تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۱

فصلنامه علمی علوم و مهندسی زلزله
سال یازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۳

DOI: 10.48303/bese.2024.2016521.1145

نوع مقاله: پژوهشی

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سیستم جداسازی نما در ساختمان‌های بلند

علی معین‌الدینی
دانشجوی دکتری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

منصور ضیایی‌فر (نویسنده مسئول)
دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، mansour@iiees.ac.ir

مسعود نکویی
استادیار، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده
از دیدگاه مهندسی سازه طراحی نمای ساختمان در برابر بارهای لرزه‌ای و یا بار باد درسازه‌های بلند به دلیل رفتار ترد و مقاومت کششی محدود مصالح به کار رفته در چیدمان نما دارای اهمیت است. با توجه به اینکه در ساختمان‌های متداول نمای سازه مستقیماً به بدنه اصلی سازه متصل است، بنابراین تغییر شکل‌های سازه می‌تواند سبب ایجاد خسارت به نمای ساختمان شود. رویکرد اصلی این تحقیق جداسازی پوسته خارجی سازه از بدنه اصلی آن و استفاده از اینرسی جرمی این بخش از ساختمان برای کاستن از دامنه تغییر مکانی سازه و کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای سازه و خصوصاً نما می‌باشد. در این تحقیق از یک مدل عددی دو بعدی برای مطالعه سیستم جداسازی نما استفاده گردیده و روابط تحلیلی مربوط به آن ارائه شده است. مدل ارائه شده برای یک ساختمان ۱۵ طبقه با سه ترکیب مختلف نصب نما به سازه اصلی به‌کار گرفته شده و نتایج حاصله با نتایج به‌دست آمده برای همان سازه با سیستم نمای متداول مقایسه گردیده است. این نتایج نشان می‌دهد که نما به عنوان یک بخش یکپارچه از سیستم سازه‌ای عمل نموده و نه تنها عملکرد لرزه‌ای ساختمان را بهبود می‌بخشد، بلکه احتمال شکستگی و ریزش مصالح نما را در زمان وقوع زلزله کاهش می‌دهد.

واژگان کلیدی: جداسازی نما، جداسازی جرمی جزئی، نمای دوپوسته‌ای، کنترل سازه‌ها، سازه‌های بلند.

۱- مقدمه

ساختمان‌های بلند به‌عنوان راه‌حلی مطلوب برای کلان‌شهرهای پرجمعیت برای افزایش تراکم مسکونی شهرها بدون اشغال فضاهای مورد نیاز، در مناطق شهری در نظر گرفته می‌شوند. پیشرفت در مواد با مقاومت بالا، رویکردهای طراحی سازه و فن‌آوری‌های ساخت‌وساز به طراحی ساختمان‌های بلند کمک شایانی کرده است. با این حال، طراحی ساختمان‌های بلند به دلیل تقاضای غیرقابل انکار برای سطح عملکرد لرزه‌ای بالاتر در چنین ساختمان‌هایی، هنوز یک چالش پیچیده در نظر گرفته می‌شود. افزایش مقاومت و سختی یک ساختمان ممکن است همیشه به‌عنوان یک انتخاب مناسب برای ارائه عملکرد لرزه‌ای بالاتر در نظر گرفته نشود. این روش‌ها در طراحی سیستم‌های سازه‌ای نه‌تنها بر هزینه‌های ساختمان‌ها می‌افزاید، بلکه باعث زوال برخی از پاسخ‌های سازه‌ای ساختمان در هنگام زلزله می‌گردد. در این میان انواع روش‌های جدید در طراحی لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای مبتنی بر افزایش انعطاف‌پذیری و قابلیت اتلاف انرژی ساختمان است. در این رویکردها با توجه به کاهش سطح نیروهای جانبی القایی بر سیستم سازه، بهبود قابل توجهی در عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها انتظار می‌رود. ایده کنترل سازه در این دیدگاه قرار می‌گیرد که به‌صورت یک روش عملی برای مقابله با بارهای جانبی ناشی از باد و زلزله مورد استفاده قرار گرفته است. در این بین سیستم‌های کنترلی غیرفعال به دلیل ساده بودن، هزینه نسبتاً کم و عدم نیاز به انرژی خارجی کاربرد عملی بیشتری پیدا کرده‌اند. در حالت کلی می‌توان سیستم‌های کنترل غیرفعال را به دو دسته سیستم‌های جداسازی و اتلاف انرژی تقسیم نمود (Housner et al., 1997).

جداسازی پایه، تکنیکی شناخته شده در طراحی لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای است که اثرات زلزله بر ساختمان‌های ارتفاع کم تا متوسط را کاهش می‌دهد (Naeim & Kelly, 1999). در این رویکرد، انعطاف‌پذیری سیستم سازه‌ای با قرار دادن یک لایه جداسازی با سختی کم در پایه ساختمان چند برابر می‌شود. همچنین لایه جداسازی در این تکنیک دارای پتانسیل اتلاف انرژی بالایی است تا بتواند جابه‌جایی جانبی ساختمان را در هنگام زلزله کاهش دهد. در ادامه تحقیقات این بحث مطرح گردید که لایه جداسازی لزوماً در پایه سازه قرار داده نشود. در واقع، ازآنجایی‌که جرم ساختمان سبب ایجاد نیروی زلزله و تغییر شکل در یک سیستم سازه‌ای را بر عهده دارد، پیشنهاد می‌شود بر روی جرم سازه به‌عنوان هدف اصلی جداسازی تمرکز شود. مفهوم جداسازی جرمی می‌تواند برای توسعه سازه‌های انعطاف‌پذیر با میرایی بالا و عملکردهای سازه‌ای برجسته تحت بارهای لرزه‌ای استفاده شود (Ziyaeifar et al., 2011; Ziaeifar, 2002). این که بتوان تمامی جرم ساختمان را از سیستم سختی جانبی آن جدا نمود غیرممکن خواهد بود، با این وجود راه‌حل‌های مناسبی برای اینکه بتوان مقدار عمده‌ای از جرم سیستم را جداسازی نمود وجود دارد. با استفاده از این ایده و به‌جای جداسازی کل جرم یک ساختمان بلند در پایه آن، می‌توان تنها بخشی از جرم آن را از سیستم سازه اصلی جدا کرد تا نیروی ناشی از زلزله و جابه‌جایی روی ساختمان کاهش یابد. این رویکرد جداسازی جرم جزئی نامیده شده است (Ziyaeifar & Noguchi, 1998).

در این تحقیق جداسازی نمای پیرامون ساختمان از سازه اصلی با استفاده از ایده جداسازی جرمی جزئی مورد توجه قرار گرفته است. پوسته ساختمان به‌عنوان جداکننده فضای داخلی و محیط خارجی ساختمان، نقش مهمی در رفتار ساختمان دارد. این بخش از ساختمان به‌عنوان مهم‌ترین منبع دریافت نور و انرژی خورشیدی، گرمایش و سرمایش، تهویه تعمدی و ناخواسته، کنترل نوفه‌های صوتی و کیفیت طراحی و اجرا و ابعاد زیبایی‌شناسی تأثیر قابل توجهی در میان سایر اجزای ساختمان دارد. با توجه به تنوع اقلیمی و قرارگیری بخش قابل توجهی از کشور در مناطق دارای خطر لرزه‌ای بالا و باد شدید، طراحی نماهای ساختمانی برای انواع ترکیب‌های بارگذاری شامل باد و زلزله دارای اهمیت بسیاری است. با توجه به اینکه نما در پیرامون ساختمان همانند یک پوسته خارجی با جرم زیاد سازه را در بر گرفته است می‌توان با استفاده از ابزارهای کنترلی شامل جداسازهای لرزه‌ای و میراگرها ضمن افزایش میرایی سیستم از اثر عکس‌العمل جرمی آن نسبت به سازه جهت کنترل پاسخ سازه استفاده نمود. همچنین علاوه بر بهبود رفتار سازه می‌توان تأثیر سیستم جداسازی در کاهش تغییر شکل نما و شکست ترد مصالح در پیرامون سازه را در نظر گرفت.

در تحقیقات صورت گرفته بیشتر قاب نما را به‌صورت یک جداره بیرونی خارج از قاب سازه در نظر گرفته‌اند. نمای دو پوسته‌ای یکی از بهترین نماها به دلیل فاصله پوسته دوم از سازه اصلی برای این‌گونه عملکرد است. استفاده از نما جهت بهبود پاسخ سازه در ابتدا توسط مون در سال ۲۰۰۹ (Moon, 2009) و با استفاده از جرم نما و اتصال آن با میراگرهایی با سختی محوری کم به سازه و در نظر گرفتن کل سیستم به‌عنوان میراگر جرمی تنظیم‌شونده صورت گرفته و سپس توسط فو و جانسون در سال ۲۰۱۱ (Fu & Johnson, 2011) بررسی آن ادامه یافت. در اکثر تحقیقات ارائه شده نمای پیرامونی ساختمان به‌عنوان میراگر جرمی تنظیم شونده توزیع شده در ارتفاع سازه در نظر گرفته شده است (Pipitone et al., 2017; Moon, 2015). نتایج حاصل از تحقیقات نشان از عملکرد مناسب نما به‌عنوان یک سیستم کنترلی غیرفعال در کنترل پاسخ سازه و در مقایسه با میراگر جرمی تنظیم شونده مرسوم دارد. جهت بهبود عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شونده سیستم‌های کنترلی فعال و نیمه فعال نیز برای نما در نظر گرفته شد که سبب بهبود پاسخ سازه گردید (Fu & Johnson, 2014). به دنبال تحقیقات عددی صورت گرفته، نمونه آزمایشگاهی نمای ساختمان به‌عنوان میراگر جرمی تنظیم شونده گسترده نیز در نظر گرفته شد که نتایج حاصل از آن با مطالعات عددی مطابقت داشت (Fu & Zhang, 2016). در ادامه جهت بررسی دقیق‌تر، مدل‌های تحلیلی سه‌بعدی نیز

مورد توجه قرار گرفت. در این مقالات بیشتر تمرکز در استفاده از خاصیت پلاستیک شدن و تسلیم اتصال‌دهنده‌های نما به سازه اصلی تحت اثر نیروهای باد و زلزله بوده است (Azad, 2016; Samali & Abtahi, 2016). همچنین در بحث استفاده از ابزارهای کنترلی جایگزین اتصالات صلب، در تحقیقی استفاده از اتصالات ویسکو الاستیک برای اتصال نمای یک ساختمان چهار طبقه با استفاده از مدل اجزای محدود انجام شده است. نتایج ارائه شده نشان از کاهش پاسخ سازه و تغییر شکل‌های نما داشت (Bedon, 2018).

در این مطالعه، روش جدیدی به‌عنوان سیستم جداسازی نما با استفاده از اتصال پوسته خارجی نما به‌وسیله ترکیبی از جداسازهای لرزه‌ای و میراگرها مورد نظر قرار گرفته است. هدف اصلی در این روش جداسازی نمای ساختمان یا بخشی از نمای ساختمان به‌عنوان یک قاب دارای سختی و جرم از سازه اصلی می‌باشد. با توجه به جرم قابل توجه نمای ساختمان، اثر عکس‌العمل جرمی نما و همچنین افزایش میرایی سازه اصلی می‌تواند در کنترل حرکت آن در برابر باره‌ای لرزه‌ای مؤثر باشد.

۲- مفهوم جداسازی نما

در ساختمان‌های بلند، سیستم نما معمولاً با استفاده از براکت‌ها و اتصالات پیچ و مهره‌ای به سیستم سازه اصلی متصل می‌شود. در زمان وقوع زلزله، حرکت سیستم نما متناسب با سازه اصلی در امتداد ارتفاع ساختمان می‌باشد. در این حالت تغییر مکان نسبی طبقات و شتاب جانبی سازه به مجموعه نما نیز منتقل شده و باعث شکستگی، جدا شدن و افتادن پانل‌های نما می‌شود. علاوه بر این، بدون حرکت نسبی بین نما و سیستم سازه، کل جرم نما به‌طور مستقیم به جرم ساختمان اضافه می‌شود و تقاضای لرزه‌ای سازه در مکانیسم مقاوم در برابر بار جانبی را افزایش می‌دهد. با این حال، جداسازی نما از سیستم سازه اصلی، دوره تناوب طولانی‌تری را برای ساختمان ایجاد کرده و میزان نیروی جانبی وارد بر سیستم سازه اصلی را کاهش می‌دهد. حرکت نسبی بین سیستم نما و سازه می‌تواند بیشتر برای اتلاف انرژی ورودی زلزله در سیستم مورد استفاده قرار گیرد. این کاهش انرژی ورودی، به نوبه خود تمام پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان از جمله سازه اصلی و سیستم نما را کاهش می‌دهد.

مشابه تکنیک جداسازی جرمی جزئی، در جداسازی نما بخشی از جرم ساختمان از سازه‌ای اصلی جدا می‌شود. اگرچه جداسازی بخشی از جرم کلی ساختمان دوره طبیعی بالاتری را برای سیستم فراهم می‌کند، اما مزیت اصلی این تکنیک توانایی آن در ارائه نسبت‌های میرایی بالا برای تمام مودهای طبیعی سیستم است (Ziyaeifar & Noguchi, 1998). چنین بهبودی در نسبت‌های میرایی ساختمان، سطح پاسخ‌های سازه‌ای سیستم را در هنگام تحریک حرکت زمین کاهش می‌دهد. از آنجایی که اتلاف انرژی در این رویکردها به‌طور مستقیم با وزن بخش جدا شده از سیستم متناسب است، در این سیستم نمای سنگین کاهش بیشتری در پاسخ لرزه‌ای سازه اصلی به ساختمان می‌دهد. استفاده از سیستم نما و اتصالات انعطاف‌پذیر در سیستم جداسازی، قابلیت آن را فراهم می‌کند که پس از بادهای شدید یا زلزله، آسیب و تغییر شکلی در مجموعه نما باقی نماند. این یک ویژگی ارزشمند برای سیستم نما است که هزینه نگهداری سیستم را در طول عمر آن کاهش می‌دهد.

۳- روش جداسازی نما

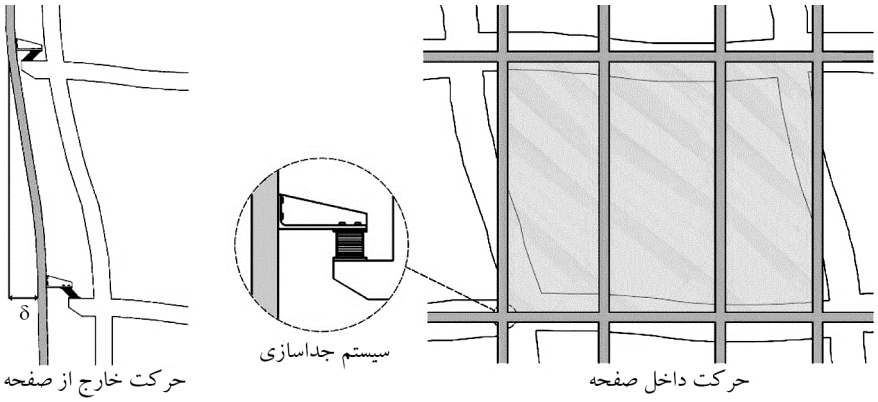
معمولاً پوسته خارجی نماهای دو پوسته‌ای شامل یک سیستم دیوار پرده‌ای با اتصالات ثابت آن به سازه اصلی می‌باشد، به‌طوری‌که حرکات جانبی سازه اصلی به قاب نما منتقل می‌گردد. ازآنجایی‌که سازه ساختمان‌ها در هنگام زلزله در معرض شتاب‌های زیاد و جابه‌جایی‌های نسبی بالا قرار می‌گیرد، طراحی سیستم نما باید متناسب با آن انجام شود. در این حالت، نما در معرض نیروی داخلی و شتاب قابل توجهی است که ممکن است منجر به شکست، خرابی و تلفات مالی و انسانی گردد.

با این حال، در سیستم جداسازی نما پوسته خارجی یک زیر سیستم سازه‌ای است که با استفاده از جداکننده‌های انعطاف‌پذیر مطابق شکل (۱) از سازه اصلی جدا شده است. این زیر سیستم باید

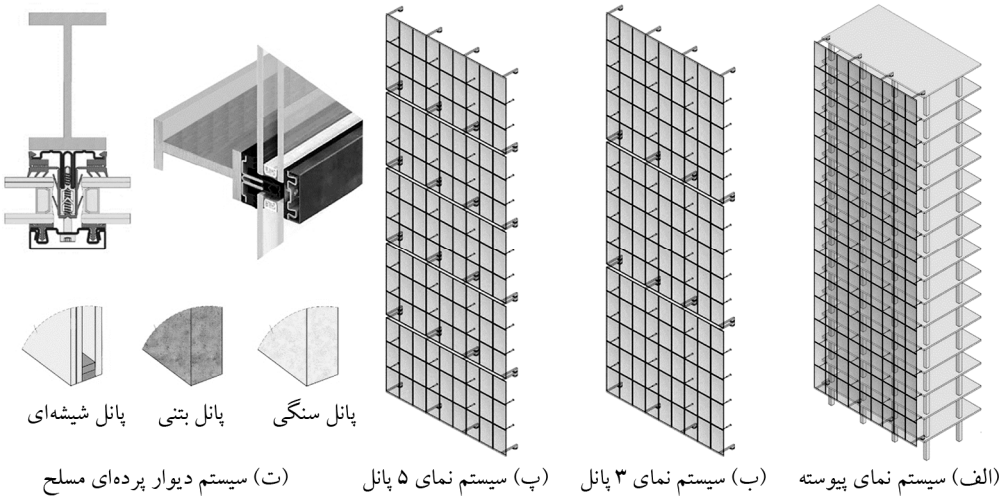
سختی لازم درون صفحه و خارج از صفحه را داشته باشد تا بتواند نیروی داخلی و تغییر شکل‌های خود در طی تحریک لرزه‌ای را کنترل کند. با این وجود، مکانیسم جداسازی به‌طور مؤثر سطح نیروی تحمیلی و تغییر شکل بر روی این زیر سیستم را کاهش می‌دهد. چنین کاهشی در تقاضاهای لرزه‌ای برای قاب نما در درجه اول به مشخصات مکانیکی جداکننده‌های انعطاف‌پذیر و تا حدودی به‌سختی جانبی قاب نما بستگی دارد (Moeinadini et al., 2023).

جهت ارائه یک کاربرد عملی برای این تکنیک در ساختمان‌های بلند، پوسته خارجی در سراسر محیط سازه به هم متصل شده است. جداره خارجی سیستم نما به‌صورت دیوار پرده‌ای تقویت شده با مقاطع فولادی در نظر گرفته شده است. به دلیل استفاده از مقاطع فولادی مطابق شکل (۲- ت) این سیستم دارای سختی داخل و خارج از صفحه مناسبی جهت کنترل سهم خود از نیروی جانبی و تغییر شکل‌ها می‌باشد. همچنین پانل‌های شیشه‌ای در این سیستم را می‌توان با پانل‌های بتنی یا سنگ طبیعی جایگزین کرد تا نسبت جرم سیستم نما را افزایش دهد.

سه ترکیب مختلف برای مونتاژ نما در ارتفاع ساختمان انتخاب شده است. در مورد اول، شکل (۲- الف)، قاب نما از بالا به پایین پیوسته است و بار ثقلی خود را در سطوح مختلف با استفاده از جداسازهای با سختی کم به سازه اصلی منتقل می‌کند. همچنین قاب نما در کنار جداسازها با استفاده از میراگرهای ویسکوز یا اصطکاکی به سازه اصلی متصل شده تا ظرفیت اتلاف انرژی مورد نیاز سیستم را تأمین کند. این چیدمان برای افزایش انعطاف‌پذیری و میرایی لایه جداسازی انتخاب شده است. در ترکیب دوم و سوم، همان‌طور که در شکل (۲- ب) و (۲- پ) نشان داده شده، سیستم نما در ارتفاع ساختمان به سه و پنج قسمت تقسیم شده است.



شکل (۱): سیستم جداسازی نما.

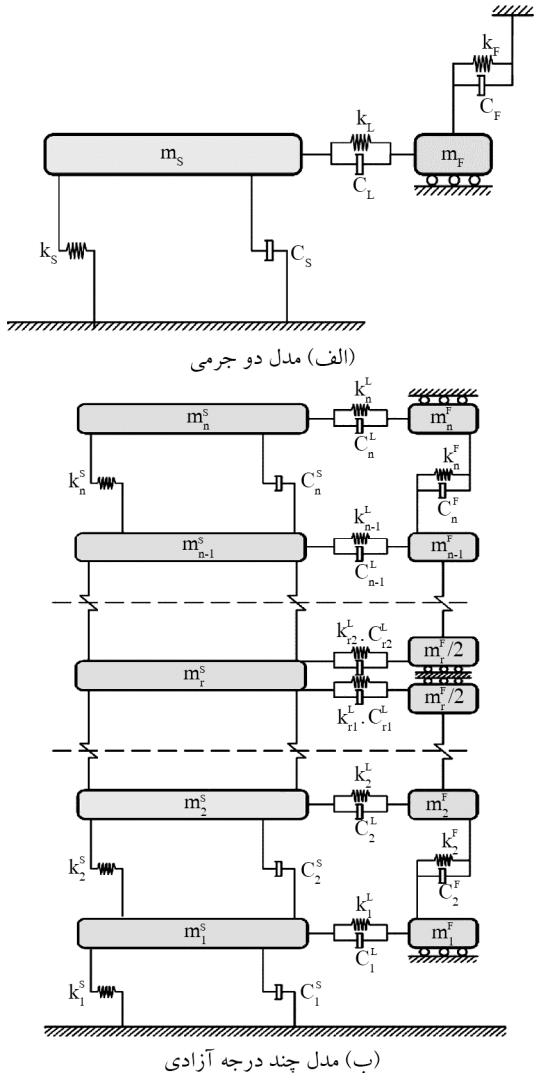


شکل (۲): سیستم جداسازی نما.

اتصالات همه این بخش‌ها به سازه‌ای اصلی مشابه ترکیب اول برای زیر سیستم نما در نظر گرفته می‌شود. این چیدمان‌ها برای مونتاژ نما جهت بررسی نقش پیوستگی نما در ارتفاع ساختمان انتخاب شده است. در صورت استفاده از جداسازهای لاستیکی با میرایی بالا، کاهش تعداد ایزولاتور در جداسازی لرزه‌ای نما برای کاهش سختی لایه جداسازی و رسیدن به یک دوره تناوب بلند در سیستم ضروری است؛ بنابراین تنها تعداد محدودی از واحدهای جداساز، نما را به سیستم سازه اصلی متصل می‌کنند و در سایر نقاط اتصال بین دو زیر سیستم می‌توان از میراگرها استفاده کرد تا نسبت میرایی بالاتری برای سیستم فراهم شود.

۴- مدل‌سازی سیستم جداسازی نما

مطالعات پارامتریک درباره نقش مشخصات سیستم جداسازی نما جهت تعیین اثربخشی این روش در فرآیند طراحی زیرسیستم‌های سازه و نما ضروری است. چنین مطالعاتی معمولاً مبتنی بر استفاده از مدل‌های ساده‌شده جهت تسریع روند تجزیه‌وتحلیل و بررسی نتایج است. تکنیک‌های جداسازی لرزه‌ای در شکل کلی خود را می‌توان با مدل‌های دو جرمی الاستیک خطی و ساده‌سازی شده نشان داد (Ziyaeifar et al., 2011). با استفاده از این مفهوم، ساده‌ترین مدل برای روش جداسازی نما در شکل (۳- الف) نشان داده شده است. سیستم سازه اصلی در این مدل با یک سیستم تک‌درجه آزادی با جرم m_S، سختی k_S و ثابت میرایی c_S نشان داده شده است. این بخش از مدل به یک سیستم تک‌درجه آزادی دیگر به‌عنوان قاب نما متصل شده است. مکانیسم اتصال در این مدل لایه جداسازی با سختی k_F و ثابت میرایی c_L است . در مدل تک‌درجه آزادی برای قاب نما، m_F جرم سیستم نما است درحالی‌که k_F و c_F به‌عنوان سختی داخلی و ثابت میرایی برای مجموعه نما در نظر گرفته می‌شود. در مدل دو جرمی ارائه شده برای سیستم جداسازی نما، سختی داخلی و ثابت میرایی برای زیر سیستم نما باید با استفاده از ویژگی‌های نما در ارتفاع ساختمان برآورد شود.



شکل (۳): مدل ساده جداسازی نما.

معادله تعادل برای مدل فوق تحت تحریک حرکت زمین مطابق رابطه (۱) است.

$$\begin{cases} m_S\ddot{u}_S + c_S\dot{u}_S - c_L\left(\dot{u}_F - \dot{u}_S\right) + k_S u_S - \ldots \\ m_F\ddot{u}_F + c_F\dot{u}_F + c_L\left(\dot{u}_F - \dot{u}_S\right) + k_F u_F + \ldots \end{cases} \quad (۱)$$

$$k_L\left(u_F - u_S\right) = -m_S\ddot{u}_g$$
$$k_L\left(u_F - u_S\right) = -m_F\ddot{u}_g$$

که در آن $\ddot{u}_g$ شتاب زمین است. علاوه بر این، u_S و u_F جابه‌جایی‌های سازه اصلی و زیر سیستم نما (نسبت به زمین) هستند. مجموعه معادلات فوق را می‌توان به‌صورت ماتریسی نوشت.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M\ddot{u}_g \quad (۲)$$

به‌طوری‌که

$$M=\begin{bmatrix} m_S & 0 \\ 0 & m_F \end{bmatrix},\ K=\begin{bmatrix} k_S+k_L & -k_L \\ -k_L & k_F+k_L \end{bmatrix},\ C=\begin{bmatrix} c_S+c_L & -c_L \\ -c_L & c_F+c_L \end{bmatrix} \quad (۳)$$

تمام پارامترهای سیستم در معادله اول را می‌توان با استفاده از یک مدل تک‌درجه آزادی معادل که نمونه‌ای از اولین مود طبیعی سازه اصلی است استخراج کرد. با این حال، تعریف پارامترهای سیستم برای معادله دوم در فرمول بالا که الزامات پیوستگی مونتاژ نما در ارتفاع آن در نظر می‌گیرد، یک چالش است. اگر این پارامترها صفر فرض شوند، نقش انعطاف‌پذیری نما و اتلاف انرژی در ارتفاع ساختمان نادیده گرفته می‌شود. از سوی دیگر، بررسی تغییر مکان‌های جانبی و شتاب قاب نما در طول ارتفاع آن می‌تواند به‌عنوان نگرانی اصلی در ارزیابی روش جداسازی نما در ساختمان‌های بلند در نظر گرفته شود. در این راستا، مدل چند جرمی جداسازی نما، مطابق شکل (۳-ب)، مورد نیاز است. در این مدل، اندیس r شماره طبقه‌ای را نشان می‌دهد که در آن قاب نما پیوسته نیست و دو بخش نما به‌صورت مجزا به یک طبقه متصل هستند. اندیس‌های r_1 و r_2 برای نشان دادن خواص مکانیکی لایه جداساز به ترتیب در بخش‌های پایین و بالایی متصل به طبقه rام استفاده می‌شوند. هر بخش از سیستم نما به‌صورت یک قاب برشی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، ماتریس‌های جرم M، سختی K و میرایی C برای آنها با استفاده از خواص مکانیکی هر یک قابل ایجاد است. ماتریس میرایی برای هر بخش نما نیز متناسب با ماتریس سختی آن فرض می‌شود. مدل‌های سازه‌ای اصلی و سیستم نما در نقاطی به‌عنوان لایه جداسازی به یکدیگر متصل شده‌اند. در این نقاط، خواص مکانیکی لایه جداسازی به سیستم اضافه شده و مدل نهایی متشکل از سازه اصلی، قاب نما و لایه جداساز ایجاد می‌شود. مدل فوق با واحدهای جداساز در تمام طبقات، نشان‌دهنده آرایش یکنواخت برای اجزای لایه جداساز در امتداد ارتفاع ساختمان است که به‌اصطلاح به فناوری جداساز با سختی کم که قبلاً توضیح داده شد نیاز دارد. ماتریس‌های سیستم جداسازی نما برای مدل چند درجه آزادی با n طبقه، p قسمت نما و $m=n+(p-1)$ واحدهای جداساز در نقاط اتصال به شرح زیر نوشته می شوند.

$$M=\begin{bmatrix} M_S & 0 \\ 0 & M_F \end{bmatrix}_{(n+m)\times(n+m)}$$

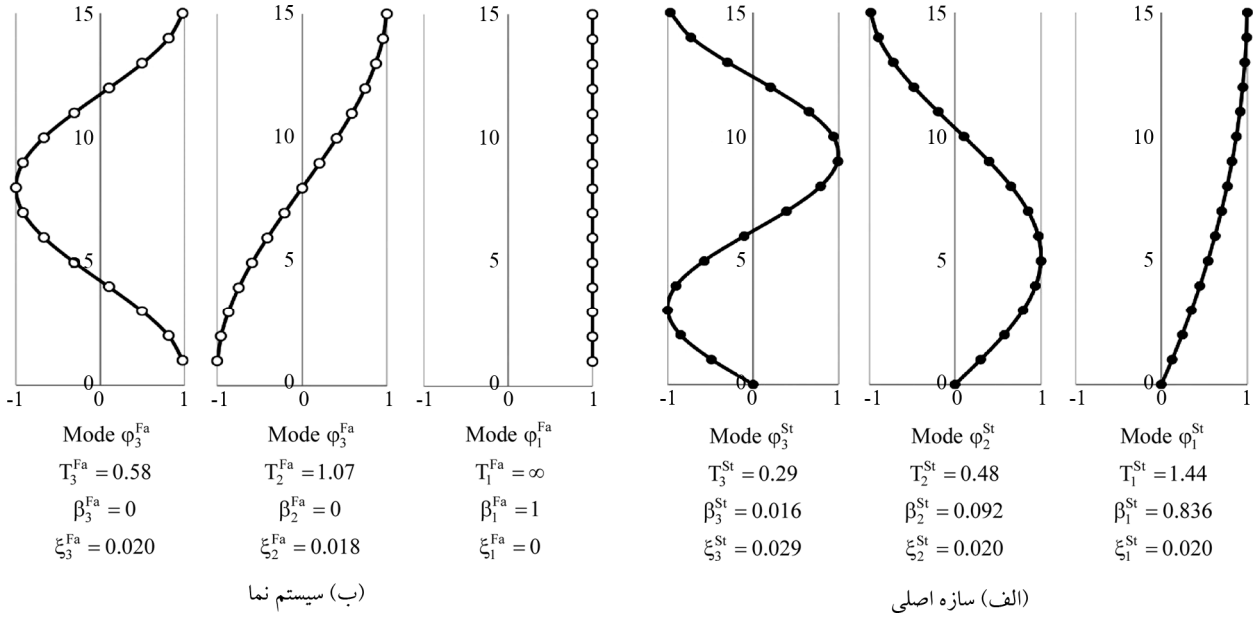
$$K=\begin{bmatrix} K_S & -K_{SF} \\ -K_{SF}^T & K_F \end{bmatrix}_{(n+m)\times(n+m)} \quad (۴)$$

$$C=\begin{bmatrix} C_S & -C_{SF} \\ -C_{SF}^T & C_F \end{bmatrix}_{(n+m)\times(n+m)}$$

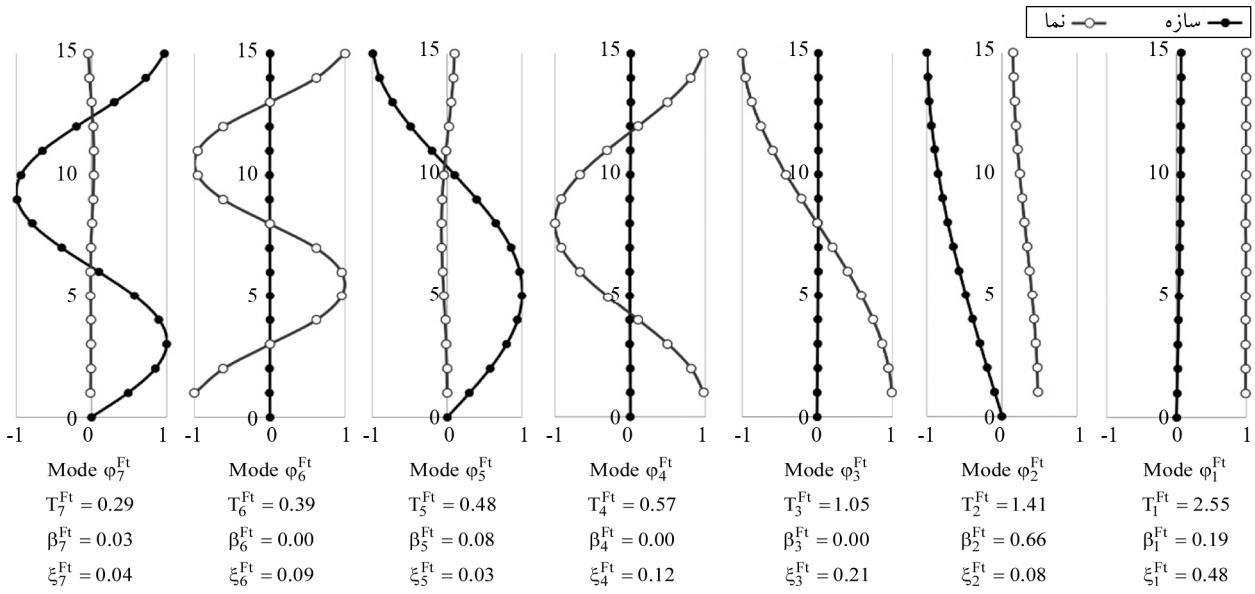
در روابط فوق M_S، K_S و C_S به ترتیب ماتریس جرم، سختی و میرایی مربوط به سازه اصلی و M_F، K_F و C_F ماتریس جرم، سختی و میرایی مربوط به سیستم نما می‌باشند. همچنین K_{SF} و C_{SF} ماتریس‌های سختی و میرایی لایه جداسازی می‌باشند.

۵- ویژگی‌های دینامیکی سیستم جداسازی نما

مشخصات سیستم برای مدل ساده شده جداسازی نما بایستی بر اساس ویژگی‌های یک مدل سه‌بعدی تعیین گردد. در این حالت مدل پیشنهادی باید با مدل سه‌بعدی از نظر ویژگی سیستم آن شامل دوره‌های تناوب و نسبت‌های میرایی کالیبره شود (Moeinadini et al., 2019). این مدل از یکی از قاب‌های سازه اصلی به همراه سهم آن از قاب نما تشکیل شده است. جرم هر طبقه در این قاب m_i^S، برابر ۲۰ تن است و جرم قاب نما برای این ساختمان ۱۰ درصد جرم کل ساختمان می‌باشد (Fu & Zhang, 2016). سختی قاب برشی k_i^S برای سازه اصلی در تمام طبقات آن ۳/۳۶e نیوتن بر میلی‌متر در نظر گرفته شده است درحالی‌که برای قاب نما سختی آن ۵ درصد سختی سازه اصلی، بر اساس سختی اعضای فولادی تقویت شده قاب نما، است. ثابت‌های میرایی برای سازه و نما به‌طور خاص برای ارائه نسبت‌های میرایی ذاتی پایین برای مود اول هر زیر سیستم انتخاب می‌شوند. نتایج تحلیل‌های مودال برای ترکیب نمای پیوسته در هر دو زیرسیستم در شکل (۴) نشان داده شده است. تحلیل‌هایی برای تعیین ویژگی‌های دینامیکی هر زیرسیستم به‌طور جداگانه انجام شده است.



شکل (۴): شکل‌های مودی زیرسیستم‌ها.

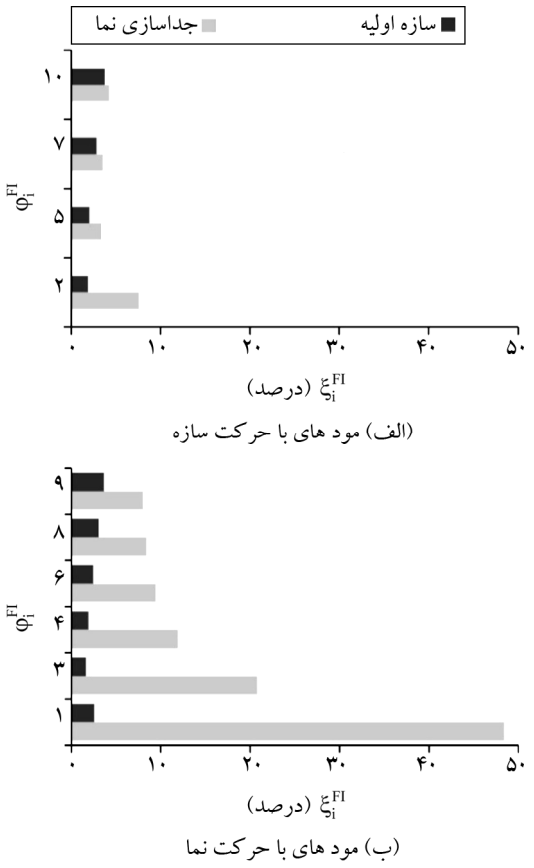


شکل (۵): شکل‌های مودی سیستم جداسازی نما.

در شکل (۴) به ترتیب ξ_i و β_i نسبت میرایی و ضریب مشارکت جرم را برای مود iام هر زیر سیستم نشان می‌دهند. برای زیر سیستم نما، اولین مود طبیعی آن، حرکت جانبی بدنه صلب قاب نما است که تمام جرم این زیر سیستم را حمل می‌کند $(\beta_1^{Fa}=1)$ این دو زیرسیستم باید با استفاده از جداسازهای انعطاف‌پذیر به یکدیگر متصل شوند تا یک سیستم جداسازی نما را تشکیل دهند. با توجه به انعطاف‌پذیری زیاد جداسازها، سیستم جدید دوره تناوب اصلی طولانی‌تری دارد. علاوه بر این، ازآنجایی‌که لایه جداساز بین دو زیرسیستم لازم است ظرفیت اتلاف انرژی زیادی داشته باشد، یک سیستم جداسازی نما باید سطح بالاتری از نسبت‌های میرایی مودال را در مقایسه با زیرسیستم‌های اصلی خود نشان دهد. در این حالت، ثابت‌های سختی k_i^L و میرایی c_i^L برای جداکننده‌ها و به‌طور خاص برای اولین مود طبیعی سیستم با دوره تناوب (T_1) ۲/۵ ثانیه و نسبت میرایی ۰/۵ = ξ_1 انتخاب می‌شوند. شکل (۵) نتایج تحلیل مودال سیستم جداسازی نما را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، تمام مودهای طبیعی سیستم فوق نشان‌دهنده حرکات نسبی بزرگ بین قاب نما و سازه اصلی هستند. این ویژگی در سیستم جداسازی نما برای افزایش پتانسیل اتلاف انرژی ساختمان استفاده می‌شود. با توجه به نتایج تحلیل‌های مودال، سیستم جداسازی نما دارای یک مود طبیعی با دوره تناوب بلند φ_i^{FI} است که حرکت سیستم نما در آن غالب است. این شکل مود با میرایی بالا نشان‌دهنده یک سیستم سازه‌ای با توانایی کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای قاب نما می‌باشد. علاوه بر این، تمام مود های طبیعی دیگر سیستم اگر با مود های موجود در ساختمان غیر ایزوله مقایسه شوند، نسبت‌های میرایی بالاتری را نشان می‌دهند.

این دیدگاه در شکل (۶) نشان داده شده است که تمام مودهای طبیعی سیستم جداسازی نما از جمله مود های با حرکت نما و آن‌هایی که دارای حرکت سازه هستند، نسبت‌های میرایی بالاتری را در مقایسه با شکل‌های مودی سازه اولیه نشان داده‌اند.



شکل (۶): نسبت‌های میرایی مودی برای سیستم جداسازی نما.

این امر به‌ویژه برای مود دوم سیستم که تحت تأثیر حرکت سازه اصلی است مهم است و بخش بزرگی از جرم ساختمان (β_2^{FI} = ۰/۶۶ و ξ_2^{FI} = ۰/۰۸) حمل می‌کند. این ویژگی توانایی سیستم جداسازی نما را در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای برای سازه‌ای اصلی سیستم نشان می‌دهد.

در این کار از رویکرد کلاسیک برای یافتن ویژگی‌های دینامیکی سیستم جداسازی نما از جمله اشکال مودی، دوره‌های تناوب طبیعی، نسبت‌های میرایی و نسبت‌های مشارکت جرم استفاده شد. فرض می‌شود که ماتریس میرایی سیستم متناسب با ماتریس سختی و جرم سیستم باشد. در چنین مواردی، تعیین ویژگی‌های سیستم نیازمند یک رویکرد تحلیل ویژه غیر کلاسیک است که در آن یک راه‌حل غیرمعمول برای شکل همگن معادله حرکت باید پیدا شود. با این حال، همان‌طور که در مطالعات دیگر نشان داده شده است، دقت زیاد در ویژگی‌های سیستم ممکن است تنها در مورد یک سیستم با میرایی بالا و عدم تناسب زیاد در ماتریس میرایی آن مورد نیاز باشد (Ziaeifar & Tavousi, 2005).

ازآنجایی‌که برای مدل جداسازی نما در این مطالعه چنین شرایطی حاکم نیست، یک رویکرد کلاسیک در تحلیل مودال برای یافتن ویژگی‌های دینامیکی سیستم ترجیح داده می‌شود. از سوی دیگر تعیین ظرفیت میرایی برای لایه جداسازی بین نما و سیستم سازه اصلی نیاز به دقت دارد. اگرچه مزیت اصلی جداسازی نما بهبود پتانسیل اتلاف انرژی سیستم است، اما ظرفیت میرایی بالا برای این لایه باعث کاهش حرکت نسبی بین دو زیر سیستم می‌شود که ممکن است باعث افت سریع پتانسیل اتلاف انرژی گردد (Ziyaeifar et al., 2011).

یک رویکرد ساده در تعیین ثابت‌های میرایی برای لایه جداسازی c_i^L، استفاده از مطالعات آزمون‌وخطا بر روی پاسخ‌های سیستم در معرض تحریک لرزه‌ای است. برای اولین امتحان توصیه می‌شود که سیستم جداسازی نما با نسبت میرایی در حدود ۰/۵ در نظر گرفته شود (Ziyaeifar & Noguchi, 1998).

۶- تحلیل لرزه‌ای سیستم جداسازی نما

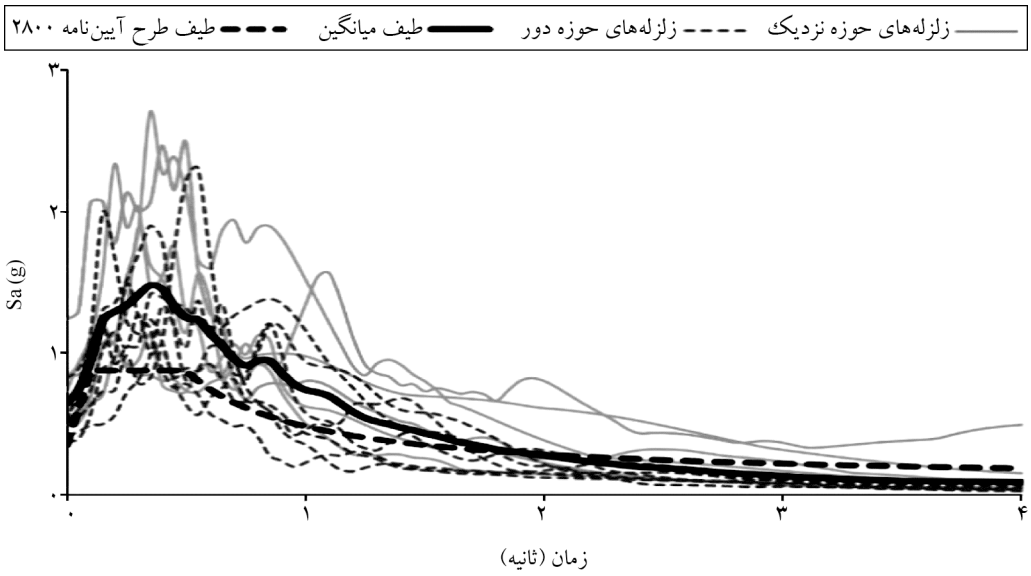
جهت اعتبارسنجی و قابل‌قبول بودن مدل جداسازی نما در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های بلند، تعداد زیادی تحلیل انتگرال زمانی با استفاده از مدل چند درجه آزادی پیشنهادی انجام شده است. در این میان، یک ساختمان غیر ایزوله به‌عنوان سازه اولیه نیز مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته و پاسخ‌های دو سیستم تحت تحریک لرزه‌ای مقایسه شده است. تمام تحلیل‌ها با استفاده از فرض رفتار الاستیک برای سیستم و تمام اجزای آن انجام شده است. برای تحلیل مدل جداسازی نما در مجموع ۱۴ رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک از پایگاه داده NGA-West2 ارائه شده توسط مرکز PEER مطابق جدول (۱) انتخاب شده است (PEER, 2022).

رکوردهای انتخابی بر اساس محدوده فرکانسی غالب و سطح اندازه‌گیری شدت آنها در نظر گرفته شده‌اند. شتاب طیفی برای زمین‌لرزه‌های انتخاب شده، با فرض نسبت میرایی ۵ درصد، در شکل (۷) نشان داده شده است. مقدار میانگین برای همه طیف‌های حوزه دور و نزدیک در همان شکل نشان داده شده و با طیف طرح آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم برای خاک نوع دوم و مناطق با لرزه خیری زیاد و خیلی زیاد مقایسه شده است. در روش تحلیل، از تمام رکوردهای حرکت زمین بدون هیچ‌گونه مقیاس کردن استفاده شد تا آنها در گروه خاصی از حرکات زمین دسته‌بندی نشوند. عدم تشابه در رکوردهای حرکت زمین به درک نقش سیستم جداسازی نما در بهبود عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای که در معرض انواع مختلف حرکات زمین هستند، کمک می‌کند.

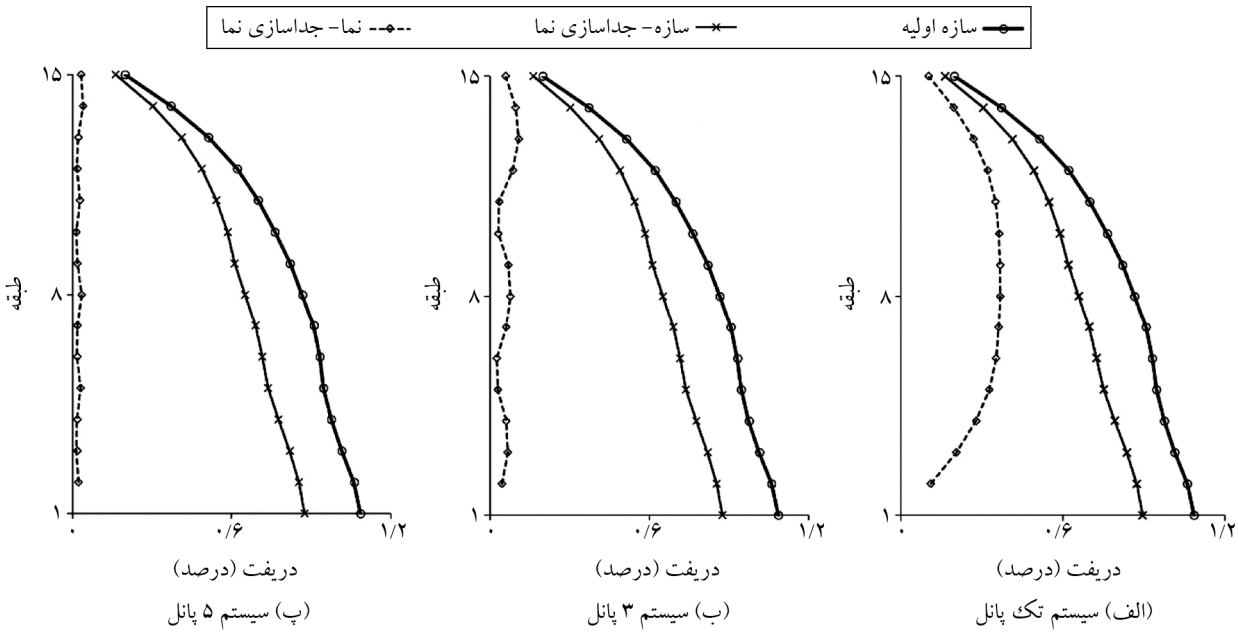
تحلیل انتگرال‌گیری زمانی بر روی مدل ۱۵ طبقه با نمای پیوسته جداسازی شده انجام می‌شود. تحلیل‌ها با مقادیر اولیه‌ای که پیش از این برای پارامترهای سیستم در تحلیل مودال استفاده شده بودند انجام شده است. در تمامی مدل‌ها میزان جرم کلی (سازه به همراه نما) ثابت بوده و با توجه به درصد جداسازی جرمی، میزان جرم مورد نظر از جرم کلی جداسازی می‌گردد. نتایج تحلیل‌ها برای میانگین حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات (دریفت) در امتداد ارتفاع ساختمان برای سازه اولیه و جداسازی شده نما و ترکیب‌بندی‌های متفاوت نما که در معرض گروه انتخابی شتاب‌نگاشت‌ها قرار گرفته‌اند، در شکل (۸) نشان داده شده است.

جدول (۱): رکوردهای زلزله حوزه دور و نزدیک از پایگاه داده NGA-West2.

ردیف			سال	ایستگاه ثبت	بزرگا (Mw)	PGA (g)	فاصله (کیلومتر)
۱	رکوردهای حوزه نزدیک	سان‌فرناندو	۱۹۷۱	Pacoima Dam (Upper Left Abut)	۶/۶۱	۱/۲۳	۳/۵
۲		لوماپریتا	۱۹۸۹	Corralitos	۶/۹۳	۰/۵۱	۳/۹
۳		ارزیکان	۱۹۹۲	Erzincan	۶/۶۹	۰/۴۹	۴/۴
۴		نورثریج	۱۹۹۴	LA - Sepulveda VA	۶/۶۹	۰/۷۳	۸/۴
۵		کوبه	۱۹۹۵	KJMA	۶/۹	۰/۸۳	۱
۶		چی- چی	۱۹۹۹	TCU065	۷/۶۲	۰/۸۲	۰/۶
۷		ایمپریال والی-۰۶	۱۹۷۹	Bonds Corner	۶/۵۳	۰/۷۶	۲/۷
۱	رکوردهای حوزه دور	نورثریج	۱۹۹۴	Beverly Hills - Mulhol	۷/۳۶	۰/۵۲	۱۷/۲
۲		لوماپریتا	۱۹۸۹	Capitola	۶/۹۳	۰/۵۳	۱۵/۲
۳		ایمپریال والی	۱۹۷۹	El Centro Array #11	۶/۵۳	۰/۳۸	۱۲/۵
۴		لاندرز	۱۹۹۲	Coolwater	۷/۲۸	۰/۴۲	۱۹/۷
۵		منجیل	۱۹۹۰	Abbar	۷/۳۷	۰/۵۱	۱۲/۶
۶		چی- چی	۱۹۹۹	TCU045	۷/۶۲	۰/۵۱	۲۶
۷		دوزجه	۱۹۹۹	Bolu	۷/۱	۰/۸۲	۱۲



شکل (۷): طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های انتخابی حوزه دور و نزدیک.



شکل (۸): میانگین حداکثر دریفت طبقات.

پاسخ سازه اصلی و سیستم نما هر دو کمتر از سازه پاسخ سازه اولیه هستند. کاهش دریفت برای سازه اصلی در مورد ساختمان جداسازی شده حدود ۲۰ درصد است اما برای سیستم نما این کاهش بسیار بیشتر می‌باشد. یکی از ویژگی‌های استثنایی سیستم جداسازی نما توانایی آن در کاهش دریفت و شتاب وارده به سیستم نما در هنگام تحریک زلزله و ارائه سطح بالاتری از قابلیت اطمینان برای نما در ساختمان‌های بلند است.

ازآنجایی‌که پیکربندی این سیستم را می‌توان با ترکیب‌های مختلف در نظر گرفت، سه ترکیب نمای مختلف نشان داده شده در شکل (۲) (با در نظر گرفتن نسبت جرمی ۱۰ درصد و نسبت سختی ۵ درصد برای قاب نما) در نظر گرفته شده است.

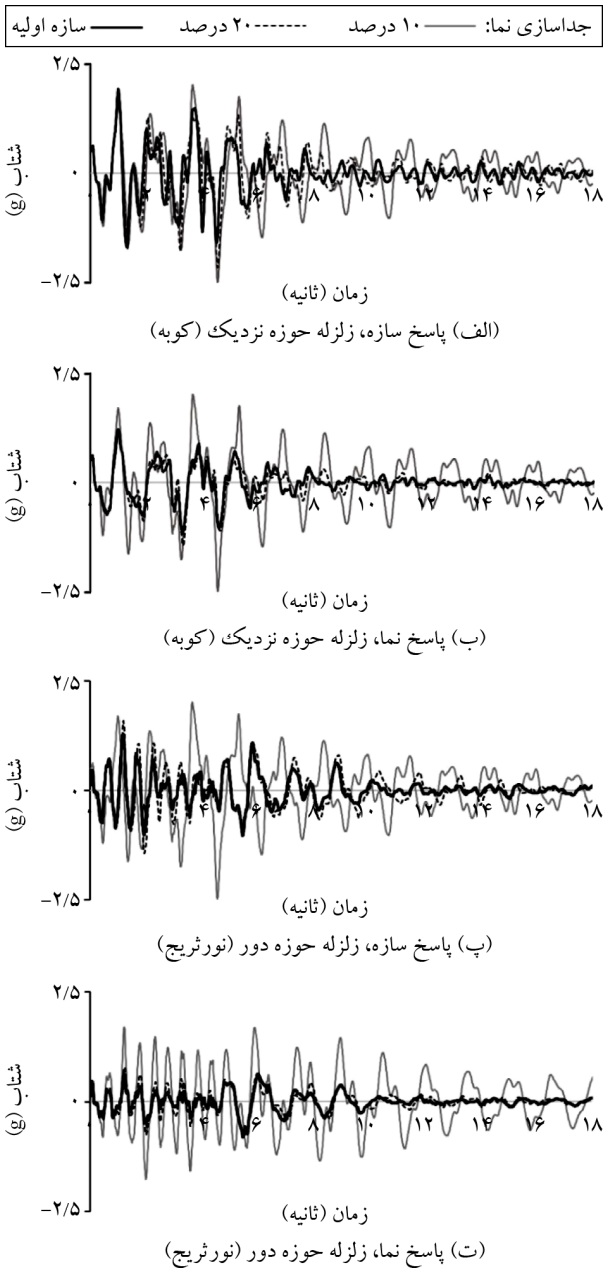
بر اساس شکل (۸)، با تقسیم قاب نما به قسمت‌های کوچک‌تر مجزا در امتداد ارتفاع ساختمان، تغییری در شاخص‌های عملکرد سازه اصلی ایجاد نمی‌شود. با این حال، در

مورد قاب نما، کاهش ۹۰ درصد در نسبت دریفت برای ترکیب نمای پنج قسمتی انتظار می‌رود. این عمدتاً به دلیل قطع پیوستگی نما در امتداد ارتفاع آن است که سطح تقاضای خمشی در قاب نما را کاهش می‌دهد. با توجه به این نتایج، پتانسیل روش جداسازی نما در کاهش دریفت قاب نما قابل توجه است. این ویژگی به حفظ رفتار سیستم نما در محدوده رفتار ارتجاعی و جلوگیری از شکستن و فروریختن مواد شکننده آن کمک می‌کند؛ بنابراین، به نظر می‌رسد می‌توان این روش را برای ایجاد یک سیستم نمای ایمن، قابل اعتماد و با هزینه نگهداری کمتر برای ساختمان‌های بلند استفاده کرد.

شکل (۹) تاریخچه زمانی شتاب طبقه بام را برای سازه‌های جداسازی شده و سازه اولیه نشان می‌دهد که در معرض دو رکورد منتخب زلزله حوزه نزدیک و حوزه دور قرار گرفته‌اند. مطابق شکل، کاهش پاسخ‌های شتاب برای سیستم نما برای هر دو نوع تحریک لرزه‌ای قابل توجه است. علاوه بر این، نتایج تاریخچه زمانی برای سازه جداسازی شده، ویژگی‌های یک سیستم بسیار میرا را نشان می‌دهد که در آن دامنه پاسخ‌های شتاب برای هر دو زیر سیستم به‌سرعت در طول زمان کاهش می‌یابد.

همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، نسبت جرم بالاتر برای سیستم نما ممکن است برای ساختمان به دلیل نقش مثبت آن در کاهش پاسخ‌های سازه جداسازی شده مفید در نظر گرفته شود. این دیدگاه با تغییر نسبت جرم قاب نما از ۱۰ به ۲۰ درصد (سیستم دیوار پرده‌ای با پانل‌های سنگی یا بتن پیش‌ساخته) جرم ساختمان بررسی شده است، درحالی‌که سایر پارامترها در مدل بدون تغییر نگه‌داشته شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، افزایش نسبت جرمی قاب نما، عملکرد لرزه‌ای سازه‌ای اصلی را برای مدل جداسازی شده بهبود می‌بخشد.

به‌طور مشابه، تاریخچه زمانی تغییر مکان بام برای سازه‌های جداسازی شده و سازه اولیه که در معرض رکوردهای مشابه زلزله قرار دارند در شکل (۱۰) نشان داده شده است. این نتایج دوباره ویژگی‌های میرایی بالای سیستم جداسازی شده را نشان می‌دهد.



(الف) پاسخ سازه، زلزله حوزه نزدیک (کوبه)

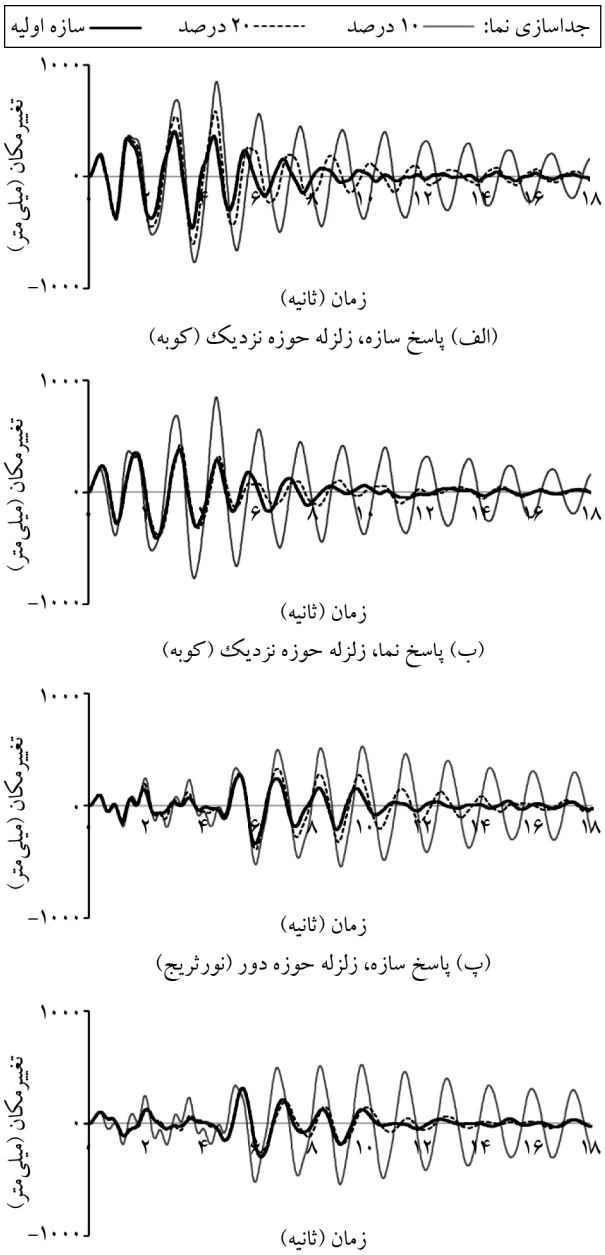
(ب) پاسخ نما، زلزله حوزه نزدیک (کوبه)

(پ) پاسخ سازه، زلزله حوزه دور (نورثریج)

(ت) پاسخ نما، زلزله حوزه دور (نورثریج)

شکل (۹): تاریخچه زمانی شتاب طبقه بام.

با توجه به شکل (۱۰)، حرکت نما نسبت به سیستم سازه اصلی کمی خارج از فاز است، درحالی‌که هر دو زیر سیستم به‌صورت هماهنگ با هم حرکت می‌کنند. این نشانه حاکم بودن دومین مود طبیعی سیستم جداسازی شده φ_2^{FI} است، با دوره تناوب T_2^{FI} = ۱/۴۱ ثانیه که در آن هر دو زیر سیستم در یک جهت حرکت می‌کنند. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، سازه اولیه تقریباً همان روند را دنبال می‌کند که نشان‌دهنده تسلط اولین مود طبیعیآن T_1^{NI} =۱/۴۵ ثانیه است.



(الف) پاسخ سازه، زلزله حوزه نزدیک (کوبه)

(ب) پاسخ نما، زلزله حوزه نزدیک (کوبه)

(پ) پاسخ سازه، زلزله حوزه دور (نورثریج)

(ت) پاسخ نما، زلزله حوزه دور (نورثریج)

شکل (۱۰): تاریخچه زمانی جابه‌جایی طبقه بام.

از سوی دیگر، برای سازه جداسازی شده، نقش اولین مود طبیعی آن φ_1^{FI} با دوره تناوب T_1^{FI} = ۲/۵۵ ثانیه در پاسخ سیستم تقریباً کاهش یافته است و مود دوم آن با پتانسیل اتلاف انرژی بالا ξ_2^{FI} = ۰/۰۸ و ضریب مشارکت جرمی β_2^{FI} = ۰/۶۶ به‌عنوان عامل اصلی شناخته می‌شود. اما در سازه اولیه، اولین مود طبیعی آن با نسبت میرایی بسیار کمتر ξ_1^{St} = ۰/۰۲ و ضریب مشارکت جرمی بالاتر β_1^{NI} = ۰/۸۴ بر پاسخ سیستم غالب است. مشابه پاسخ تاریخچه زمانی شتاب در اینجا هم با افزایش مقدار جرم سیستم کاهش پاسخ سازه اصلی در شکل‌های (۱۰- الف) و (۱۰- پ) به‌خوبی مشهود است.

ازآنجایی‌که همیشه محدودیتی در سطح تغییر شکل جانبی مجاز برای جداسازها وجود دارد، معیارهای پذیرش برای همه شاخص‌های عملکرد باید بر اساس این محدودیت تعریف شوند. سطح مجاز تغییر شکل جانبی برای جداکننده‌ها در این تحقیق به ۲۰۰ ± میلی‌متر محدود شده است تا بتوان از جداکننده‌های مناسب برای سیستم‌های سازه‌ای سبک‌وزن استفاده کرد. با توجه به نتایج حاصل‌شده، سیستم جداسازی نما در شکل پیوسته خود و با برآورد اولیه پارامترهای سیستم، توانایی خود در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه اصلی و قاب نما نشان داده است. همچنین اهمیت تغییر پارامترهای سیستم در روش جداسازی نما برای تثبیت نتایج و افزایش توانایی این رویکرد در کاهش خطرات لرزه‌ای در ساختمان‌های بلند ضروری است.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نقش سیستم نما در ساختمان‌های بلند مورد بررسی قرار گرفته است. این بخش از ساختمان‌ها معمولاً از منظر زیبایی‌شناختی و ویژگی‌های عایق حرارتی و صوتی مهم در نظر گرفته می‌شود. تمرکز مطالعه حاضر، استفاده از نما به‌عنوان بخشی از سیستم سازه‌ای برای کمک به مقابله با نیروهای جانبی وارد بر سیستم و درعین‌حال حفظ یکپارچگی آن در هنگام تحریک لرزه‌ای بدون شکستگی و سقوط مواد ترد آن است. این چشم‌انداز با استفاده از جداکننده‌های لرزه‌ای برای اتصال قاب نما به سیستم سازه اصلی تعریف شده است. به‌اصطلاح تکنیک جداسازی نما ویژگی‌های میرایی ساختمان‌ها را با استفاده از دستگاه‌های اتلاف انرژی ما بین قاب نما و سازه اصلی بهبود می‌بخشد. در این میان، جداسازی قاب نما از سازه اصلی، سطح تغییر شکل جانبی و شتاب تحمیلی بر سیستم نما را کم کرده و خطر آسیب وارده به مصالح نما را کاهش می‌دهد.

مطالعات عددی بر روی تکنیک جداسازی نما با استفاده از

مدل ساده شده توسعه یافته در این مطالعه انجام شده است. تجزیه‌وتحلیل مودال در یک ساختمان با سیستم جداسازی نما توانایی این تکنیک را در بهبود ویژگی‌های میرایی سیستم با افزایش قابل توجهی در نسبت‌های میرایی برای تمام اشکال مودی ساختمان نشان داده است. با توجه به نتایج این مطالعه، جرم سیستم نما و ویژگی‌های میرایی سیستم، مهم‌ترین پارامترهای این مدل در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه اصلی می‌باشد. با این حال، برای سیستم نما، نوع پیکربندی نما (تقسیمات نما در امتداد ارتفاع ساختمان) مهم‌ترین انتخاب در بهبود عملکرد لرزه‌ای سیستم نما به نظر می‌رسد. بررسی پاسخ سازه در حالت افزایش جرم سیستم نما از ۱۰ به ۲۰ درصد به‌خوبی نشان‌دهنده تأثیر جرم بر کاهش پاسخ سازه است. در این تحقیق نشان داده شد که استفاده از جداسازی نما در ساده‌ترین حالت باعث کاهش ۶۰ درصدی میانگین حداکثر دریفت جانبی قاب نما و کاهش ۴۰ درصدی در پاسخ‌های شتاب آن در مقایسه با مدلی که نما به سازه اصلی کاملاً متصل است، می‌شود. این دستاورد قابل توجه در بهبود عملکرد لرزه‌ای سیستم نما در حالی اتفاق افتاده است که سازه اصلی ساختمان نیز بیش از ۲۰ درصد کاهش در دریفت خود داشته است. چنین بهبودی در عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها با استفاده از سیستم جداسازی نما به تعریف نقش جدیدی برای مجموعه سیستم‌های نما کمک می‌کند تا به‌عنوان بخشی یکپارچه از سیستم سازه‌ای در فرآیند طراحی ساختمان‌های بزرگ عمل کنند. مطالعات بیشتر با استفاده از مدل‌های سه‌بعدی با توجه ویژه به ترکیب نما و فناوری‌های جداسازی برای درک محدودیت‌های فنی این رویکرد و چشم‌انداز آینده آن در طراحی ساختمان‌های بلند مورد نیاز است.

مراجع

References

Azad, A. (2016). *Application of Smart Facade System in Reduction of Structural Response during Wind Loads*, A dissertation submitted in fulfilment of the requirement for degree of Doctor of Philosophy School of Civil and Environmental Engineering University of Technology, Sydney.

Bedon, C. (2018). Numerical assessment of vibration control systems for multi-hazard design and mitigation of glass curtain walls. *Journal of Building Engineering, 15*, 1-13.

Fu, T.S., & Johnson, E.A. (2011). Distributed mass damper system for integrating structural and environmental controls in buildings. *Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 137*(3), 205-213.

Fu, T.S., & Johnson, E.A. (2014). Active control for a distributed mass damper system. *Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 140*(2), 426-429.

Fu, T.S., & Zhang, R. (2016). Integrating double-skin façades and mass dampers for structural safety and energy efficiency. *Journal of Architectural Engineering, 22*(4).

Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.F., & Yao, J.T.P. (1997). Structural control: past, present, and future. *Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 123*(9), 897-971.

Moeinadini, A., Ziyaeifar, M., & Nekooei, M. (2019). Seismic performance of facade mass isolation system in tall buildings, *8th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran.

Moeinadini, A., Ziyaeifar, M., & Nekooei, M. (2023). Facade isolation in seismic design of tall buildings. *Structures, 58*, 105416.

Moon, K.S. (2009). Tall building motion control using double skin facades. *Journal of Architectural Engineering, 15*(3), 84-90.

Moon, K.S. (2015). Integrated damping systems for tall buildings: tuned mass damper/double skin facade damping interaction system. *The Structural Design of Tall and Special Buildings, 25*(5), 232-244.

Naeim, F., & Kelly, J.M. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*.

Pacific Earthquake Engineering Research Center. Available online: https://peer.berkeley.edu/ (accessed on 10 July 2022).

Pipitone, G., Barone, G., & Palmeri, A. (2017). Optimal design of double-skin façades as vibration absorbers. *Structural Control & Health Monitoring, 25*(2), e2086.

Samali, B., & Abtahi, P. (2016). Evaluation of the

effect of smart facade systems in reducing dynamic response of structures subjected to seismic loads. *Earthquakes and Structures, 11*(6), 983-1000.

Ziaeifar, M. (2002). Mass isolation concept and techniques. *European Earthquake Engineering, 2*(16), 64-76.

Ziyaeifar, M., Gidfar, S., & Nekooei, M. (2011). A model for Mass Isolation study in seismic design of structures. *Structural Control & Health Monitoring, 19*(6), 627-645.

Ziyaeifar, M., & Noguchi, H. (1998). Partial mass isolation in tall buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 27*(1), 49-65.

Ziaeifar, M., & Tavousi, S.H. (2005). Mass participation in non-classical mass isolated systems. *Asian Journal of Civil Engineering, 6*(4), 273.

Investigation on the Role of Façade Isolation in Seismic Performances of Tall Buildings

Ali Moeinadini[1], Mansour Ziyaeifar[2*] and Masoud Nekooei[3]

1. Ph.D. Student, Department of Structural Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: mansour@iiees.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Structural Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

In the design process of tall buildings, there is usually a higher demand for structural performances of the system during seismic actions. In this case, adding to the strength and stiffness of the building is not considered helpful in many cases because it may add to the lateral acceleration of the system and causes damage to non-structural parts of the building including the façade assembly. Considering the brittle behavior of cladding materials in façade frames, the main expectation of designers is to prevent the possibility of any breakage in façade assembly and suppress its broken materials to fall over pedestrians during earthquake action. Recently, some new techniques have been proposed to enhance the ability of façade frame in dealing with lateral acceleration and inter story drift during earthquakes incidents. To mention a few, using multiple Mass Dampers and other kinds of energy dissipating devices in design of façade assembly are recommended in this case (e.g. Fu, T.S., & Zhang, R., 2016). In current study it is proposed to take into account the façade framework in the design process of tall buildings using Partial Mass Isolation technique (PMI) described elsewhere (Ziyaeifar, M., & Noguchi, H. 1998). In this new approach (Facade Isolation) the cladding assembly is considered as a structural subsystem isolated from the main structural system using a flexible isolation layer with large energy dissipation potential. The cladding assembly in this approach is expected to have less lateral drift and acceleration responses during earthquake motions. In the meantime, considering interaction between façade frame and the main structural system, a marginal improvement in seismic performances of the main structural system is also anticipated. In FI a higher weight for cladding assembly is considered beneficial for some buildings due to its role in reducing earthquake-induced responses for the main structural system. This feature can revive the idea of using heavy facade slabs or blocks for facade frame of tall buildings to enhance their aesthetic values and insulation properties without negative effects on their seismic performances.

A two-dimensional model, developed in current study, is used for investigation on façade isolation technique in a 15-story building equipped with three types of façade frame configurations. The results of numerical studies on these models are compared with those of the same structural system without isolation. Modal analyses on a FI building has shown the ability of this technique in improving damping characteristics of the system by increasing damping ratios for all modal shapes of the structure. A large number of time Integration studies have been carried out on the model subjected to 14 of earthquake records. In comparison with the same structural system without isolation, the results of analyses have shown remarkable improvement in behavior of façade frame and the main structural system during seismic actions. It was shown that using FI in its simplest layout caused 60% reduction in lateral drift of the façade frame and 40% reduction in its acceleration responses. On the other hand, the main structural system has also enjoyed from 20% reduction in its lateral drift. Such notable enhancement in seismic performances of buildings, defines a new role for façade frame to be incorporated in the design process of tall buildings as an integrated part of the structural system.

Keywords: Façade Isolation, Partial Mass Isolation, Double Skin Façade, Structural Control, Tall Building