

چکیده

در این پژوهش، جداسازی لرزه‌ای قائم یک ساختمان به دو زیرسازه با مشخصات دینامیکی متفاوت با هدف کاهش پاسخ لرزه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور یک قاب برشی با میراگر ویسکوز و ویسکوالاستیک به دو زیرسازه تفکیک شده و پاسخ لرزه‌ای سازه اصلی و سازه‌های جداسازی شده قائم (س.ج.ق.) برای تعداد قابل توجهی از نسبت‌های جرم و سختی زیرسازه‌ها نسبت به سازه اصلی، تحت تحریک زلزله‌هایی با پیروید غالب کمتر از نیم ثانیه و بیشتر از نیم ثانیه محاسبه شده است. در این مطالعه دستگاه مختصات جداسازی و نمودارهای کانتوری معرفی شده که نحوه پاسخ لرزه‌ای س.ج.ق. را بیان می‌کند و بر اساس آن سه حالت جداسازی جرمی، اندرکنشی و کنترل جرمی از هم تمیز داده شده است. همچنین اثر متقابل نسبت‌های جداسازی و مشخصات میراگرهای ارتباطی شامل سختی و میرایی، بر کنترل پاسخ س.ج.ق. مورد بررسی قرار گرفته و محدوده‌های مناسبی از مشخصات میراگرها و همچنین محدوده‌های بهینه از نسبت‌های جداسازی پیشنهاد شده است. در انتها تأثیر جداسازی در یک ساختمان برشی ۵ طبقه مطالعه شده است. نتایج دلالت بر آن دارد که با به کارگیری جداسازی قائم، کاهش پاسخ لرزه‌ای تا ۴۰ درصد در زیرسازه نرم و حتی بیشتر از آن در زیرسازه سخت قابل دستیابی است.

واژگان کلیدی: جداسازی لرزه‌ای قائم، میراگرهای ویسکوز و ویسکوالاستیک، کاهش پاسخ لرزه‌ای، روش عددی رونگه-کوتا، میرایی نامتناسب.

جداسازی لرزه‌ای قائم با میراگرهای ویسکوز و ویسکوالاستیک در حالت‌های عملکردی مختلف برای کاهش پاسخ لرزه‌ای

رضا میلانچیان

دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محمود حسینی (نویسنده مسئول)

دانشیار پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، hosseini@iiees.ac.ir

مسعود نکویی

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۱- مقدمه

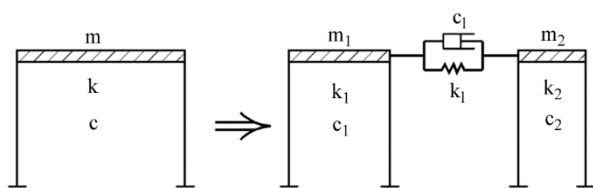
ظرفیت‌های جذب و استهلاک انرژی با آسیب کمتر اعضای سازه‌ای و بهره‌گیری از اندرکنش سازه‌ای قرار دارد. ایده به هم بستن سازه‌ها و بهره گرفتن از اندرکنش بین دو سازه اولین بار با هدف کنترل ارتعاشات سازه‌های بزرگ در برابر باد مطرح شده است [۱]. این روش مزیت ایجاد نیروهای کنترلی کافی در فرکانس‌های کوچک را داراست؛ خاصیتی که برای کمینه کردن پاسخ تغییر مکان سازه‌های بلند ضروری می‌باشد [۲]. رفتار و مشخصات دینامیکی دو سازه مجاور به هم بسته شده با استفاده از میراگرهای ویسکوالاستیک و ویسکوز مجزا، شامل فرکانس طبیعی و نسبت میرایی در حالت نامتناسب مطالعه شده است. با بررسی پارامتری مقادیر ویژه، روشی برای تعیین پارامترهای بهینه

فلسفه طراحی لرزه‌ای سازه‌ها در آئین‌نامه‌های فعلی بر اساس شکل‌پذیری می‌باشد. در این فلسفه با طراحی لرزه‌ای سازه، ظرفیت جذب انرژی در المان‌های مشخصی از سازه ایجاد می‌شود و با ایجاد هرچه بیشتر ظرفیت‌های تغییر شکل پلاستیک در المان‌های ویژه می‌توان سازه را انعطاف‌پذیرتر طراحی کرد؛ لذا در صورت طراحی صحیح، آسیب و تغییر شکل‌های بزرگ در این سازه‌ها به خصوص در زلزله‌های بزرگ اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. بنابراین نیاز فزاینده‌ای برای روش‌های نوآورانه و مؤثر برای کنترل تغییر مکان جانبی سازه‌ها وجود دارد. تکنیک‌های جدید در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها بیشتر در راستای کاهش نیرو و انرژی ورودی زلزله بر پایه افزایش انعطاف‌پذیری، ایجاد

با توجه به عملکرد سه بعدی مورد انتظار از یک ساختمان، لازم است سطوح قائم جداساز طوری اعمال گردند که سازه اصلی به دو زیرسازه داخلی و بیرونی افراز گردد، اما برای بررسی ویژگی های مورد بررسی در این مقاله، انتخاب مدل هایی با قاب برشی کافی فرض می شود. در این پژوهش، جداسازی لرزه ای قائم یک ساختمان به دو زیرسازه با رفتار اندرکنشی متفاوت با میراگرهای ویسکوالاستیک، با هدف کاهش پاسخ لرزه ای مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل های تاریخچه پاسخ با استفاده از روش عددی رونگه-کوتا در زلزله های مختلف انجام گرفته است. در این مطالعه دستگاه مختصاتی به عنوان مختصات جداسازی معرفی شده است. کاهش پاسخ لرزه ای دو زیرسازه، در نسبت های جرم و سختی متعددی نسبت به سازه اصلی مورد ارزیابی قرار گرفته و نسبت های پاسخ سازه های جداسازی شده در نمودارهایی کانتوری ارائه شده است. ارائه نتایج هر دو زیرسازه نرم و سخت در یک نمودار واحد، درک مناسبی از رفتار سازه های جداسازی شده قائم را فراهم آورده و با تحلیل نتایج، محدوده های بهینه برای نسبت جداسازی پیشنهاد شده است. با توجه به مقادیر پاسخ در نسبت های مختلف جرم و سختی، سه حالت مختلف جداسازی جرمی، اندرکنشی و کنترل جرمی در این نمودارها از یکدیگر تمیز داده شده است. همچنین در این تحلیل ها ارتباط نسبت جداسازی و میرایی و سختی میراگرهای ارتباطی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مدل تحلیلی جداسازی قائم در قاب یک طبقه

تفکیک اسکلت یک سیستم به دو بخش اندرکنشی با ایجاد یک سطح جدایی لرزه ای قائم انجام می گیرد (شکل ۱). این جداسازی با استفاده از میراگرهای ویسکوالاستیک تعریف شده با مدل کلونین با سختی k_1 و میرایی c_1 صورت می پذیرد.



شکل (۱): مفهوم جداسازی قائم یک قاب به دو زیرسازه با میراگرهای ویسکوالاستیک ارتباطی.

میراگرهای ارتباطی، برای دستیابی به پیشینه میرایی و پیشینه کنترل پاسخ در مقابل رویداد زلزله پیشنهاد شده است [۳-۴]. با کمینه کردن انرژی متوسط ارتعاشی دو سازه مجاور یک درجه آزاد در اثر تحریک طیف نوفه سفید زمین، روابط تحلیلی برای تعیین پارامترهای بهینه میراگرهای ویسکوز و ویسکوالاستیک برحسب نسبت جرم^۲ و فرکانس طبیعی دو سازه مجاور به دست آمده است [۵-۶].

در سیستم جداگر لرزه ای ارتعاش سازه از پایه جدا می شود و در نتیجه انعطاف پذیری سازه در مود غالب افزایش یافته در نتیجه انرژی ورودی زلزله مؤثر بر اجزای سازه ای به طور قابل ملاحظه ای کاهش و اثرات زلزله نیز کاهش می یابد. در این روش افزایش انعطاف پذیری و میرایی سازه در یک سطح جداساز بر روی تراز پایه ساختمان متمرکز می گردد [۷]. در سازه ها تکنیکی است که در آن مؤلفه افقی جرم سازه به عنوان منشأ اصلی انرژی ورودی زلزله در بحث جداگر لرزه ای مورد توجه قرار می گیرد. در این تکنیک با افراز کردن سازه به دو بخش مؤلفه افقی جرم از سختی جانبی سازه جداسازی می شود. جدایی جرم بدون ایجاد ناپوستگی در سختی جانبی سازه، زمانی ممکن است که جرم و سختی سازه به طور صلب به یکدیگر یکپارچه نباشند. در این مفهوم از جداگر، سطح جداساز در بین بخش جرم و سختی قرار می گیرد. با جداسازی جرم، بخش عمده جرم سیستم به محدوده انرژی و نیروی کم طیف زلزله جابه جا می گردد [۸]. رفتار لرزه ای سازه های جداسازی شده جرمی قائم در برابر زلزله با استفاده از یک مدل دو جرمی توسعه یافته مدل سه عضوی ماکسول، مورد مطالعه قرار گرفته است. در بررسی تحلیلی با تعریف یک پارامتر جداساز برای سازه و تعیین مشخصات دینامیکی سیستم، مقادیر پارامترهای بهینه نسبی برای میراگرهای جداساز به دست آمده است [۹-۱۰]. همچنین سیستم کنترلی شامل میراگرهای هیدرولیکی نیمه فعال به عنوان جزئی از مکانیسم جداسازی در ارتفاع سازه در بین دو زیرسیستم جرمی و سختی سازه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بررسی انجام گرفته قابلیت روش جداسازی جرمی در کاهش اثر زلزله بر سازه با به کارگیری دو روش تحلیلی و عددی نشان داده شده است [۱۱].

به صورت n جفت مزدوج موهومی با مقدار منفی برای قسمت حقیقی به صورت زیر می‌باشد [۳]:

$$\lambda_j = \bar{\lambda}_{j+n} = -\omega_j \xi_j + i\omega_{dj} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$\omega_j = |\lambda_j|, \quad \xi_j = -\text{Re}(\lambda_j)/|\lambda_j|, \quad \omega_{dj} = \omega_j \sqrt{1 - \xi_j^2} \quad (3)$$

که در آن ω_j ، ω_{dj} و ξ_j به ترتیب فرکانس طبیعی، فرکانس زیربحرانی و نسبت میرایی در مود j است.

در س.ج.ق. با میرایی بزرگ میراگر، حل بخش همگن معادله حرکت ممکن است علاوه بر تعدادی جفت مقدار ویژه موهومی مزدوج به تعدادی جفت مقدار ویژه حقیقی منفی متناظر با زوج بردار ویژه حقیقی نیز منجر شود. در این حالت سیستم با مودهای ترکیبی^۴ نامیده شده و مناسب است مقادیر حقیقی در قیاس با مقادیر موهومی به شکل مزدوج زیر بیان گردد:

$$\lambda_j = -\omega_j \xi_j + \omega_{dj}, \quad \lambda_{j+n} = -\omega_j \xi_j - \omega_{dj} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

که در آن $n' \leq n$ تعداد مودهای سیستم با مقدار ویژه حقیقی است و مقادیر ξ_j همه بزرگ تر یا مساوی یک می‌باشند. مقادیر حقیقی فرکانس طبیعی و فرکانس سیستم میرا، همچنین نسبت میرایی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\omega_j = \sqrt{\lambda_j \lambda_{j+n}}, \quad \xi_j = -(\lambda_j + \lambda_{j+n}) / 2\omega_j, \quad \omega_{dj} = \omega_j \sqrt{\xi_j^2 - 1} \quad (5)$$

۴- معرفی سیستم مختصات و حالت‌های جداسازی

در بخش‌های بعدی به منظور مطالعه جامع جداسازی لرزه‌ای، مطالعه مقادیر ویژه و تحلیل‌های تاریخچه پاسخ تحت تحریک زلزله‌های مختلف به‌ازای نسبت‌های متعددی از جرم و سختی انجام خواهد گرفت. لذا با توجه به حجم قابل توجه اطلاعات خروجی، استفاده از روش مناسب و جامع برای ارائه و ارزیابی نتایج دارای اهمیت است.

یکی از روش‌های متداول برای ارائه نتایج تحلیل در صورتی که خروجی مورد نظر هم‌زمان تابع دو متغیر باشد، به صورت یک سطح رویه در یک سیستم دستگاه مختصات

جرم و سختی سازه اصلی به ترتیب با m و k بوده و پس از جداسازی به دو زیرسازه، $m = m_1 + m_2$ و $k = k_1 + k_2$ برقرار می‌باشد که زیرنویس‌های ۱ و ۲ دلالت بر زیرسازه‌ها دارد. نسبت میرایی ذاتی سازه اصلی $\xi = \xi_1 = \xi_2$ ، برحسب میرایی بحرانی در نظر گرفته می‌شود و فرض بر این است که بعد از جداسازی نیز این نسبت میرایی برای هر دو زیرسازه برقرار باشد. بنابراین ضریب میرایی ذاتی برای هریک از زیرسازه‌ها $\xi_1 = 2m_1\omega_1$ و $\xi_2 = 2m_2\omega_2$ است که در آن ω_1 و ω_2 فرکانس طبیعی زیرسازه‌های مجزا است. مطابق شکل (۱)، سازه‌های جداسازی شده را می‌توان به صورت دو قاب یک درجه آزاد مرتبط در نظر گرفت، در نتیجه معادلات حرکت حاکم بر سازه‌های جداسازی شده قائم (س.ج.ق.) تحت تحریک مؤلفه افقی زلزله به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_l & -c_l \\ -c_l & c_2 + c_l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_l & -k_l \\ -k_l & k_2 + k_l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I \\ I \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (1)$$

که در آن X_1 و X_2 تغییر مکان‌های نسبی زیرسازه‌ها نسبت به زمین و \ddot{x}_g شتاب حرکت زمین است.

۳- مشخصه‌های دینامیکی سازه‌های جداسازی شده قائم

استفاده از فرض میرایی متناسب با جرم و سختی برای سیستم‌هایی که در پلان و ارتفاع منظم هستند و خواص میرایی و جذب انرژی تقریباً یکسانی در سراسر اعضای سازه دارند قابل قبول می‌باشد. با انجام جداسازی لرزه‌ای با استفاده از میراگرهای ویسکوالاستیک، ماتریس میرایی دیگر ماتریس متناسب نخواهد بود. لذا در تعیین مشخصه‌های دینامیکی سیستم، ضرورت دارد خواص ماتریس میرایی نیز لحاظ گردد. تحلیل ارتعاش آزاد س.ج.ق. به $2n$ مقدار ویژه برای یک سیستم n درجه آزاد منجر می‌شود. برحسب اینکه این مقادیر ویژه، متناظر با مودهای زیربحرانی و یا فوق بحرانی باشند به صورت جفت‌های موهومی مزدوج و یا جفت‌های حقیقی (میرایی ترکیبی) خواهد بود. در سیستم با میرایی زیربحرانی^۳ تمام $2n$ مقادیر ویژه

شده است. در بخش‌های بعدی خصوصیات حالت‌های مختلف جداسازی به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرد.

۵- مطالعه فرکانس و نسبت‌های میرایی مودال

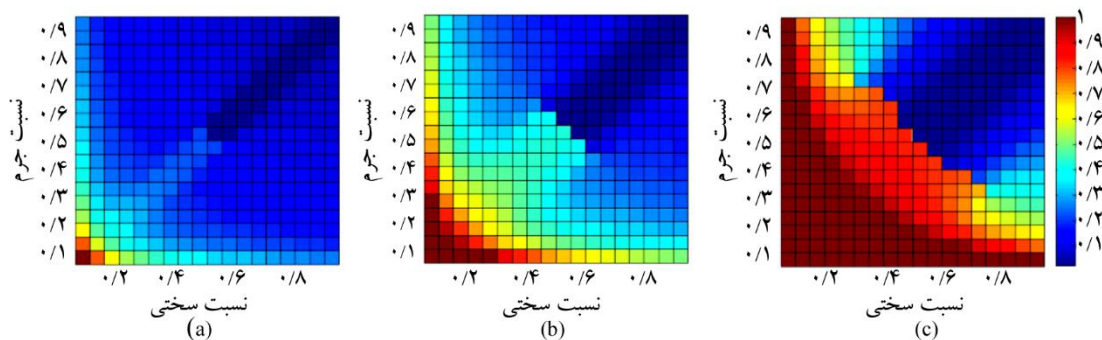
برای رسیدن به درک مناسبی از ویژگی‌های جداسازی لرزه‌ای قائم، مطالعه جداسازی در ساده‌ترین حالت یعنی یک قاب صفحه‌ای مفید فرض شده است. جرم طبقه برای سازه اصلی ۱۰۰ تن و سختی طبقه به مقدار ۱۰۰۰۰ کیلونیوتن بر متر در نظر گرفته شده است. به منظور مطالعه جامع نقش جداسازی قائم بر مشخصات دینامیکی زیرسازه‌ها، محاسبه مقادیر ویژه ارتعاش آزاد سیستم با میرایی نامتناسب به روش ذکر شده به‌ازای نسبت‌های مختلف جداسازی و پارامترهای مختلف میراگر ارتباطی مورد مطالعه قرار گرفته است. در سازه‌هایی که از میراگرهای الحاقی به منظور وسایل اتلاف انرژی استفاده می‌شود نسبت میرایی به مقدار ۳۰ درصد میرایی بحرانی، ترکیبی از استهلاک سازه و استهلاک ناشی از وسایل اتلاف انرژی به‌عنوان حد بالای میرایی در نظر گرفته می‌شود که معمولاً حداکثر ۲۰ تا ۲۵ درصد آن استهلاک ناشی از وسایل اتلاف انرژی و مابقی استهلاک سازه می‌باشد [۱۲]. بنابراین تخمینی از بیشینه مقدار میرایی کاربردی وسایل اتلاف انرژی، در حدود ۲۰ درصد نسبت میرایی سازه اصلی به صورت $\omega_n = \sqrt{(10000/100)} = 10 \text{ rad/sec}$ و $c_{\max} = 2 \times 100 \times 10 \times 0.2 = 400 \text{ kN.sec/m}$ حد پایین میرایی کاربردی هم به مقدار $c_{\min} = 100 \text{ kN.sec/m}$ در نظر گرفته شده است که متناظر با مقدار میرایی سازه اصلی جداسازی نشده با نسبت میرایی ۵ درصد است. پارامترهای میراگر ارتباطی می‌تواند به شیوه مناسبی برحسب ویژگی‌های سازه اصلی جداسازی نشده به صورت زیر تعریف شود:

$$\zeta_l = \frac{c_l}{2m\omega_n}, \beta_l = \frac{k_l}{k} \quad (6)$$

بر اساس تحلیل‌های عددی انجام گرفته نتایج نسبت‌های میرایی مودال در س.ج.ق. با میراگرهای ویسکوز ارتباطی در قالب نمودارهای کانتور رنگی مطابق شکل (۲) ارائه شده است.

دکارتی سه‌بعدی است. محورهای صفحه افقی مختصات به ترتیب نسبت جرم و نسبت سختی^۵ سازه جداسازی شده به سازه اصلی انتخاب می‌شود. محور قائم نیز معرف نسبت پاسخ لرزه‌ای و یا هر خروجی مورد نظر مانند نسبت میرایی می‌باشد. روش دیگر ارائه نتایج که بیانی متفاوت از ارائه رویه سه‌بعدی می‌باشد، ارائه نتایج رویه به صورت نمودار کانتور رنگی^۶ است. نسبت‌های جرم و سختی برای زیرسازه نرم به صورت $\alpha_{m1} = m_1/m$ و $\alpha_{s1} = k_1/k$ تعریف می‌شود و نسبت‌های متناظر با آن در زیرسازه سخت $\alpha_{m2} = 1 - \alpha_{m1}$ و $\alpha_{s2} = 1 - \alpha_{s1}$ است. بر این اساس نتایج متناظر با زیرسازه سخت در تقارن مرکزی نسبت به زیرسازه نرم خواهد بود به طوری که مرکز تقارن نمودار متناظر با نقطه $(\alpha_m = 0.5, \alpha_s = 0.5)$ می‌باشد. در این شیوه ارائه، نتایج مرتبط با هر دو زیرسازه در یک نمودار گرافیکی نمایش داده می‌شود که دستیابی به یک درک مناسب و بهتر از رفتار جداسازی را امکان‌پذیر می‌سازد. در ادامه این محدوده نمایش، دستگاه مختصات جداسازی و نمایش سطح رویه در این دستگاه مختصات به صورت دو بعدی، نمودار کانتور رنگی نامیده می‌شود.

از ویژگی‌های دیگر ارائه نتایج به روش ذکر شده این است که قطر اصلی مرز جداسازی بین دو زیرسازه نرم و زیرسازه سخت است به طوری که با توجه به نسبت‌های جرم و سختی، نتایج زیرسازه نرم همواره در ناحیه مثلثی بالا و چپ قطر اصلی نمودار قابل دستیابی است. در حالی که بخش دیگر قطر اصلی یعنی ناحیه مثلثی پایین و راست نمودار، متناظر با نتایج زیرسازه سخت است. با توجه به نسبت جداسازی و موقعیت و محدوده پاسخ‌های مطلوب در این دستگاه مختصات مفاهیم متفاوتی از جداسازی مطرح می‌شود. در هر دو طرف قطر اصلی و موازی با آن، نواری میانی واقع است که به حالت اندرکنشی جداسازی موسوم است در حالی که نواحی نزدیک به کنج به حالت جداسازی جرمی ارتباط پیدا می‌کند. بخش کوچکی از ناحیه اندرکنشی در کناره سمت چپ ناحیه مثلثی به حالت کنترل جرمی جداسازی تفسیر

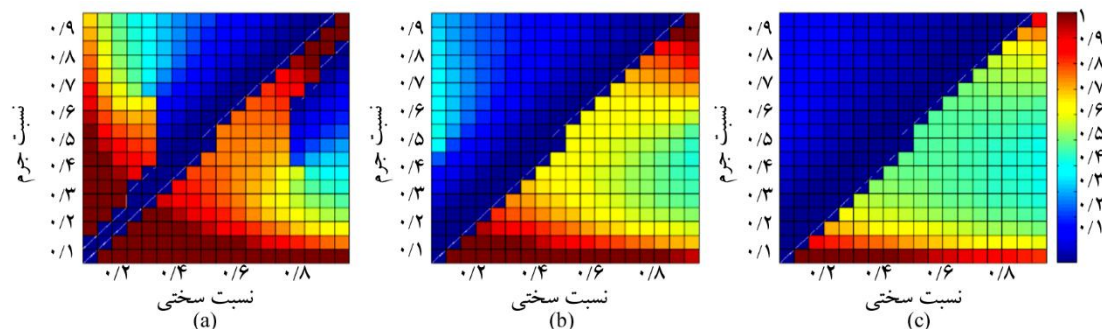


شکل (۲): نسبت‌های میرایی مودال در س.ج.ق. با میراگر ویسکوز ارتباطی به ازای مقادیر مختلف میرایی. (a) $\beta_1 = 5\%$, (b) $\beta_1 = 10\%$ و (c) $\beta_1 = 20\%$.

به میرایی بحرانی نزدیک نمی‌شود، حتی در میرایی‌های بزرگ میراگر روند نزولی پیدا می‌کند و به میرایی ذاتی سیستم متمایل می‌شود. در این حالت حرکت دو سیستم به یکدیگر قفل شده و به مود حرکت صلب موسوم است [۱۳]. با افزایش میرایی میراگر ناحیه فوق بحرانی به تدریج به تمام محدوده با مجموع نسبت جرم و سختی کوچک‌تر از یک، یعنی محدوده پایین قطر فرعی مختصات جداسازی، گسترش پیدا می‌کند و نسبت میرایی در ناحیه غیر بحرانی یعنی بالای قطر فرعی روندی نزولی پیدا می‌کند و قطر فرعی مرز بین میرایی فوق بحرانی و زیر بحرانی را تشکیل می‌دهد (شکل ۲- c).

در یک مجموعه از تحلیل‌ها به ازای یک مقدار ثابت میرایی میراگر ویسکوالاستیک، سختی میراگر از مقادیر کاربردی تا بزرگ تغییر داده شده و نسبت‌های میرایی مودال در س.ج.ق. مورد مطالعه قرار گرفته است. مشخصه‌های دینامیکی برای نسبت‌های جرم و سختی مختلف محاسبه شده و نتایج نسبت‌های میرایی مودال در شکل (۳) ارائه شده است.

در شکل (۲) نسبت میرایی مودال برای مود اول و مود دوم س.ج.ق. با میراگر ویسکوز ارتباطی در نسبت‌های مختلف جرم و سختی زیرسازه نرم (α_{s1} و α_{m1}) و به ازای سه مقدار متفاوت ضریب میرایی میراگر ارتباطی نشان داده شده است. در این نمودارهای کانتور رنگی قطر اصلی مرز جدایی نتایج متناظر با مود اول و مود دوم است، به طوری که برای یک زوج مقادیر α_{s1} و α_{m1} نسبت میرایی مود اول توسط یک نقطه در بالای قطر اصلی نمایش داده می‌شود، در حالی که نقطه متقارن مرکزی با آن در پایین قطر اصلی، نقطه‌ای متناظر با نسبت میرایی مود دوم است. با بررسی نمودارهای کانتوری از شکل (۲) این مطلب روشن می‌شود که با افزایش مقدار میرایی میراگر ارتباطی، نسبت‌های میرایی در هر دو مود س.ج.ق. افزایش می‌یابد و نسبت میرایی بزرگ‌تر در مود اول یا مود دوم می‌تواند اتفاق بیفتد. با محاسبه نسبت‌های میرایی به ازای مقادیر مختلف میرایی میراگر می‌توان اظهار کرد که نسبت میرایی در مود بزرگ‌تر رشد بیشتری پیدا می‌کند و بسیار سریع به سمت میرایی فوق بحرانی میل می‌کند در حالی که افزایش میرایی در مود کوچک‌تر، آهسته رشد کرده و هرگز



شکل (۳): نسبت‌های میرایی مودال در س.ج.ق. با میراگر ویسکوالاستیک ارتباطی به ازای یک مقدار ثابت میرایی. (a) $\beta_1 = 0.05$, (b) $\beta_1 = 20\%$ و (c) $\beta_1 = 0.5$, $\beta_2 = 20\%$.

است. به طوری که در این نمودار آشکار است زمان تناوب طبیعی سیستم در مود اول به زمان تناوب سازه اصلی نزدیک می شود در حالی که زمان تناوب سیستم در مود دوم در محدوده زمان تناوب های کوچک باقی می ماند که حالت دیگری از مود حرکت صلب را شامل می شود.

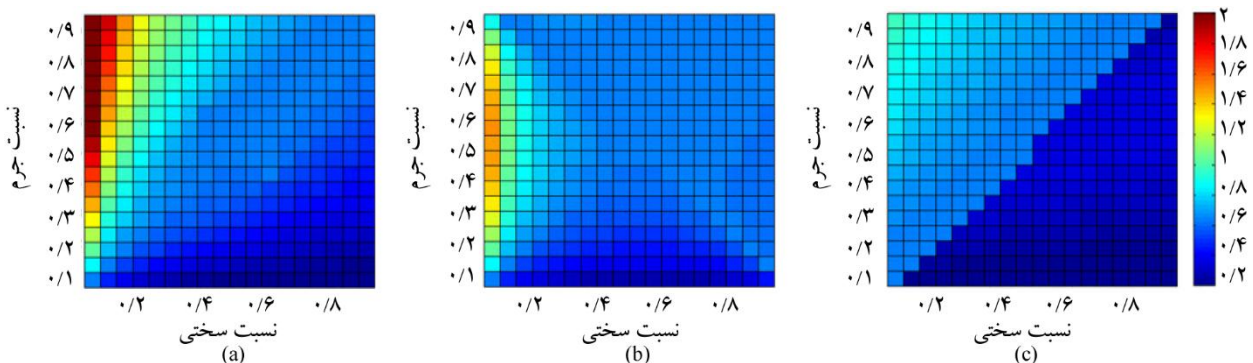
۶- پاسخ لرزه ای سازه های جداسازی شده قائم

در جداسازی لرزه ای قائم یک از اهداف اصلی تعیین محدوده های مناسبی از نسبت های جداسازی (α_{si} و α_{mi}) و پارامترهای میراگرهای ارتباطی متناسب با آن به گونه ای است که پاسخ لرزه ای در س.ج.ق. احتمال کاهش بیشتری داشته باشد. به این منظور در این تحقیق تحلیل های تاریخچه پاسخ متعددی به ازای نسبت های مختلف جرم و سختی در زلزله های مختلف انجام شده است. در س.ج.ق. با توجه به نامتناسب بودن ماتریس میرایی و معتبر نبودن فرض میرایی رایلی، تحلیل های تاریخچه پاسخ با حل عددی معادلات دیفرانسیل حرکت بر اساس روش رونگه-کوتا انجام شده است. حداکثر پاسخ تغییر مکان سازه یک درجه آزاد مبنای مقایسه پاسخ سازه اصلی با پاسخ تغییر مکان دو زیرسازه در ارزیابی عملکرد لرزه ای انتخاب شده است. نسبت پاسخ تغییر مکان برای هر دو زیرسازه نرم و سخت به صورت زیر تعریف شده است:

$$R_{Flexible} = \frac{X_{maxFlexible}}{X_{maxOriginal}} \quad R_{Stiffness} = \frac{X_{maxStiffness}}{X_{maxOriginal}} \quad (V)$$

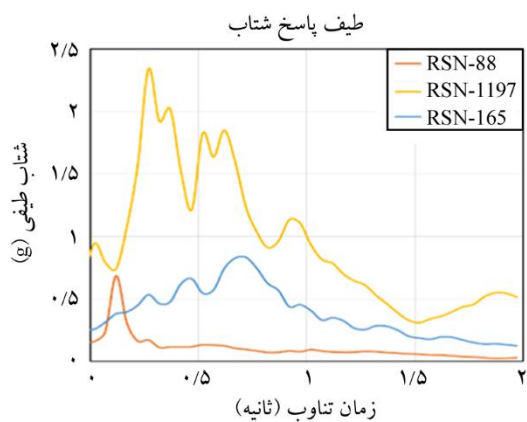
با بررسی نمودارهای کانتور رنگی در شکل (۳) مشاهده می شود با افزایش سختی میراگر ارتباطی، جابه جایی نسبت میرایی بزرگ تر از مود اول به مود دوم اتفاق می افتد و هم زمان نسبت میرایی در هر دو مود دچار کاهش می شود (شکل ۳-a و شکل ۳-b). در مقادیر بزرگ سختی میراگر، تأثیر میرایی میراگر در افزایش نسبت میرایی مودال به طور قابل ملاحظه ای کم می شود و نسبت میرایی مود اول به میرایی ذاتی سیستم تقلیل می یابد (شکل ۳-c).

نمایش زمان تناوب طبیعی س.ج.ق. در نسبت های مختلف جرم و سختی در قالب نمودار کانتور رنگی مطابق شکل (۴)، برای درک مناسب از تأثیر پارامترهای میراگر ارتباطی بر رفتار دینامیکی س.ج.ق. مفید می باشد. در نمودار شکل (۴-a) مشاهده می شود که در مقادیر کاربرد میرایی میراگر ارتباطی، زمان تناوب های طبیعی سیستم در مود اول و دوم س.ج.ق. در دامنه وسیعی پراکنده هستند. زمان تناوب های طبیعی سیستم به ازای یک مقدار بزرگ میرایی میراگر در نمودار شکل (۴-b) نشان داده شده است. در این نمودار آشکار است که با افزایش میرایی میراگر، زمان تناوب های سیستم در مود اول و دوم س.ج.ق. به زمان تناوب سازه اصلی نزدیک می شود. چنانچه گفته شد در مقادیر بزرگ میرایی میراگر ارتباطی این حالت به مود صلب موسوم است. در شکل (۴-c) به ازای یک مقدار بزرگ سختی میراگر، زمان تناوب های طبیعی س.ج.ق. نشان داده شده



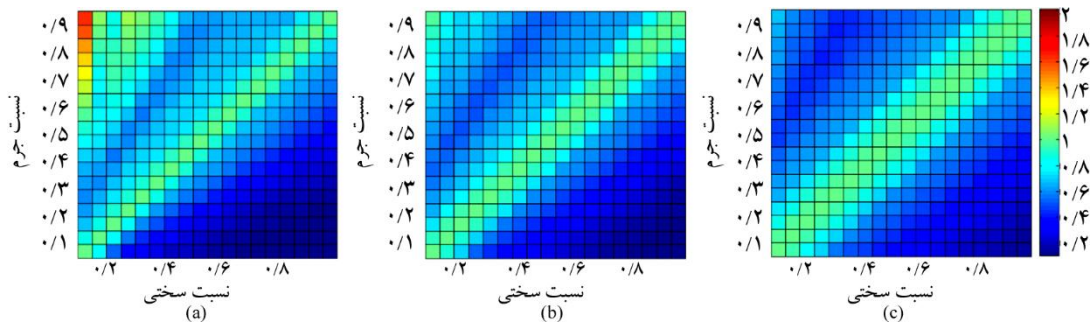
شکل (۴): مقادیر زمان تناوب طبیعی در س.ج.ق. با میراگر ویسکوز و ویسکوالاستیک. (a) $\beta_1=0, \beta_2=10\%, \beta_3=0.5$ و (b) $\beta_1=0, \beta_2=40\%, \beta_3=0$

ازای سه مقدار حد پایین، حد بالا و یک مقدار میانی میرایی کاربردی بر حسب نسبت میرایی β در نمودارهای کانتور رنگی ارائه شده است.

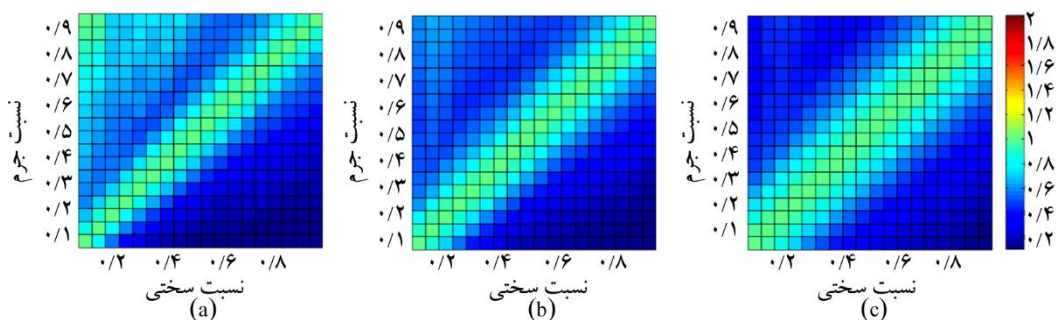


شکل (۵): طیف پاسخ شتاب زلزله‌های انتخابی.

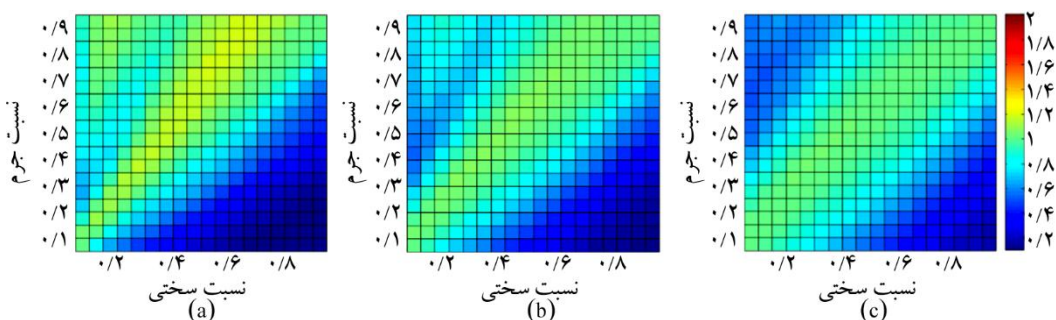
فرکانس غالب نگاهت ثبت شده زلزله و بیشینه شتاب طیفی آن در محدوده‌های مختلفی از زمان تناوب سازه‌ها قرار می‌گیرد. به طوری که در نمودارهای شکل (۴) نشان داده شده است زمان تناوب‌های س.ج.ق. در محدوده وسیعی پراکنده هستند. در محدوده‌هایی از نسبت جرم و سختی جداسازی که در آن زمان تناوب یکی از زیرسازه‌ها هماهنگ با فرکانس غالب رکورد زلزله باشد احتمال تشدید پاسخ وجود خواهد داشت. لذا از نگاهت‌هایی برای تحلیل استفاده شده است که بیشینه شتاب طیفی آنها در نواحی مختلف زمان تناوب در طیف پاسخ شتاب پراکنده باشد (شکل ۵). در شکل‌های (۶) تا (۸) نتایج محاسبات پاسخ س.ج.ق. با میراگرهای ویسکوز ارتباطی در هر یک از زلزله‌های مورد نظر به



شکل (۶): نسبت‌های پاسخ در س.ج.ق. به ازای پارامترهای مختلف میراگر ویسکوز ارتباطی در زلزله RSN88_SFERN. (a) $\beta=5\%$ ، (b) $\beta=10\%$ و (c) $\beta=20\%$.



شکل (۷): نسبت‌های پاسخ در س.ج.ق. به ازای پارامترهای مختلف میراگر ویسکوز ارتباطی در زلزله RSN1197_CHICHI. (a) $\beta=5\%$ ، (b) $\beta=10\%$ و (c) $\beta=20\%$.



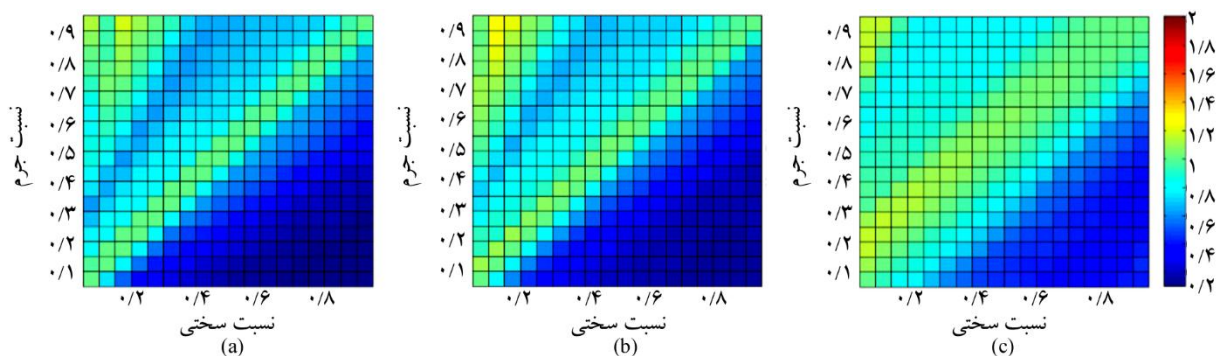
شکل (۸): نسبت‌های پاسخ در س.ج.ق. به ازای پارامترهای مختلف میراگر ویسکوز ارتباطی در زلزله RSN165_IMPVAL. (a) $\beta=5\%$ ، (b) $\beta=10\%$ و (c) $\beta=20\%$.

ابتدا به صورت نواری میانی موازی قطر اصلی شکل می گیرد. روند تشکیل این نوار میانی بر نقش مناسب اندرکنش سازه‌ای در کاهش پاسخ لرزه‌ای با استفاده از مقادیر کوچک میرایی دلالت دارد. با افزایش میرایی میراگر ارتباطی، در نمودار کانتور رنگی محدوده‌هایی با نسبت مطلوب به نواحی کناری و گوشه‌ها توسعه می‌یابد که در آن حالت جداسازی جرمی مطرح می‌شود (نمودارهای b در شکل‌های (۶) تا (۸)). در حد بالای میرایی کاربردی ($\xi_1=20\%$) در بیشتر نسبت‌های جرم و سختی، کاهش پاسخ لرزه‌ای در هر دو زیرسازه مطلوب است اگرچه این نسبت‌های پاسخ نسبت به مقادیر α_{m1} و α_{s1} تغییر می‌کنند اما در مقادیر بزرگ β_1 حساسیت پاسخ نسبت به مقادیر α_{m1} و α_{s1} و زلزله ورودی کاهش می‌یابد (نمودارهای c در شکل‌های (۶) تا (۸)).

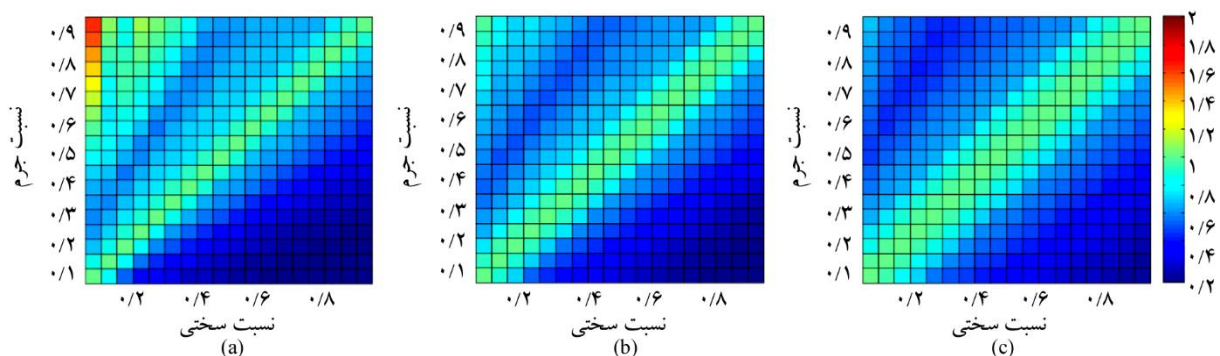
برای مطالعه پاسخ لرزه‌ای س.ج.ق. با میراگرهای ویسکوالاستیک ارتباطی، به ازای مقادیر مشخصی از میرایی میراگر، سختی میراگر β_1 تغییر داده شده و در یک مجموعه از تحلیل‌های تاریخیچه پاسخ، تأثیر این پارامترها بررسی شده است. در شکل‌های (۹) تا (۱۱) نتایج نسبت پاسخ س.ج.ق. نشان داده شده است.

ناحیه‌هایی در این نمودارها با نسبت پاسخ کوچک‌تر از واحد، نسبت‌هایی جداسازی را مشخص می‌کند که در آن کاهش پاسخ لرزه‌ای اتفاق می‌افتد. در این نمودارها، قطر اصلی یا مرز جدایی دو زیرسازه سخت و نرم با نسبت پاسخ واحد مشخص می‌شود. ناحیه پایین و راست قطر اصلی در بردارنده نتایج زیرسازه سخت است و تقریباً در بیشتر تحریک‌های زلزله و در بیشتر مقادیر α_{s1} و α_{m1} ، نسبت پاسخ به طور قابل ملاحظه‌ای کوچک‌تر از واحد است و نسبت‌های پاسخ در این بخش به مقادیر میرایی میراگرهای ارتباطی کمتر وابسته است. در نمودارهای کانتور رنگی ناحیه بالا و چپ قطر اصلی در بردارنده نتایج زیرسازه نرم است و نسبت‌های پاسخ در این بخش وابستگی بیشتری به نسبت جداسازی (α_{m1} و α_{s1})، پارامترهای میراگر ارتباطی و تحریک زلزله دارد، در نتیجه در ادامه بیشتر بحث جداسازی قائم در خصوص کنترل پاسخ سازه، معطوف به زیرسازه نرم خواهد بود.

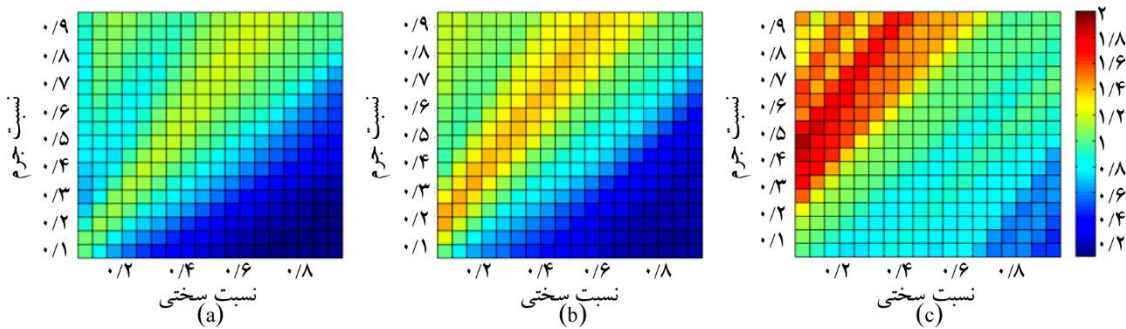
مطابق نمودارهای a در شکل‌های (۶) تا (۸) در حد پایین میرایی کاربردی ($\xi_1=5\%$)، در بالای قطر اصلی نواحی با نسبت پاسخ کوچک‌تر از واحد،



شکل (۹): نسبت‌های پاسخ در س.ج.ق. به ازای پارامترهای مختلف میراگر ویسکوالاستیک ارتباطی در زلزله RSN88_SFERN. $\xi_1=5\%$, $\beta_1=0.05$ (a) ، $\xi_1=5\%$, $\beta_1=0.1$ (b) ، $\xi_1=5\%$, $\beta_1=0.5$ (c)



شکل (۱۰): نسبت‌های پاسخ در س.ج.ق. به ازای پارامترهای مختلف میراگر ویسکوالاستیک ارتباطی در زلزله RSN1197_CHICHI. $\xi_1=5\%$, $\beta_1=0.05$ (a) ، $\xi_1=5\%$, $\beta_1=0.1$ (b) ، $\xi_1=5\%$, $\beta_1=0.5$ (c)

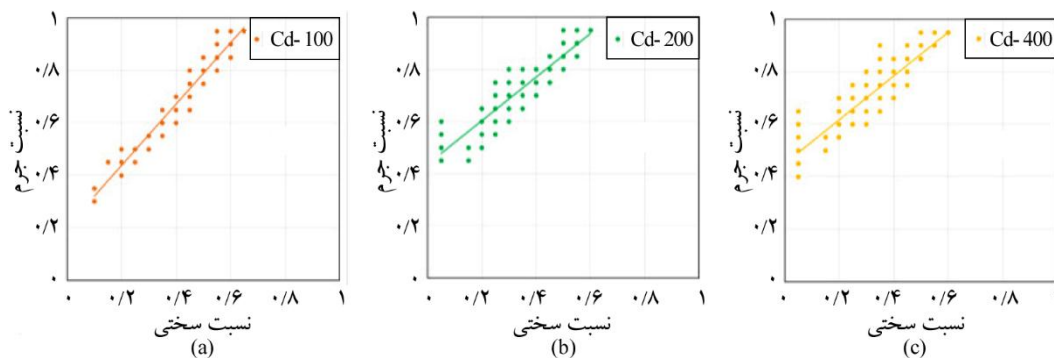


شکل (۱۱): نسبت‌های پاسخ در س.ج.ق. به ازای پارامترهای مختلف میراگر ویسکوالاستیک ارتباطی در زلزله RSN165_IMPVAL (a) $\beta_1=0.05$, $\xi_1=5\%$; (b) $\beta_1=0.1$, $\xi_1=5\%$; (c) $\beta_1=0.5$, $\xi_1=5\%$.

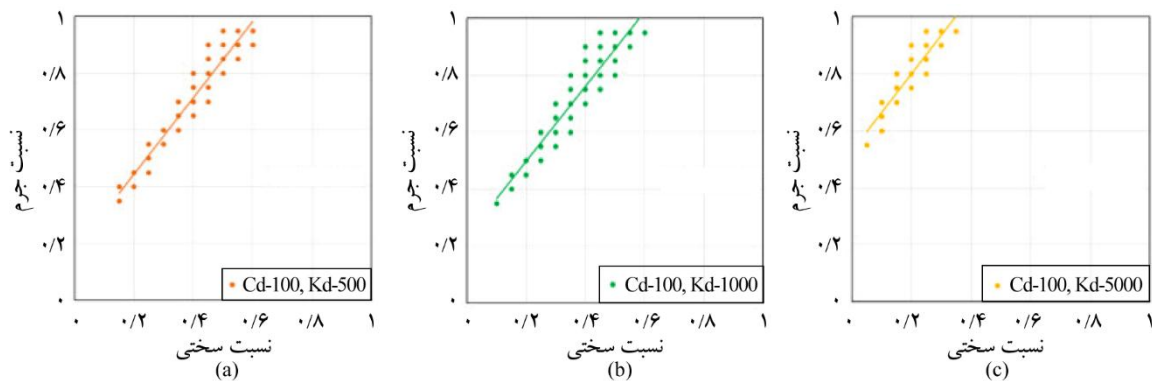
۷- محدوده‌های بهینه از نسبت جرم و سختی در س.ج.ق.

علیرغم اینکه نمودارهای کانتور رنگی اطلاعات و درک بسیار مناسبی از رفتار و کنترل پاسخ در س.ج.ق. به صورت کیفی فراهم می‌آورد، اما مطالعات کمی و عددی رفتار جداسازی قائم برای پیشنهاد نسبت‌های جداسازی مناسب، با لحاظ کردن مقادیر پارامترهای میراگرهای ارتباطی دارای اهمیت فراوان است. برای هر یک از نمودارهای کانتور رنگی مقادیری از α_{sl} و α_{ml} که در آن نسبت‌های پاسخ دو زیرسازه سخت و نرم کوچک‌تر از $1/10$ باشد در نظر گرفته می‌شود. با ملاحظه میزان پراکندگی نسبت‌های پاسخ قابل قبول، مجموعه‌ای از زوج‌های مطلوب از α_{sl} و α_{ml} با کمینه نسبت پاسخ، انتخاب و توزیع آنها در یک دستگاه مختصات جداسازی نمایش داده می‌شود. جهت اختصار تنها برای یکی از زلزله‌های انتخابی، پراکندگی این نقاط در پارامترهای مختلف میراگرهای ویسکوز و ویسکوالاستیک در شکل (۱۲) و شکل (۱۳) نشان داده شده است. جدول (۱) نیز مقادیر میانگین و انحراف استاندارد مقادیر انتخابی از α_{sl} و α_{ml} و نسبت‌های پاسخ در زلزله مورد نظر آورده شده است.

با مقایسه نمودارهای نتایج جداسازی قائم با میراگرهای ویسکوز و ویسکوالاستیک این نکته دریافت می‌شود که به طور کلی رفتار لرزه‌ای س.ج.ق. در این دو حالت از یک روند مشخص تبعیت می‌کند. چنانچه در نمودارهای شکل a و b از شکل‌های (۹) تا (۱۱) نشان داده شده سختی میراگر نقش متفاوتی در پاسخ دو زیرسازه نرم و سخت ایفا می‌کند. سختی میراگر بر پاسخ زیرسازه سخت تأثیر قابل ملاحظه‌ای نداشته و حتی در محدوده‌های کاربردی سختی میراگر، $\beta_1=0.05$ و $\beta_1=0.1$ کاهش پاسخ بیشتری را نسبت به جداسازی با میراگرهای ویسکوز موجب شده است. این نکته باید متذکر شود که سختی میراگر ارتباطی اثرات استهلاک میراگر را کاهش می‌دهد، در نتیجه بر نسبت پاسخ زیرسازه نرم به ویژه در نواحی اندرکنشی تأثیر می‌گذارد، اما برای مقادیر کوچک و کاربردی سختی میراگر ($\beta_1 \leq 0.1$)، تأثیر آن چندان قابل توجه نیست (نمودارهای شکل a و b در شکل‌های (۹) تا (۱۱))، در صورتی که در مقادیر بزرگ سختی، اثرات میرایی میراگر را در کاهش پاسخ هر دو زیرسازه تقلیل می‌دهد (نمودارهای شکل c در شکل‌های (۹) تا (۱۱)).



شکل (۱۲): نقاطی با نسبت پاسخ بهینه و خط برازش متناظر آن برای س.ج.ق. با میراگرهای ویسکوز در زلزله RSN1197_CHICHI (a) $\xi_1=5\%$; (b) $\xi_1=10\%$ و $\beta_1=20\%$.



شکل (۱۳): نقاطی با نسبت پاسخ بهینه و خط برازش متناظر برای س.ج.ق. با میراگرهای ویسکوالاستیک در زلزله RSN1197_CHICHI. $\beta_1=5\%$, $\beta_1=0.1$ (b) و $\beta_1=0.5$, $\beta_1=5\%$.

اندرکنشی جداسازی قائم مورد استفاده قرار گیرد:

$$\alpha_{ml} = m' \cdot \alpha_{s1} + b \quad (8)$$

که در آن m' شیب و b عرض از مبدأ خط است. در محدوده کاربردی پارامترهای میراگر ارتباطی، یعنی $20\% \leq \beta_1 \leq 5\%$ و $\beta_1 \leq 0.1$ ، مقادیر اولیه طراحی مناسب برای m' و b به صورت زیر پیشنهاد می شود:

$$1.1 < m' < 1.2, \quad 0.2 < b < 0.5 \quad (9)$$

همچنین، لازم به یادآوری است که هر میزان نقطه متناظر با مقادیر زوج α_{s1} و α_{m1} به نواحی جداسازی جرمی در مختصات جداسازی نزدیک تر می شود، برای کاهش پاسخ لرزه ای مطلوب استفاده از مقادیر بزرگ میرایی کاربردی میراگر ارتباطی، β_1 ، اجتناب ناپذیر می باشد.

مشاهده شکل (۱۲) و شکل (۱۳) و بررسی جدول (۱) در این زلزله و سایر زلزله های مورد بررسی بیانگر این موضوع است که جداسازی لرزه ای قائم مستقل از نگاهت ورودی، به بعضی عملکردها و رفتارهای مشخصی در س.ج.ق. منجر می شود، به طوری که می تواند در انتخاب نسبت های جداسازی کاربردی، میراگر مناسب و پارامترهای بهینه یاری کننده باشد. منحنی برازش نسبت های جداسازی بهینه در مختصات جداسازی تقریباً به صورت یک خط با شیب ثابت در بیشتر زلزله ها به دست آمده است. این ویژگی انتخاب های متعددی را برای نسبت های جرم و سختی (α_{s1} و α_{m1}) به خصوص با مقادیر کوچک و متوسط میرایی در ناحیه اندرکنشی فراهم می آورد. محدوده معادله خطوط برازش در زلزله های مختلف که به صورت زیر بیان می شود می تواند به عنوان یک معیار مقدماتی در طراحی اولیه سازه های جدید برای بهره بردن از حالت

جدول (۱): میانگین و انحراف استاندارد مقادیر نسبت های پاسخ مطلوب در زلزله RSN1197_CHICHI

میراگر ویسکوالاستیک						میراگر ویسکوز						
R _{Stiff}	R _{Flexible}	α_{m1}	α_{s1}	QTY	β_1	$\beta_1\%$	R _{Stiff}	R _{Flexible}	α_{m1}	α_{s1}	QTY	$\beta_1\%$
۰/۲۶	۰/۵۷	۰/۷۱	۰/۳۹	Value	۰/۰۵	۵	۰/۳۵	۰/۵۳	۰/۶۷	۰/۴	Value	۵
۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۱۸	۰/۱۳	SD			۰/۱۳	۰/۰۲	۰/۱۹	۰/۱۶	SD	
۰/۲۳	۰/۶	۰/۷۲	۰/۳۷	Value	۱/۰	۵	۰/۲۹	۰/۴۸	۰/۷۱	۰/۳۲	Value	۱۰
۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۱۷	۰/۱۲	SD			۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۱۶	SD	
۰/۳	۰/۶۹	۰/۸	۰/۲	Value	۰/۰۵	۵	۰/۲۹	۰/۴۸	۰/۷۱	۰/۳۲	Value	۲۰
۰/۰۲	۰/۰۲۳	۰/۱۲	۰/۰۸	SD			۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۱۶	SD	

است. در جدول (۳) نتایج عددی جداسازی قائم به ازای نسبت‌های مختلف جداسازی در عملکردهای مختلف ارائه شده است. نتایج این جدول به عملکرد مناسب حالت اندرکنشی جداسازی دلالت دارد، به طوری که رسیدن به کاهش ۴۰ درصدی در پاسخ لرزه‌ای زیرسازه نرم و بیشتر از آن در زیرسازه سخت امکان پذیر می‌نماید. علاوه بر آن وابستگی بیشتر پاسخ زیرسازه نرم به مقدار میرایی میراگر ارتباطی در مقایسه با زیرسازه سخت مشهود است.

جدول (۲): مشخصات دینامیکی ساختمان ۵ طبقه.

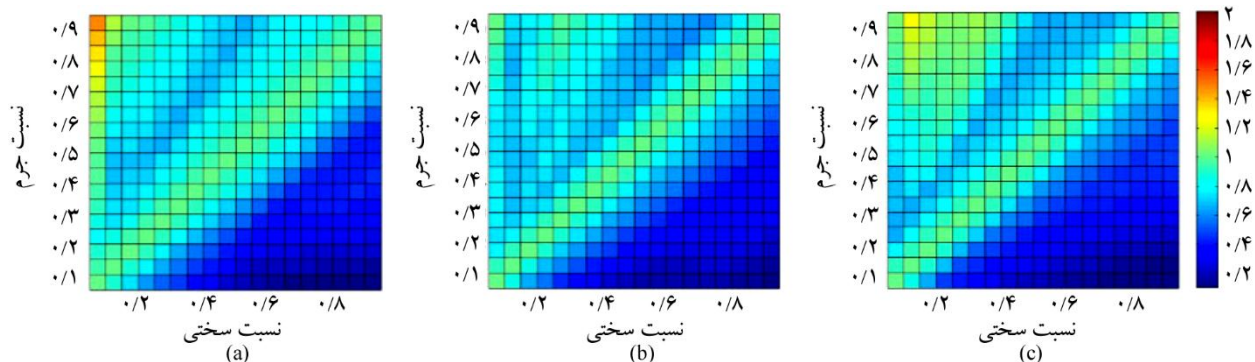
K* (kN/m)	M* (ton)	T (sec)	ω (rad/sec)	k (kN/m)	m (ton)	Mode/ Story No.
۱۲۷۷۵	۴۱۷/۷۴	۱/۱۳۶	۵/۵۳	۴۵۰۰۰	۱۰۰	۱
۱۰۹۵۵	۵۲/۵۲	۰/۴۳۴	۱۴/۴۸	۴۰۰۰۰	۱۰۰	۲
۹۳۰۱	۱۸/۳۴	۰/۲۷۹	۲۲/۵۲	۳۵۰۰۰	۱۰۰	۳
۶۹۲۰	۷/۷۳	۰/۲۱	۲۹/۹۲	۳۰۰۰۰	۱۰۰	۴
۵۱۵۵	۳/۹۱	۰/۱۷۳	۳۶/۳۱	۲۰۰۰۰	۱۰۰	۵

M K به ترتیب جرم و سختی مؤثر مودی می‌باشد.

۸- جداسازی لرزه‌ای قائم در یک ساختمان چندطبقه

برای امکان استفاده از نتایج جداسازی سازه یک طبقه در ساختمان‌های کوتاه چند طبقه، عملکرد جداسازی لرزه‌ای قائم در یک ساختمان ۵ طبقه که مشخصات دینامیکی آن در جدول (۲) آورده شده بررسی می‌شود. مشابه روش به کار گرفته شده در سازه یک طبقه، تخمین محدوده‌های پایین و بالای مقادیر کاربردی میرایی میراگرها در سازه ۵ طبقه، متنظر با نسبت میرایی بحرانی، بر حسب جرم مؤثر مودی سازه اصلی چند طبقه در مود اول منظور شده است. مقادیر میرایی محاسبه شده به صورت یکنواخت در میراگرهای ارتباطی طبقات سازه جداسازی شده توزیع شده است. ارزیابی نسبت پاسخ با محاسبه بیشینه تغییر مکان نسبی طبقات س.ج.ق. و سازه اصلی انجام گرفته است. نمودار کانتور رنگی نسبت‌های پاسخ به ازای مقدار میانی میرایی میراگر، $\xi_1=10\%$ در زلزله‌های انتخابی در شکل (۱۴) ارائه شده است.

بررسی نمودارهای کانتور رنگی نشان می‌دهد که رفتار کلی جداسازی در حالت یک طبقه و چند طبقه با یکدیگر انطباق مناسبی دارند. علاوه بر آن، این تحلیل‌ها از حساسیت کمتر جداسازی ساختمان‌های چند طبقه به تحریک زلزله‌های ورودی و نسبت‌های جداسازی حکایت دارد. همچنین عملکرد مناسب رفتار اندرکنشی در مقایسه با جداسازی جرمی از سختی به خصوص در مقادیر میانی و پایین میرایی‌های کاربردی آشکار



شکل (۱۴): نسبت‌های پاسخ در س.ج.ق. ۵ طبقه با میراگر ویسکوز ارتباطی در نسبت میرایی $\xi_1=10\%$. a) RSN1197_CHICHI b) RSN88_SFERN c) RSN1165_IMPVAL

جدول (۳): نتایج عددی جداسازی قائم ساختمان ۵ طبقه در نسبت‌های جداسازی مختلف.

RSN165_IMPVAL		RSN1197_CHICHI		RSN88_SFERN		ξ%	β _i	α _{m1}	α _{s1}	
R _{Stiff}	R _{Flexible}	R _{Stiff}	R _{Flexible}	R _{Stiff}	R _{Flexible}					
۰/۲۸	۱/۳۱	۰/۳	۱/۲	۰/۳۶	۱/۱۷	۵	۰	۰/۸	۰/۲	جداسازی جرمی
۰/۲۵	۱/۰۴	۰/۳	۰/۹۴	۰/۲۸	۰/۹۱	۱۰				
۰/۲۷	۰/۷	۰/۳	۰/۶۹	۰/۲۷	۰/۵۹	۲۰				
۰/۲۱	۱/۰۸	۰/۲۹	۱/۰۷	۰/۲۶	۰/۹۱	۱۰	۰/۱			
۰/۷۲	۰/۷۷	۰/۷۷	۰/۸۶	۰/۸۵	۰/۸۴	۵	۰	۰/۳	۰/۲	کنترل جرمی
۰/۷۸	۰/۷۹	۰/۸۱	۰/۸۲	۰/۸۵	۰/۸۴	۱۰				
۰/۸۵	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۸۸	۰/۸۹	۰/۹	۲۰				
۰/۷۷	۰/۸۷	۰/۷۳	۰/۸۶	۰/۸۳	۰/۹۷	۱۰	۰/۱			
۰/۵۷	۰/۸۱	۰/۶۷	۱/۰۲	۰/۵	۰/۷۵	۵	۰	۰/۵	۰/۲۵	
۰/۵۶	۰/۶۸	۰/۶	۰/۸۲	۰/۵۷	۰/۶۶	۱۰				
۰/۵۹	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۶	۰/۷	۲۰				
۰/۵	۰/۷۳	۰/۵۳	۰/۸۶	۰/۵۲	۰/۸۱	۱۰	۰/۱			
۰/۵۸	۰/۷۹	۰/۷	۰/۸۹	۰/۵۷	۰/۸۶	۵	۰	۰/۶	۰/۴	اندرکنشی
۰/۵۷	۰/۷۲	۰/۶۵	۰/۸۲	۰/۶۶	۰/۷۸	۱۰				
۰/۶۳	۰/۷	۰/۷	۰/۷۵	۰/۷	۰/۷۶	۲۰				
۰/۵	۰/۷۵	۰/۵۹	۰/۸۳	۰/۶۲	۰/۹۲	۱۰	۰/۱			
۰/۵	۱/۱۴	۰/۳۳	۱/۱	۰/۴۸	۰/۸۷	۵	۰	۰/۷	۰/۳	
۰/۴	۰/۹۲	۰/۳۷	۰/۸۸	۰/۴۱	۰/۷۴	۱۰				
۰/۳۹	۰/۶۷	۰/۴۳	۰/۶۷	۰/۴۱	۰/۶	۲۰				
۰/۳۵	۰/۹۲	۰/۳۲	۰/۹۴	۰/۳۸	۰/۷۵	۱۰	۰/۱			

۹- خلاصه بحث و نتیجه گیری

اندرکنشی می‌باشد. بر این اساس، ملاحظات زیر به‌عنوان

نتیجه‌گیری این پژوهش بیان می‌شود:

- ۱- با به‌کارگیری تکنیک جداسازی لرزه‌ای قائم در ساختمان‌های یک طبقه، با استفاده از رابطه پیشنهادی (۸) برای نسبت‌های جداسازی، α_{m1} و α_{s1} ، کاهش پاسخ لرزه‌ای تا ۴۰ درصد در زیرسازه نرم و حتی بیشتر از آن در زیرسازه سخت با عملکرد اندرکنشی قابل‌دستیابی است. در این حالت با به‌کارگیری میرایی میراگر ارتباطی در تمام محدوده کاربردی، کاهش پاسخ لرزه‌ای امکان‌پذیر است. اما با

نتایج تحلیل‌های متعدد با تحریک زلزله‌های مختلف دلالت بر این دارد که با به‌کارگیری پارامترهای مناسب میراگرهای ارتباطی، متناسب با نسبت‌های جداسازی جرم و سختی، جداسازی قائم می‌تواند به کاهش پاسخ لرزه‌ای در سطح مطلوبی منجر شود. با توجه به مقادیر نسبت‌های جرم و سختی، سه حالت مختلف از جداسازی از هم تمیز داده می‌شود، حالت‌های موسوم به کنترل جرمی و جداسازی جرمی که دو حالت کرانه‌ای می‌باشند و یک حالت میانه از جداسازی لرزه‌ای قائم که حالت

- (2013) Closed-form equations for coupling linear structures using stiffness and damping elements. *Structural Control and Health Monitoring*, **20**(3), 259-281.
3. Zhang, W. and Xu Y. (1999) Dynamic characteristics and seismic response of adjacent buildings linked by discrete dampers. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **28**(10), 1163-1185.
 4. Zhang, W. and Xu Y. (2000) Vibration analysis of two buildings linked by Maxwell model-defined fluid dampers. *Journal of Sound and Vibration*, **233**(5), 775-796.
 5. Zhu, H. and Xu Y. (2005) Optimum parameters of Maxwell model-defined dampers used to link adjacent structures. *Journal of Sound and Vibration*, **279**(1), 253-274.
 6. Zhu, H., Ge, D. and Huang, X. (2011) Optimum connecting dampers to reduce the seismic responses of parallel structures. *Journal of Sound and Vibration*, **330**(9), 1931-1949.
 7. Skinner, R.I., Robinson, W.H., and McVerry, G.H. (1993) *An Introduction to Seismic Isolation*. John Wiley & Sons.
 8. Ziyaeifar, M. (2000) Method of mass isolation in seismic design of structures. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*.
 9. Nekooei, M. and Ziyaeifar, M. (2008) Vertical Seismic Isolation of Structures. *Journal of Applied sciences*, **8**(24).
 10. Nekooei, M. and Ziyaeifar, M. (2008) Spectral investigation on the seismic behaviour of vertical mass isolated structures against Earthquake. *The 14th World Conf. on Earthquake Engineering*.
 11. Nekooei, M. and Ziyaeifar, M. (2009) *Spectral Investigation on Behaviour of Mass Isolated Structures and Their Semi-Active Control against Earthquakes*. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE)*, 10(Special Issue), 243-252 (in Persian).
 12. Lee, D. and Taylor, D.P. (2001) Viscous damper

استفاده از مقادیر بزرگ تری برای میرایی میراگر، حساسیت جداسازی به نسبت جداسازی و مشخصه‌های زلزله ورودی کمتر شده و سیستم با قابلیت اطمینان بیشتری رفتار می‌کند.

۲- در مفهوم جداسازی جرمی، عمده جرم و سختی سازه به طور مجزا به هر یک از زیرسازه‌های جداسازی شده تخصیص داده می‌شود. محدوده‌های پیشنهادی برای نسبت جداسازی، $\alpha_{sl} \leq 0.2$ و $\alpha_{ml} \geq 0.8$ در این حالت در زیرسازه نرم است که انتخاب محدودی را برای نسبت جداسازی فراهم می‌آورد. در این رویکرد پاسخ تغییر مکان در زیرسازه نرم مورد توجه قرار می‌گیرد و برای کنترل پاسخ با قابلیت اطمینان مناسب، استفاده از میرایی در محدوده‌های بالای مقادیر کاربردی یعنی، $15\% \leq \beta_1 \leq 20\%$ اجتناب‌ناپذیر است.

۳- در جداسازی قائم افزایش مقدار میرایی میراگر ارتباطی در محدوده میرایی کاربردی به کاهش نسبت پاسخ در هر دو زیرسازه منجر می‌شود اما پاسخ زیرسازه نرم در مقایسه با زیرسازه سخت، وابستگی بیشتری به مقدار میرایی میراگر ارتباطی دارد.

۴- سختی میراگرهای ویسکوالاستیک ارتباطی در محدوده کاربردی، $\beta_1 \leq 0.1$ بر پاسخ زیرسازه نرم تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد، درحالی که می‌تواند منجر به کاهش بیشتر نسبت پاسخ در زیرسازه سخت گردد.

نتایج تحلیل س.ج.ق. از حساسیت کمتر جداسازی ساختمان‌های چند طبقه به تحریک زلزله‌های ورودی و نسبت‌های جداسازی حکایت دارد. همچنین عملکرد مناسب رفتار اندرکنشی در مقایسه با جداسازی جرمی به خصوص در مقادیر میانی و پایین میرایی‌های کاربردی آشکار است.

مراجع

1. Klein, R., Todaro, A., and Finne, I. (1972) *Investigation of a Method to Stabilize Wind Induced Oscillations in Large Structures*. American Society of Mechanical Engineers.
2. Richardson, A., Walsh, K.K., and Abdullah, M.M.

development and future trends. *The Structural Design of Tall Buildings*, **10**(5), 311-320.

13. Ziyaeifar, M., Gidfar, S., and Nekooei, M. (2012) A model for mass isolation study in seismic design of structures. *Structural Control and Health Monitoring*, **19**(6), 627-645.

واژه‌نامه

Runge-Kutta	۱- رونگه- کوتا
Mass Ratio	۲- نسبت جرم
Underdamped System	۳- سیستم با میرایی زیر بحرانی
Mixed-Damped System	۴- سیستم با مودهای ترکیبی
Stiffness Ratio	۵- نسبت سختی
Color Contour Graph	۶- نمودار کانتور رنگی

Vertical Seismic Isolation by Viscous and Visco-Elastic Dampers Based on Different States Performance for Response Reduction

Reza Milanchian¹, Mahmood Hosseini^{2*} and Masoud Nekooei³

1. Assistant Professor, 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: hosseini@iiees.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Structural Engineering, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

In this paper, vertical seismic isolation (VSI) of a building for seismic response reduction by partitioning its structure into two different dynamically behavior substructures and linking them together by viscous or visco-elastic links was investigated. To have a better understanding of the VSI features, study of a sample one-story single frame was supposed to be helpful. The Kelvin model was employed to represent the visco-elastic damper for which the stiffness and the damping coefficients are k_l and c_l respectively.

In the vertically isolated structures (VIS) by using viscous or visco-elastic dampers, the influence of system dynamic characteristics, including natural frequencies and modal damping ratios in response reduction was of interest. In a comprehensive study, eigenvalue analyses of non-classically damped system were performed. These analyses were also carried out for different parameters of the connecting link.

In this study, color contour graphs were employed for presenting the results. The more important advantage of this representation is creating the possibility to observe results of both stiff and flexible isolated structures in one individual graph. This graphical representation was called Vertical Isolation Contour Graph (VICG).

Various ratios were considered for mass and stiffness of either of the two substructures to the mass and stiffness of the original structure to find out which ratios or range of ratios result in maximum seismic response reduction. Depending on these mass and stiffness ratios, three states of Mass Isolation, Interactional State, and Control Mass were differentiated in isolation behavior.

To study the seismic performance of the one-story VIS, its response histories subjected to different earthquake excitations were obtained by a series of time history analysis (THA) cases. In these analyses, the aim was examining the effects of different parameters on the efficiency of the VSI. In the VSI, one of the main goals was the determination of an appropriate range of mass and stiffness ratios and the associated interconnecting link parameters to achieve the maximum possible seismic response reduction. To solve the governing differential equations of motion numerically, a program, developed by the authors in MATLAB environment based on Runge-Kutta method, was employed. Response ratios that Compare maximum displacements of each substructure of the isolated structure with that of the original structure were taken into account as the VSI performance assessment.

The results of numerous analyses on different earthquakes excitation, performed in this study, implied that employing appropriate link parameters, proportional to mass and stiffness ratios, can lead to satisfactory levels of seismic response reduction. To investigate the advantage of the VSI in low-rise multi-story buildings, the seismic performance of a five-story building with the VIS was also studied. Based on the VICGs, it was observed that response ratios are satisfactory in the short multi-story buildings for both short-period and long-period earthquakes.

The following remarks can be stated as the conclusions of this study:

- By applying the VSI technique to low-rise multi-story buildings in Interactional State, up to 40% decrease in the seismic response of flexible substructure and even more in the stiff substructure is achievable.
- In the Mass Isolation state of the VSI, it is inevitable to use relatively large values of practical link damping as 15 to 20% to achieve the reliable response reduction.
- Link stiffness in the practical range less than 10% of the original structure does not affect response reduction of the flexible substructure.
- In the Interactional State of the VSI, it is practical to select a wide variety of mass and stiffness ratios with different link damping values.
- The values of inter-story drifts in low-rise multi-story VSI buildings is less sensitive to input earthquakes characteristics.

Keywords: Vertical Seismic Isolation; Non-Classical Damping; Viscous and Visco-Elastic Dampers; Runge-Kutta Method; Response History Analyses.