌های پایه

بیشینه‌ی پاسخ برش‌های پایه برای سه مدل مورد بررسی جهت مقایسه در جدول ۳ آمده‌است. کاهش قابل توجه برش پایه در سیستم ترکیبی پیشنهادی نشان دهنده‌ی کارایی بسیار موثر آن، در مقایسه با سایر مدل‌های مورد بررسی با مشخصات مشابه (با میانگین ۵۱/۴۵ درصد کاهش نسبت به مدل پایه)، می‌باشد.

جدول ۳ - بیشینه برش پایه در مدل‌های مورد مقایسه، کیلونیوتن

زلزله‌ها	مدل‌ها		
	StFr+SPSW	StFr+SPSW+BI	StFr+SPSW+BI+VD
Elcentro	3753.53	3463.76 (-7.72)	1921.83 (-48.80)
Northridge	2645.26	2589.71 (-2.10)	1185.71 (-55.18)
Tabas	2439.03	2356.35 (-3.39)	1210.51 (-50.37)

۴-۳- بررسی سایر پاسخ‌ها

باتوجه به نقش کلیدی جداسازهای پایه و همچنین میراگر ویسکوز در کارایی سیستم ترکیبی پیشنهادی، به‌منظور تکمیل روند بررسی پاسخ‌ها، در این بخش مقدار جابجایی حداکثر جداسازهای پایه و مقدار تغییر طول حداکثر در میراگرو ویسکوز رابط (اتصال دهنده‌ی زیرسازه‌ها) ارائه می‌گردد. حداکثر جابجایی مشاهده شده در جداسازهای پایه در طی اعمال زلزله‌های ال سنترو، نورث ریج و طیس به ترتیب برابر ۰/۲۳۷، ۰/۱۸۹ و ۰/۲۹۸ متر بوده است. همچنین در طی تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی انجام شده، تحت اثر زلزله‌های اعمالی، حداکثر تغییر طول کششی میراگرو ویسکوز برابر ۰/۱۹ متر و حداکثر تغییر طول فشاری آن برابر ۰/۳۰ متر حاصل شده است.

۴- تاثیر طول و سختی نسبی دیوار برشی بر کارایی سیستم پیشنهادی

یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر کارایی سیستم ترکیبی پیشنهادی طول کلی دیوار برشی (زیرسیستم سختی) و یا بطور دقیق‌تر نسبت سختی آن به قاب خمشی (زیرسیستم جرمی) می‌باشد. به منظور بررسی این تاثیرات مدل ترکیبی پیشنهادی تحت اثر سه شتاب‌نگاشت معرفی شده، به‌ازای پنج طول متفاوت برای دیوار برشی و با میرایی ۴۰۰ KN.s/m برای میراگر

ویسکوز، مورد تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گرفتند و میزان دررفت حداکثر زیرسازه‌های آن در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- الف - حداکثر جابجایی بالای دیواربرشی فولادی در مدل پیشنهادی، m

طول دیواربرشی	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
نسبت سختی دیواربرشی	6.06	9.50	12.74	17.76	18.08
Elcentro	0.456	0.416	0.327	0.374	0.681
Northridge	0.365	0.372	0.371	0.369	0.675
Tabas	0.619	0.562	0.442	0.369	0.842

جدول ۴- ب - حداکثر جابجایی بام قاب خمشی فولادی در مدل پیشنهادی، m

طول دیواربرشی	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
نسبت سختی دیواربرشی	6.06	9.50	12.74	17.76	18.08
Elcentro	0.411	0.389	0.375	0.351	0.627
Northridge	0.338	0.345	0.336	0.337	0.485
Tabas	0.623	0.584	0.488	0.452	0.879

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش بیش از حد طول دیواربرشی (بیش از ۲/۵ متر) در مدل مورد بررسی نه‌تنها کارایی سیستم را افزایش نمی‌دهد بلکه منجر به افزایش دررفت ماکزیمم در زیرسازه‌ها می‌گردد. در اینحالت سختی دیواربرشی آنقدر زیاد است که اندرکنش آن با قاب خمشی فولادی در کاهش پاسخ‌ها بسیار ناچیز است. از طرف دیگر همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کاهش بیش از حد طول دیوار برشی (کمتر از ۲/۰ متر) در مدل مورد بررسی نیز منجر به افزایش دررفت ماکزیمم و کاهش کارایی سیستم می‌گردد. در این حالت دیواربرشی سختی کافی برای کنترل قاب خمشی (مجهز به جداسازپایه) متصل به آن را ندارد. حداکثر پاسخ دررفت در دو زیرسازه‌ی جرمی (قاب خمشی) و زیرسازه‌ی سختی (دیواربرشی) در مدل مورد بررسی، در محدوده‌ی طول دیوار برشی بین ۲/۰ الی ۲/۵ متر دارای کمترین مقدار می‌باشد. در تحلیل‌های ارائه شده‌ی بخش‌های گذشته طول هرکدام از دو دیواربرشی در مدل پیشنهادی برابر با ۲/۲ متر در نظر گرفته شده بود. در مثال تحلیلی ارائه شده، تاثیر مشخصات دیوار برشی فولادی بر کارایی مدل ترکیبی پیشنهادی و امکان

مراجع

- [1] Klein RE, Cusano C, Stukel JJ. Investigation of a method to stabilize wind-induced oscillations in large structures. *Mechanical Engineering*. 1972; 95(2): 53-62.
- [2] Gurley K, Kareem A, Bergman LA, Johnson EA, Klein RE. Coupling tall buildings for control of response to wind. *Proceedings of the Sixth International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR)*; 1994; Balkema Publishers, Rotherdam.
- [3] Luco JE, Wong HL. Control of the seismic response of adjacent structures. *Proceedings of the 1st World Conference on Structural Control*; 1994; Pasadena, Calif.
- [4] Kamagata K, Miyajima K, Seto K. Optimal design of damping devices for vibration control of parallel structures. *Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC)*; 1996; Chiba, Japan.
- [5] Fukuda Y, Matsumoto Y, Seto K. Bending and torsional vibration control of flexible structures arranged in parallel. *Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC)*; 1996; Chiba, Japan.
- [6] Xu YL, He Q, Ko JM. Dynamic response of damper-connected adjacent buildings under earthquake excitation. *Engineering Structures*. 1999; 21(2): 135-148.
- [7] Christenson RE, Spencer BFJr, Johnson EA, Seto K. Coupled building control considering the effects of building/connector configuration. *Journal of Structural Engineering*. 2006; 132(6): 853-863.
- [8] Fathi F, Bahar O. Hybrid Coupled Building Control. *Proceedings of the 6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE6)*; 2011; IIEES, Tehran, Iran.
- [9] Fathi F, Bahar O. Hybrid Coupled Building Control (HCBC), the Effects of Actuator Position. *Journal of Seismology & Earthquake Engineering (JSEE)*. 2012; 14(2): 145-159.
- [10] Fathi F, Bahar O. Hybrid Coupled Building Control for Similar Adjacent Buildings. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2017; 21(1): 265-273.
- [11] Chen Y, Ying Z, Shen G. Exact solution of free vibration of adjacent buildings interconnected by visco-elastic dampers. *Theoretical & Applied Mechanics Letters*. 2020; 10(1): 132-140.
- [12] Palermo M, Silvestri S. Damping reduction factors for adjacent buildings connected by fluid-

بهینه‌سازی پارامترهای دیوار برای حصول بهترین راندمان، قابل مشاهده است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل ترکیبی جدید با ایده‌ی استفاده‌ی توأم از تکنیک‌های جداسازی پایه افقی و جداسازی جرمی قائم، همراه با به‌کارگیری ادوات میراگر رابط، به‌منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های خمشی فولادی ارائه شده و کارایی و عملکرد سیستم ترکیبی پیشنهادی با انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی، تحت اثر مولفه‌های افقی شتاب زلزله‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده بر روی مدل مورد بررسی نشان‌دهنده‌ی کاهش قابل توجه بیشینه‌ی پاسخ‌های زیرسازه‌های سیستم ترکیبی پیشنهادی شامل جابجایی‌های نسبی طبقات (دریفت)، جابجایی‌های بام و برش پایه‌ی آن‌ها، در مقایسه با اجزای متناظر در دیگر مدل‌های سازه‌ای با مشخصات مشابه بوده است.

براساس نتایج حاصل از تحلیل مدل ارائه شده، میانگین کاهش پاسخ بیشینه‌ی دریفت در سیستم ترکیبی پیشنهادی و در زیرسازه‌ی جرمی در حدود ۴۰ درصد و این مقدار کاهش در زیرسازه سختی در حدود ۴۲ درصد بوده است. میانگین کاهش پاسخ بیشینه‌ی جابجایی در سیستم ترکیبی پیشنهادی در زیرسازه‌ی جرمی در حدود ۲۷ درصد و این مقدار کاهش در زیرسازه سختی در حدود ۲۹ درصد حاصل شده است. همچنین تحلیل‌ها نشان‌دهنده‌ی میانگین کاهش پاسخ بیشینه‌ی برش پایه در سیستم ترکیبی پیشنهادی نسبت به مدل پایه در حدود ۵۱ درصد بوده است.

از امکانات ارزشمند مدل ارائه شده امکان بهینه‌سازی پارامترهای موثر در طراحی آن به‌منظور حصول بالاترین کارایی در کاهش پاسخ‌های آن می‌باشد. بعنوان نمونه، دو پارامتر بسیار تاثیرگذار در کارایی سیستم پیشنهادی شامل مشخصات میراگر ویسکوز اتصال دهنده‌ی دو زیرسیستم و همچنین سختی نسبی دو زیرسیستم است، که طی مثال عددی ارائه شده مقادیر بهینه این دو پارامتر تعیین و نتایج حاصل از تغییر این پارامترها نیز ارائه گردید.

viscous dampers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020; 138(1).

[13] Ziyaeifar M, Noguchi H. Partial Mass Isolation in Tall Buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*. 1998; 27(1): 49-65.

[14] Nekooei M, Ziyaeifar M. Vertical Seismic Isolation of Structures. *Journal of Applied Science*. 2008; 8(1): 4656-4661.

[15] Milanchian R, Hosseini M, Nekooei M. Vertical Seismic Isolation by Viscous and Visco-Elastic Dampers Based on Different States Performance for Response Reduction. *Bulletin of earthquake science and engineering*. 2018; 5(2): 91-104.

[16] Nekooei M, Rahgozar N, Rahgozar N. Vertical seismic isolated rocking-core system. *Structures and Buildings*. 2021; 174(8): 627-636.

[17] Guidelines for Design and Implementation of Seismic Isolation Systems in Buildings. Office of the Technical Executive Order, ISSUE 523. 2010; Iran.

16] Nekooei M, Rahgozar N, Rahgozar N. Vertical seismic isolated rocking-core system. *Structures and Buildings*. 2021; 174(8): 627-636.

[17] Guidelines for Design and Implementation of Seismic Isolation Systems in Buildings. Office of the Technical Executive Order, ISSUE 523. 2010; Iran.

Evaluation of the Simultaneous Application of Vertical and Horizontal Mass Isolation Techniques in the Moment Steel Frame Structures

Noosheen Ghorbani

MSc., Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University,
Najafabad, Iran

Farshid Fathi*

Faculty Member, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad
University, Najafabad, Iran,
f-fathi@iaun.ac.ir

Abstract:

In the recent decades, many efforts have been made to reduce the damages caused by strong earthquakes to the structural and non-structural systems of buildings utilizing various methods of seismic control of structures (active and passive). One of the most common passive seismic control systems is the horizontal isolation of buildings at their base level or base isolation. Another type of seismic isolation system, which is called vertical mass isolation and has been proposed in recent years, tries to separate the stiffness system and mass sub-system of the structures in some way. In this research, the more efficient Simultaneous application of the horizontal base isolation together with the vertical mass isolation techniques, along with the use of a damping devices (such as viscous dampers), to improve the seismic performance of moment steel frame structures, has been investigated. For this purpose, the performance of the proposed hybrid system was evaluated by performing nonlinear time history dynamic analysis under the horizontal component of earthquake acceleration records. The results of the analysis obviously presented significant reductions in the maximum seismic responses of the studied structures especially for displacements, drifts and base shears compared to those responses of the other types of conventional structural systems with similar characteristics.

Keywords: vertical mass isolation, horizontal base isolation, seismic control of structures, moment steel frame, nonlinear time history analysis, base isolation