

جداسازی قائم ساختمان‌های یک طبقه با میراگرهای مایع لزج غیرخطی برای کاهش پاسخ لرزه‌ای

رضا میلانچیان^۱، محمود حسینی*^۲ و مسعود نکویی^۳

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی
^۲ دانشیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، پژوهشکده مهندسی سازه، تهران
^۳ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی

(دریافت: ۹۶/۳/۱۲، پذیرش: ۹۷/۴/۲۴، نشر آنلاین: ۹۷/۴/۲۴)

چکیده

در جداسازی لرزه‌ای قائم با اعمال صفحات جداساز قائم یک ساختمان به دو زیرسازه با مشخصات دینامیکی متفاوت با هدف کاهش پاسخ لرزه‌ای جداسازی می‌گردد. در این مطالعه ابتدا ویژگی‌های جداسازی قائم با میراگر خطی بررسی شده است. دستگاه مختصاتی به‌عنوان مختصات جداسازی و نمودارهای نگاره‌ای که بیانگر نحوه پاسخ لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده می‌باشد معرفی شده و بر اساس آن سه حالت جداسازی جرمی، اندرکنشی و کنترل جرمی از هم تمیز داده شده است. در ادامه رفتار میراگر مایع لزج غیرخطی در یک سازه یک درجه آزاد تحت اثر بارگذاری هارمونیک مورد مطالعه قرار گرفته و معیاری برای مقایسه پاسخ لرزه‌ای میراگرهای خطی و غیرخطی بر اساس ظرفیت نیروی میراگر پیشنهاد شده است. با انتخاب مجموعه‌ای از رکوردهای زلزله با پرید غالب در محدوده‌های مختلف طیف شتاب و انجام تحلیل‌های تاریخچه پاسخ غیرخطی، کاربرد میراگر مایع لزج غیرخطی در جداسازی قائم به طور جامع مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج مطالعه دلالت بر این داشت که تکنیک جداسازی قائم یک روش کارآمد برای کاهش پاسخ لرزه‌ای با هر دو میراگر مایع لزج خطی و غیرخطی با توان سرعت در محدوده $0.5 \leq \alpha < 1.0$ می‌تواند در نظر گرفته شود، به طوری که کاهش پاسخ تا ۴۰ درصد در زیرسازه نرم و بیشتر از آن در زیرسازه سخت قابل دستیابی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: جداسازی لرزه‌ای قائم، کاهش پاسخ لرزه‌ای، میراگر مایع لزج غیرخطی، روش عددی رونگه-گوتا.

۱- مقدمه

میرایی قابل توجهی را در مقادیر کوچک سرعت ایجاد می‌نمایند در حالی که مقدار نیروی میراگر در سرعت‌های بزرگ را نیز به خوبی محدود می‌کنند.

در دستورالعمل‌های کنونی طراحی سیستم‌های سازه‌ای با وسایل استهلاک الحاقی، از میرایی معادل لزج مبتنی بر روش‌های استهلاک انرژی برای بیان ویژگی‌های وابسته به زمان بهره گرفته شده است (FEMA, ۱۹۹۷).

Terenzi (۱۹۹۹) تأثیر میراگرهای مایع لزج غیرخطی بر پاسخ دینامیکی سازه یک درجه آزاد را مورد ارزیابی قرار داد و روابط تحلیلی برای مدل‌سازی رفتار مکانیکی این میراگرها پیشنهاد داد. به دلیل وابستگی غیرخطی رفتار میراگر مایع لزج غیرخطی به سرعت، Pekcan و همکاران (۱۹۹۹) روشی جایگزینی را برای تبدیل انرژی مستهلک شده به میرایی معادل بر اساس ملاحظات تغییرات توان ارائه کردند Lin و Chopra (۲۰۰۲)

مبانی طراحی لرزه‌ای سازه‌ها در آئین‌نامه‌های فعلی بر اساس شکل‌پذیری می‌باشد. در این روش ظرفیت جذب انرژی در المان‌هایی مشخصی از سازه ایجاد می‌گردد. 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.

در روش‌های نوین کنترل و تکنیک‌های جدید طراحی لرزه‌ای، استفاده از میراگر مایع لزج همواره مورد توجه بوده است. امکان به‌کارگیری این میراگر در بخش‌های مختلف یک سازه استفاده از آن‌ها را در صنعت ساختمان و در روش‌های جدید طراحی فراگیر نموده است. هم‌اکنون با فناوری‌های جدید، میراگرهای مایع لزج غیرخطی با توان‌های سرعت کوچکی ساخته می‌شوند که نیروهای

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۹۱۲-۸۰۹۳۱۰۲

نیروهای عکس‌العملی ناشی از استهلاک انرژی وسایل کنترلی را تحمل می‌کنند، یک مدل دو درجه آزاد برای بهبود عملکرد مکانیسم‌های سازه‌ای آن ارائه کردند.

اخیراً Milanchian و همکاران (۲۰۱۷) جداسازی قائم با میراگرهای ارتباطی مایع لزج و لزج-کشسان را به‌عنوان یک تکنیک کاهش پاسخ لرزه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. در آن بررسی محدوده‌های بهینه برای پارامترهای میراگر ارتباطی با توجه به نسبت جداسازی پیشنهاد و سه عملکرد جداسازی جرمی، اندرکنشی و کنترل جرمی از هم تمیز داده شد. در آن مطالعه کاربرد جداسازی قائم در یک ساختمان چند طبقه مورد بررسی قرار گرفت.

در این پژوهش کارایی تکنیک جداسازی قائم در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده قائم (س. ج. ق) با میراگرهای مایع لزج غیرخطی مطالعه شده است. در بررسی عملکرد جداسازی قائم با میراگر غیرخطی ابتدا ویژگی‌های میرایی غیرخطی در یک سازه یک درجه آزاد در مواجهه با یک بارگذاری هارمونیک مطالعه شده است. از آنجایی‌که در تحریک زلزله پاسخ یک سیستم طبیعت گذرا دارد، میرایی غیرخطی نیز در پاسخ حالت گذرا مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. سپس معیاری برای مقایسه میراگرهای خطی و غیرخطی بر حسب توان‌های مختلف سرعت بر اساس ظرفیت نیروی میراگر پیشنهاد شده است.

در این مطالعه تحلیل‌های تاریخچه پاسخ متعددی در نسبت‌های جرم و سختی مختلف نسبت به سازه اصلی با استفاده از روش عددی رونگه-کوتا در زلزله‌های مختلف انجام گرفته است. نسبت‌های پاسخ س. ج. ق در نمودارهای نگاره‌ای ارائه شده است. معرفی مختصات جداسازی و نمودارهای نگاره‌ای که بیانگر نحوه پاسخ لرزه‌ای س. ج. ق هستند به‌عنوان ابزاری مؤثر در ارزیابی رفتار و طراحی لرزه‌ای س. ج. ق می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

۲- مدل تحلیلی جداسازی قائم با میراگر مایع لزج غیرخطی

اگرچه اعمال تکنیک جداسازی در یک سازه سه‌بعدی با جداسازی سازه به دو بخش داخلی و خارجی امکان‌پذیر است، در نظر گرفتن یک قاب دو بعدی یک طبقه برای بررسی ویژگی‌های مهم مورد مطالعه س. ج. ق. کافی به نظر می‌رسد (شکل (۱)).

در این شکل از یک میراگر مایع لزج غیرخطی برای جداسازی استفاده شده است. ضریب میرایی غیرخطی میراگر c_{nl} ، ضریب توان سرعت آن α و سختی میراگر k_t در نظر گرفته شده است. جرم و سختی سازه اصلی با m و k نشان داده شده است. با معرفی نسبت‌های جرم و سختی α_{s1} و α_{m1} به‌صورت نسبت جرم و

ظرفیت استهلاک انرژی در یک میراگر مایع لزج غیرخطی را با نسبت میرایی معادل ξ_{sd} و غیرخطی بودن آن را با نسبت توان سرعت α مشخص کردند. در آن مطالعه نشان داده شد که نیروی میراگر غیرخطی ایجاد شده در زلزله را می‌توان با استفاده از یک سیستم متناظر با میراگر خطی تخمین زد. به علت سازگاری بیشتر تابع چگالی طیف توان با طیف پاسخ الاستیک، Di Paola و Navarra (۲۰۰۹) و Paola و همکاران (۲۰۰۷) روشی را برای تعیین نسبت میرایی معادل بر پایه مفهوم تابع چگالی طیف توان پیشنهاد دادند.

ایده به‌هم بستن سازه‌ها و بهره گرفتن از اندرکنش بین دو سازه اولین بار توسط Klein و همکاران (۱۹۷۲) با هدف کنترل ارتعاشات سازه‌های بزرگ در برابر باد مطرح گردید. Xu و همکاران (۱۹۹۹) مقادیر بهینه میراگرهای مایع لزج ارتباطی بین دو سازه با ارتفاع‌های مختلف را با تحلیل‌های پارامتری تعیین کردند. Xu و Zhang (۱۹۹۹ و ۲۰۰۰) با مطالعات پارامتری مقادیر ویژه دو سازه به هم بسته شده، روشی برای تعیین پارامترهای بهینه میراگرهای ارتباطی لزج-کشسان و مایع لزج برای دستیابی به بیشینه میرایی و بیشینه کنترل پاسخ در مقابل رویداد زلزله پیشنهاد دادند.

Xu و Zhu (۲۰۰۵) با کمینه کردن انرژی متوسط ارتعاشی دو سازه مجاور یک‌درجه آزاد در اثر تحریک طیف نوفه سفید زمین، روابط تحلیلی برای تعیین پارامترهای بهینه میراگرهای مایع لزج و لزج-کشسان برحسب نسبت جرم و فرکانس طبیعی دو سازه مجاور به دست آوردند.

Zhu و همکاران (۲۰۱۱) دو معیار بهینه برای کمینه کردن انرژی ارتعاشی سازه‌های به‌هم بسته شده ارائه کردند. Richardson و همکاران (۲۰۱۳) نیز روابط تحلیلی برای تعیین میرایی و سختی میراگرهای ارتباطی سازه‌های به هم بسته شده استخراج کردند.

Ziyaeifar (۲۰۰۰) حالت خاصی از سازه‌های جداسازی شده موسوم به جداسازی جرمی را معرفی کرد. در این مفهوم از جداسازی، لایه یا مرز جداساز در بین بخش جرم و سختی قرار می‌گیرد و بخش عمده جرم سیستم به محدوده انرژی و نیروی کم طیف زلزله جابه‌جا می‌گردد.

Nekooei و Ziyaeifar (۲۰۰۸) رفتار لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده جرمی را با استفاده از یک مدل دو جرمی توسعه یافته مدل سه‌جزئی ماکسول مطالعه و در یک کار تحلیلی با تعریف یک فاکتور جداساز برای سازه، مقادیر پارامترهای بهینه نسبی برای میراگرهای جداساز را به‌دست آوردند. همچنین Ziyaeifar و همکاران (۲۰۱۲) برای سیستم‌هایی مانند جداسازی جرمی که

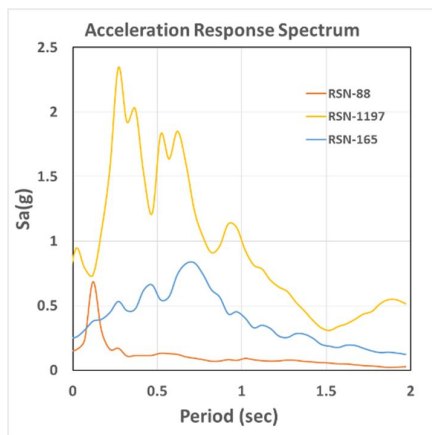
تحلیل‌های تاریخچه پاسخ با حل معادلات دیفرانسیل حرکت به روش عددی رونگه-گوتا انجام شده است. بیشینه پاسخ تغییر مکان مبنای مقایسه پاسخ سازه اصلی با پاسخ تغییر مکان دو زیرسازه در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای انتخاب شده است. نسبت پاسخ تغییر مکان برای هر دو زیرسازه نرم و سخت به صورت زیر تعریف شده است:

$$R_{\text{Flexible}} = \frac{\langle X_{\text{max}} \rangle_{\text{Flexible}}}{\langle X_{\text{max}} \rangle_{\text{Original}}} \quad (2)$$

$$R_{\text{Stiff}} = \frac{\langle X_{\text{max}} \rangle_{\text{Stiff}}}{\langle X_{\text{max}} \rangle_{\text{Original}}}$$

که در آن X_{max} بیانگر بیشینه پاسخ تغییر مکان سازه است و زیرنویس Flexible به زیرسازه نرم، Stiff به زیرسازه سخت و Original به سازه اصلی دلالت دارد.

زمان تناوب س. ج. ق به ازای نسبت‌های مختلف جرم و سختی در محدوده وسیعی پراکنده هستند. همچنین فرکانس غالب نگاشت ثبت شده زلزله‌های مختلف و بیشینه شتاب طیفی آن در محدوده‌های مختلفی از زمان تناوب سازه‌ها قرار می‌گیرد. در محدوده‌هایی از نسبت جرم و سختی که در آن زمان تناوب یکی از زیرسازه‌ها هماهنگ با فرکانس غالب رکورد زلزله باشد احتمال تشدید پاسخ وجود خواهد داشت. لذا نگاشت‌هایی برای تحلیل انتخاب شده است که بیشینه شتاب طیفی آن‌ها در نواحی مختلف زمان تناوب در طیف پاسخ شتاب پراکنده باشد (شکل ۲).

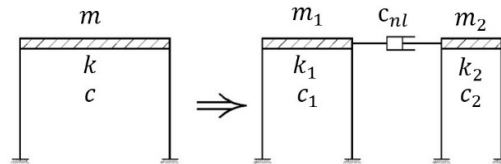


شکل ۲- طیف پاسخ شتاب زلزله‌های انتخابی

۳-۲- ویژگی جداسازی لرزه‌ای قائم در حالات عملکردی مختلف

برای مطالعه جامع جداسازی قائم تحلیل‌های تاریخچه پاسخ متعددی به ازای نسبت‌های مختلف جرم و سختی با پارامترهای

سختی سازه نرم به سازه اصلی، جرم و سختی سازه نرم به ترتیب با $k_1 = \alpha_{s1}k$ و $m_1 = \alpha_{m1}m$ بیان می‌شود. به طور کلی جداسازی به نحوی تعریف می‌شود که داشته باشیم $m = m_1 + m_2$ و $k = k_1 + k_2$ که در آن زیرنویس ۲ دلالت بر زیرسازه سخت دارد.



شکل ۱- مفهوم س. ج. ق در یک قاب تفکیک شده به دو زیرسازه با میراگر مایع لزج غیرخطی

نسبت میرایی ذاتی سازه $\xi = 2\%$ ، 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 هر یک از زیرسازه‌ها $c_1 = 2m_1\omega_1\xi$ و $c_2 = 2m_2\omega_2\xi$ است که در آن ω_1 و ω_2 فرکانس طبیعی زیرسازه‌های مجزا است. مطابق با شکل (۱)، سازه‌های جداسازی شده را می‌توان به صورت دو قاب یک درجه آزاد مرتبط در نظر گرفت، در نتیجه معادلات حرکت حاکم بر س. ج. ق تحت تحریک مؤلفه افقی زلزله به صورت زیر بیان می‌شود:

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

$$+ \begin{bmatrix} c_{nl} & -c_{nl} \\ -c_{nl} & c_{nl} \end{bmatrix} \text{sgn} \left(\begin{bmatrix} \dot{x}_1 & 0 \\ 0 & \dot{x}_2 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} |\dot{x}_1|^\alpha \\ |\dot{x}_2|^\alpha \end{Bmatrix} \quad (1)$$

که در آن x_1 و x_2 تغییر مکان‌های نسبی، \dot{x}_1 و \dot{x}_2 سرعت‌های نسبی و \ddot{x}_1 و \ddot{x}_2 شتاب‌های نسبی دو زیرسازه نسبت به زمین است. \ddot{x}_g نیز شتاب حرکت زمین می‌باشد.

۳-۱- معرفی مدل و فرضیات اصلی جداسازی لرزه‌ای قائم با میراگرهای مایع لزج خطی

برای رسیدن به درک مناسبی از ویژگی‌های س. ج. ق، یک قاب صفحه‌ای یک طبقه به جرم ۱۰۰ تن و سختی ۱۰۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر فرض شده است. سختی سازه چنان در نظر گرفته شده است که تغییر مکان نسبی در روش تحلیل استاتیکی معادل در یک منطقه با خطر نسبی بسیار زیاد زلزله به مقدار مجاز آئین‌نامه‌ای محدود شود. در جداسازی قائم با توجه به نامتناسب بودن ماتریس میرایی و معتبر نبودن فرض میرایی رایلی،

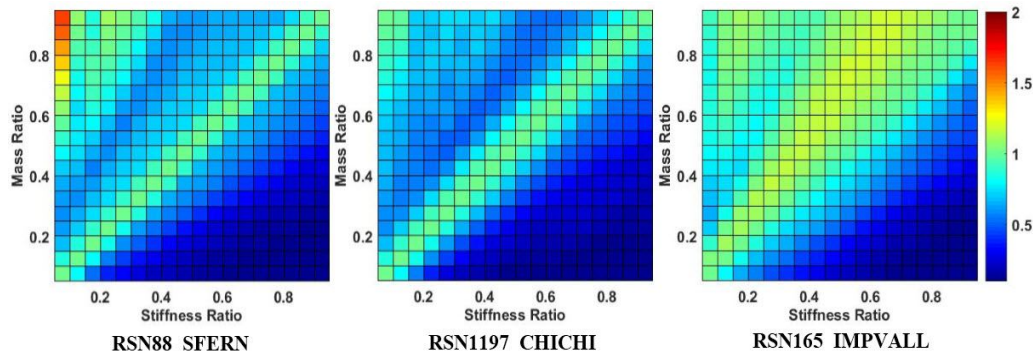
نواحی‌ای در این نمودار با نسبت پاسخ کوچک‌تر از واحد، نسبت‌های جداسازی‌ای را مشخص می‌کند که در آن کاهش پاسخ لرزه‌ای اتفاق می‌افتد. در این نمودارها، قطر اصلی یا مرز جدایی دو زیرسازه نرم و سخت با نسبت پاسخ واحد مشخص می‌شود. ناحیه پایین و راست قطر اصلی در بردارنده نتایج زیرسازه سخت است و تقریباً در بیشتر 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 کانتورهای 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_{s1} و α_{m1})، 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. در شکل (۳) نتایج محاسبات نسبت پاسخ س. ج. ق با میراگر خطی در زلزله‌های انتخابی ارائه شده است. در نمودارهای ارائه شده در شکل (۳) 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 شده است. با ملاحظه شکل (۳)، در حد پایین میرایی کاربردی ($\xi_l = 5\%$)، در بالای قطر اصلی نواحی با نسبت پاسخ کوچک‌تر از واحد، ابتدا به صورت نواری میانی موازی قطر اصلی شکل می‌گیرد. روند تشکیل این نوار میانی بر نقش مناسب اندرکنش سازه‌ای در کاهش پاسخ لرزه‌ای با استفاده از مقادیر کوچک میرایی دلالت دارد.

مختلف میراگر ارتباطی انجام گرفته است. پارامتر میراگر مایع لزج خطی ارتباطی نیز به شیوه مناسبی برحسب ویژگی‌های سازه اصلی جداسازی نشده به صورت زیر تعریف شده است:

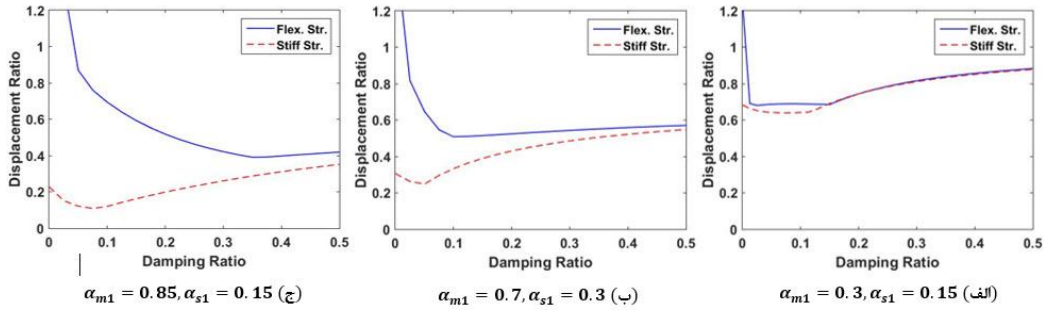
$$\xi_l = \frac{c_l}{2m\omega_n} \quad (3)$$

که در آن c_l ضریب میرایی و ξ_l نیز نسبت میرایی تعریف می‌شود که برحسب میرایی بحرانی سازه اصلی بیان شده است. در سازه‌هایی که از میراگرهای الحاقی به منظور وسایل اتلاف انرژی استفاده می‌گردد نسبت میرایی به مقدار ۲۵ درصد میرایی بحرانی، به عنوان حد بالای میرایی پذیرفته شده است (Taylor و Lee, ۲۰۰۱). مطالعات پیشین نیز دلالت بر این دارد که جداسازی قائم با میراگرهای خطی و با پارامتر میرایی در محدوده $5\% \leq \xi_l \leq 20\%$ می‌تواند به نتایج مطلوبی منجر شود (Milanchian و همکاران، ۲۰۱۷).

در این مطالعه ارائه و ارزیابی حجم قابل توجهی از نتایج به صورت کانتور رنگی در یک دستگاه مختصاتی که در آن محورهای افقی و قائم به ترتیب نسبت جرم و نسبت سختی سازه‌های جداسازی شده به سازه اصلی است، انجام می‌گیرد. نسبت‌های جرم و سختی برای زیرسازه نرم به صورت $\alpha_{s1} = m_1/m$ و $\alpha_{m1} = k_1/k$ تعریف می‌شود و نسبت‌های متناظر با آن در زیرسازه سخت به صورت $\alpha_{s2} = 1 - \alpha_{s1}$ و $\alpha_{m2} = 1 - \alpha_{m1}$ است. در این روش 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. 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 ادامه این نحوه نمایش، نمودار کانتور رنگی نامیده می‌شود.



شکل ۳- نسبت‌های پاسخ س. ج. ق با میراگر مایع لزج خطی و با پارامتر $\xi_l = 5\%$



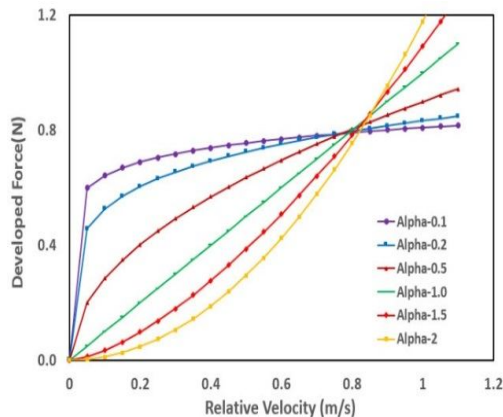
شکل ۴- نسبت‌های پاسخ س. ج. ق بر حسب نسبت میرایی میراگر خطی در حالت‌های عملکردی مختلف در زلزله RSN88 SFERN

عین حالی که میرایی کافی را هم برای استهلاک انرژی ورودی به سازه فراهم آورند (Lin و Chopra، ۲۰۰۲). مدل تحلیلی رفتار میراگرهای مایع لزج غیرخطی به صورت کلی با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$F_D = c_{nl} \text{Sgn}(\dot{u}) |\dot{u}|^\alpha \quad (۴)$$

در این رابطه F_D نیروی میراگر، \dot{u} سرعت نسبی بین دو انتهای میراگر، c_{nl} ضریب میرایی میراگر بر حسب واحد نیرو در سرعت به توان α و α ضریب توان سرعت که یک مقدار حقیقی مثبت است و با فناوری‌های جدید امکان ساخت میراگرهایی با ضریب توان سرعت کوچک فراهم شده است. در مقادیر کوچک α ، مقدار عبارت $|\dot{u}|^\alpha$ به سمت ۱/۰ میل کرده و تاریخچه نیروی پاسخ مستقل از سرعت می‌گردد. در شکل (۵) برای توان‌های مختلف سرعت میراگرهای غیرخطی نمودارهای تغییرات نیرو-سرعت نشان داده شده است.

تعریف نسبت میرایی برای میراگرهای مایع لزج غیرخطی بر حسب جرم m ، سختی k و ضریب میرایی c مانند آنچه برای میراگرهای خطی انجام می‌گیرد بدون معنی می‌باشد (Terenzi، ۱۹۹۹).



شکل ۵- نمودارهای نیرو-سرعت برای میراگرهای غیرخطی با توان سرعت مختلف

با افزایش میرایی میراگر ارتباطی، محدوده‌هایی با نسبت پاسخ مطلوب به نواحی کناری و گوشه‌ها نمودار توسعه می‌یابد که در آن حالت جداسازی جرمی مطرح می‌شود. در شکل (۴) نیز نسبت‌های پاسخ دو زیرسازه نرم و سخت در سه نسبت جداسازی مختلف بر حسب نسبت میرایی میراگر ارتباطی، جهت اختصار در یکی از زلزله‌های مورد بررسی، نشان داده شده است. این نسبت‌های جداسازی به ترتیب نماینده حالت‌های عملکردی کنترل جرمی (شکل ۴-الف)، اندرکنشی (شکل ۴-ب) و جداسازی جرمی (شکل ۴-ج) می‌باشند.

با ارزیابی نمودارهای نگاره‌ای شکل (۳) می‌توان دریافت که انتخاب‌های زیادی برای نسبت‌های جرم و سختی با عملکرد اندرکنشی امکان‌پذیر هست که در آن کاهش پاسخ در هر دو زیرسازه مطلوب می‌باشد. به طوری که از نمودارهای شکل (۴) نیز مشهود است در جداسازی قائم با میراگر خطی و عملکردهای اندرکنشی و کنترل جرمی در محدوده میانی میرایی میراگر ($5\% \leq \xi_l \leq 15\%$) کاهش پاسخ مناسبی در حدود ۴۰ درصد در زیرسازه نرم و بیشتر از آن در زیرسازه سخت قابل دستیابی است.

این در صورتی است که در جداسازی جرمی انتخاب محدودتری برای نسبت‌های جرم و سختی وجود دارد و مطابق شکل (۴) برای کنترل پاسخ مناسب به کارگیری مقادیر بزرگتری از میرایی کاربردی برای میراگر ($15\% \leq \xi_l \leq 25\%$) اجتناب‌ناپذیر است.

۴- جداسازی قائم با میراگرهای مایع لزج غیرخطی

۴-۱- ویژگی‌های رفتاری میراگرهای مایع لزج غیرخطی

در میراگرهای خطی سرعت جابه‌جایی سازه در نتیجه نیروی میراگر می‌تواند به صورت غیرمنتظره‌ای افزایش یابد، این حالت به خصوص در سازه‌هایی با پیوند بزرگ و نواحی نزدیک گسل بیشتر محتمل است. میراگرهای مایع لزج غیرخطی این قابلیت را دارند که بیشینه نیروی میراگر در مقادیر بزرگ سرعت را به خوبی به یک مقدار مشخص از پیش تعیین شده محدود کنند در

مقدار نهایی $\delta_{max} = (P_0/k)/(2\xi)$ میل می‌کند. به طوری که در شکل (۶-ب) نشان داده شده در میرایی مایع لزج خطی $\alpha = 1$ مسیر منحنی چرخه‌های بیضوی است و برای توان‌های سرعت کوچک‌تر از واحد منحنی‌های چرخه‌ای در دامنه تغییر مکان بیشینه از بیضی به تدریج به مستطیل کامل در میرایی کولمب با $\alpha = 0$ تغییر شکل می‌دهد.

چنانچه در مطالعات Symans و Constantinou (۱۹۹۸) نیز آمده است در سیستم‌های با میرایی غیرخطی با انرژی معادل تحت بارگذاری هارمونیک، دامنه تغییر مکان پایدار سیستم به ازای مقادیر مختلف توان سرعت به مقدار δ_{max} می‌رسد. این موضوع در منحنی‌های شکل (۵) نیز نشان داده شده است اما در توان‌های کوچک سرعت، تعداد سیکل نوسانی بیشتری لازم بوده تا این دامنه مشخص حاصل شود.

دامنه ارتعاشی هر سیستم سازه‌ای در یک زلزله متغیر با زمان می‌باشد، از این جهت این رفتار بیشتر با پاسخ‌گذاری یک سیستم تحت بارگذاری هارمونیک به جای پاسخ پایدار قابل مقایسه است. از سوی دیگر چنانچه ذکر شد در تعیین ضریب میرایی بر اساس انرژی معادل، انرژی مستهلک شده برای توان‌های مختلف سرعت در یک سیکل با دامنه مشخص محاسبه می‌شود. بنابراین برای تعمیم دادن نتایج بارگذاری هارمونیک به تحریک زلزله، منطقی است که پاسخ‌گذاری سیستم در چند سیکل ابتدایی مورد مطالعه قرار گیرد. مقادیر نسبت میرایی مؤثر، بیشینه نیروی میراگر و دامنه پاسخ در چند سیکل ابتدایی ارتعاش هارمونیک برای توان‌های مختلف سرعت محاسبه و در شکل (۷) ارائه شده است. نسبت میرایی مؤثر برای میرایی‌های غیرخطی با مساوی قرار دادن مقدار انرژی مستهلک شده سیستم با مقدار انرژی در یک سیستم با میرایی مایع لزج معادل به دست آمده است (Chopra, ۲۰۰۷):

$$\xi_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{S0}} \quad (۸)$$

که در آن $E_{S0} = ku_0^2/2$ انرژی جنبشی سیستم و E_D انرژی مستهلک شده در هر سیکل ارتعاش می‌باشد. در شکل (۷-الف) مقادیر نسبت‌های میرایی مؤثر در سیکل‌های متوالی برای میراگر مایع لزج خطی $\alpha = 1.0$ و میراگرهای مایع لزج غیرخطی با توان سرعت $\alpha = 0.1, 0.2, 0.5, 1.5$ و 2.0 با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شده است.

بنابراین برای مطالعه ویژگی‌های میراگر مایع لزج غیرخطی، یک سیستم یک درجه آزاد با جرم $m = 1.0 \text{ kg}$ ، سختی $k = 100 \text{ N/m}$ تحت بارگذاری هارمونیک $p(t) = p_0 \sin \omega t$ با فرکانسی برابر با $\omega = \omega_N = \sqrt{k/m} = 10 \text{ rad/sec}$ و با شدت $p_0 = 1.0 \text{ N}$ در نظر گرفته می‌شود. میرایی سیستم در حالت میرایی خطی برابر با ۵ درصد میرایی بحرانی لحاظ شده است. پاسخ سیستم برای مقادیر متفاوت توان سرعت میراگرهای مایع لزج $0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ محاسبه و مقایسه شده است. معادله حاکم بر حرکت سیستم با میرایی غیرخطی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$m\ddot{u} + c_{nl} \text{Sgn}(\dot{u}) |\dot{u}|^\alpha + ku = p(t) \quad (۵)$$

مقادیر c_{nl} با معادل قرار دادن مقدار انرژی تلف شده در یک سیکل بارگذاری هارمونیک در حالت میرایی خطی و غیرخطی در یک دامنه مشخص تغییر مکان به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود (Chopra و Lin, ۲۰۰۲):

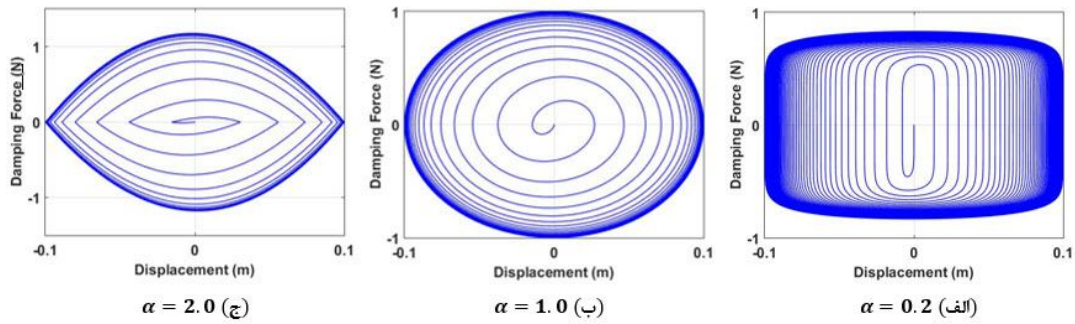
$$c_{nl} = \frac{(\omega u_0)^{1-\alpha}}{\beta_\alpha} c_1 \quad (۶)$$

که در آن ω فرکانس بارگذاری، u_0 دامنه موردنظر، c_1 ضریب میرایی خطی و β_α ثابتی است که با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

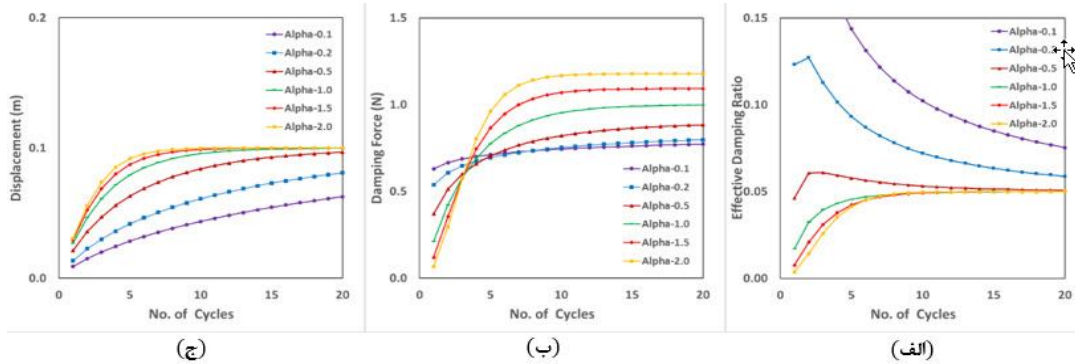
$$\beta_\alpha = \frac{2^{2+\alpha} \Gamma^2(1 + \alpha/2)}{\pi \Gamma(2 + \alpha)} \quad (۷)$$

که در رابطه فوق ثابت $\Gamma(\cdot)$ تابع گاما می‌باشد. برای نسبت میرایی خطی فرض شده $\xi = 5\%$ ، $c_1 = 1.0 \text{ N}\cdot\text{sec}/\text{m}$ است و برای میراگرهای غیرخطی متناظر با مقادیر در نظر گرفته شده توان سرعت، ضرایب میرایی معادل به ترتیب برابر با $c_{nl} = 0.809, 0.832, 0.898, 1.092$ و $1.178 \text{ N}\cdot(\frac{\text{sec}}{\text{m}})^\alpha$ محاسبه شده است. لازم است اشاره گردد که u_0 دامنه پاسخ تغییر مکان حالت پایدار است که با رابطه $\delta_{max} = (p_0/k)/(2\xi)$ منحنی‌های چرخه‌ای حاصل از تحلیل‌های تاریخیچه پاسخ به ازای سه مقدار مختلف توان سرعت میراگرهای مایع لزج غیرخطی در شکل (۶) آورده شده است.

از نمودارهای ارائه شده در شکل (۶) آشکار است که پاسخ سیستم‌های یک درجه آزاد میرا تحت بارگذاری هارمونیک در شرایط تشدید هارمونیک بوده و دامنه تغییر مکان به تدریج به



شکل ۶- منحنی‌های چرخه‌ای برای توان‌های مختلف سرعت میراگرهای مایع لزج



شکل ۷- مقادیر نسبت میرایی مؤثر، نیروی میراگر و دامنه پاسخ در سیکل‌های متوالی پاسخ ارتعاشی

همگرا می‌گردد، اما نرخ رشد دامنه برای تمامی توان‌های سرعت یکسان نیست. در این شکل مشخص است که هر اندازه توان سرعت کوچکتر باشد با طی تعداد سیکل‌ها نوسانی بیشتری دامنه پاسخ تغییر مکان سیستم به پاسخ با دامنه پایدار همگرا می‌شود.

۴-۲- انتخاب معیار مناسب برای مقایسه میراگرهای خطی و غیرخطی

بررسی کارایی میراگرهای مایع لزج غیرخطی همواره با ارزیابی و مقایسه فنی این میراگرها نسبت به میراگرهای مایع لزج خطی انجام گرفته است. به طوری که در بخش قبلی بررسی شد در روش‌های مبتنی بر انرژی معادل، نسبت میرایی مؤثر تعریف شده برای یک سیستم با میراگرهای مایع لزج به مقدار تغییر مکان نسبی دو انتهای میراگر وابسته می‌باشد. از طرف دیگر رفتار غیرخطی میراگرهای مایع لزج را از بعضی جنبه‌ها می‌توان با رفتار چرخه‌ای سازه‌ها در محدوده غیرخطی مقایسه کرد. به طوری که میرایی چرخه‌ای در یک سازه به مقدار تغییر شکل غیرخطی سازه و نسبت زمان تناوب مؤثر سازه ارتباط پیدا می‌کند، مقدار نسبت میرایی مؤثر سازه با میراگرهای مایع لزج نیز با مقدار تغییر مکان نسبی دو انتهای میراگر در ارتباط است (شکل ۷- الف).

مطابق شکل (۷- الف) نسبت میرایی مؤثر برای تمام میراگرهای خطی و غیرخطی در پاسخ پایدار به میرایی در نظر گرفته شده برای میراگر خطی که ۵ درصد می‌باشد همگرا شده است. اما در سیکل‌های پاسخ گذرای سیستم و برای میراگرهای غیرخطی با توان سرعت کوچکتر از واحد ($\alpha < 1.0$) نسبت میرایی مؤثر همواره از نسبت میرایی در نظر گرفته شده بزرگتر بوده و از بالا به مقدار در نظر گرفته شده همگرا شده است. این در حالی است که در میراگر خطی و غیرخطی با توان سرعت بزرگتر از واحد ($\alpha \geq 1.0$) نسبت میرایی مؤثر همواره کوچکتر از نسبت میرایی در نظر گرفته شده می‌باشد و با افزایش دامنه به تدریج از پایین به مقدار در نظر گرفته شده ۵ درصد همگرا شده است.

در شکل (۷- ب) نیروی میراگرهای خطی و غیرخطی در سیکل‌ها متوالی نشان داده شده است. به طوری که از این شکل آشکار است برای میراگرهای غیرخطی با توان سرعت کوچکتر از واحد ($\alpha < 1.0$) نیروی میراگر از همان سیکل‌های اولیه به بیشینه مقدار خود در پاسخ پایدار میل می‌کند. در شکل (۷- ج) بیشینه پاسخ دامنه تغییر مکان در سیکل‌های متوالی برای میراگرهای با توان سرعت مختلف نشان داده شده است. از این نمودارها نیز این مطلب دریافت می‌شود که به ازای تمامی توان‌های سرعت، بیشینه پاسخ دامنه تغییر مکان به مقدار δ_{max}

است. در این روال ضریب میرایی میراگر غیرخطی c_{nl} ، چنان تعیین شده است که بیشینه نیروی میراگر در حالت غیرخطی با حالت خطی یکسان گردد و به عبارتی ظرفیت میراگر غیرخطی به ازای هر نسبت جداسازی به مقدار نظیر آن در حالت میراگر خطی هم‌پایه شده است. نسبت‌های پاسخ محاسبه شده با توان‌های مختلف سرعت بیانگر نحوه عملکرد س.ج.ق با میراگرهای خطی و غیرخطی است.

۵- بررسی عملکرد لرزه‌ای س.ج.ق با میراگرهای مایع لزج غیرخطی

نتایج محاسبات پاسخ س.ج.ق با میراگرهای مایع لزج غیرخطی در قالب نمودارهای نگاره‌ای برای دو زلزله دیگر RSN1197_CHICHI و RSN165_IMPVALL در شکل (۹) و شکل (۱۰) نشان داده شده است.

در یک نگاه اجمالی و مقایسه کیفی نمودارهای نگاره‌ای حالت خطی و غیرخطی این مطلب حاصل می‌شود که به‌طور کلی میراگرهای غیرخطی به‌خصوص با ضریب توان سرعت کوچک $\alpha = 0.2$ ، موجب کاهش بیشتر پاسخ لرزه‌ای و بهبود عملکرد جداسازی نسبت به میراگرهای خطی در زیرسازه نرم نشده است و نواحی با پاسخ مطلوب در این نمودار در مقایسه با حالت خطی محدود می‌باشد (شکل (۱۰-ج)). این در حالی است که در زیرسازه سخت با میراگرهای غیرخطی، نواحی با پاسخ مطلوب بیشتر به سمت قطر اصلی گسترده شده و منجر به کاهش پاسخ لرزه‌ای بیشتری شده است. نتایج به دست آمده با بیشتر مطالعات پیشین در خصوص کاربردهای مختلف میراگر مایع لزج غیرخطی با توان سرعت کوچک، مبنی بر عملکرد مناسب این میراگرها در جذب انرژی و کنترل پاسخ، کمتر مطابقت دارد.

علی‌رغم این که نمودارهای کانتور رنگی اطلاعات و درک بسیار مناسبی از رفتار و کنترل پاسخ در س.ج.ق به‌صورت کیفی فراهم می‌آورد، اما مطالعات کمی و عددی رفتار جداسازی قائم برای مقاصد کاربردی دارای اهمیت فراوان است. از آنجایی که نسبت‌های پاسخ در نمودارهای کانتور رنگی در محدوده‌های بزرگ‌تر و کوچک‌تر از واحد پراکنده هستند، برای هر یک از نمودارهای کانتور رنگی زوج‌هایی از نسبت جداسازی (α_{s1} و α_{m1}) که در آن نسبت‌های پاسخ دو زیرسازه سخت و نرم کوچک‌تر از $1/0$ باشد در نظر گرفته شده است.

با توجه به بررسی‌های فوق این نکته مشخص می‌شود که مقیاس کردن ضریب میرایی میراگر مایع لزج غیرخطی بر اساس انرژی معادل و در یک دامنه تغییر مکان مشخص میراگر در پاسخ پایدار، برای یک تحریک پیشا مانند زلزله با شدت و فرکانس متغیر می‌تواند همراه‌کننده باشد و نمی‌تواند معیار مناسبی برای مقایسه میراگرهای خطی و غیرخطی باشد.

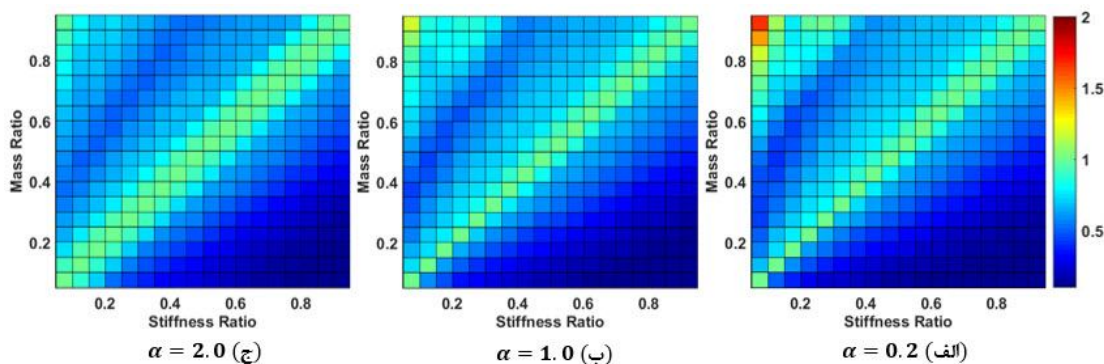
به طوری که اشاره شد در میراگرهای غیرخطی از محدود شدن نیروی میراگر به ظرفیت مشخص به‌خصوص در توان‌های کوچک سرعت در یک رویداد زلزله می‌توان اطمینان حاصل کرد. در میراگرهای خطی نیز اگرچه از نظر تئوری کران بالایی برای نیروی میراگر لحاظ نمی‌شود اما از جنبه کاربردی این میراگرها برای نیروی مشخصی طراحی می‌شوند و افزایش نیرو در میراگر می‌تواند موجب شکست در میراگر گردد. بنابراین برای هر دو میراگر خطی و غیرخطی ظرفیت نیروی برای میراگرها قابل تعریف است و در این مطالعه ظرفیت میراگر معیاری برای ارزیابی و مقایسه عملکرد میراگرهای خطی و غیرخطی انتخاب شده است.

۳-۴- روال محاسبات پاسخ در جداسازی قائم با میراگرهای مایع لزج غیرخطی

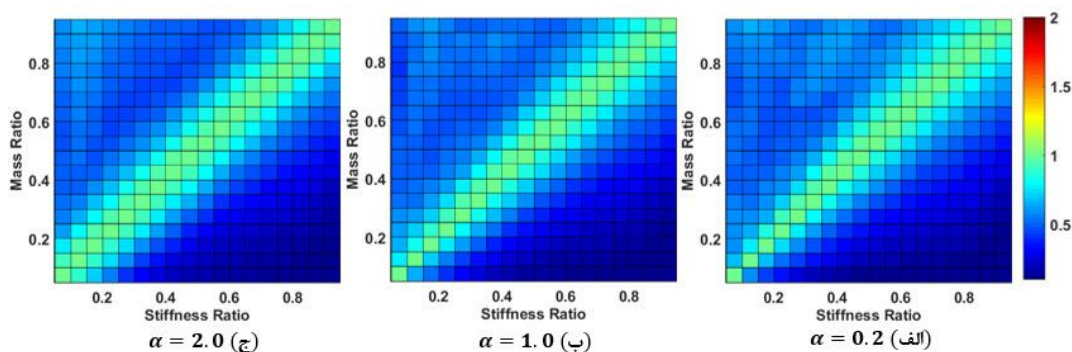
نتایج نسبت پاسخ تغییر مکان س.ج.ق با میراگر مایع لزج غیرخطی در قالب نمودارهای نگاره‌ای برای زلزله RSN88_SFERN در شکل (۸) نشان داده شده است. در این پژوهش مقایسه میراگرهای خطی و غیرخطی در یک مقدار میانی پارامتر میراگر $\xi_l = 10\%$ و به ازای سه مقدار مختلف توان سرعت $\alpha = 0.2, 0.5, 1.0$ انجام شده است. توان سرعت $\alpha = 1.0$ که در واقع حالت خطی میراگر مایع لزج است مبنای مقایسه را مشخص می‌کند.

در بخش قبل بیان شد که در این مطالعه کارایی میراگرهای مایع لزج غیرخطی در قیاس با میراگرهای خطی و در یک ظرفیت مشخص نیروی میراگر انجام می‌گیرد. بنابراین در ابتدا تحلیل‌های تاریخیچه پاسخ در س.ج.ق با میراگر خطی انجام گرفته است (شکل (۸-ج)).

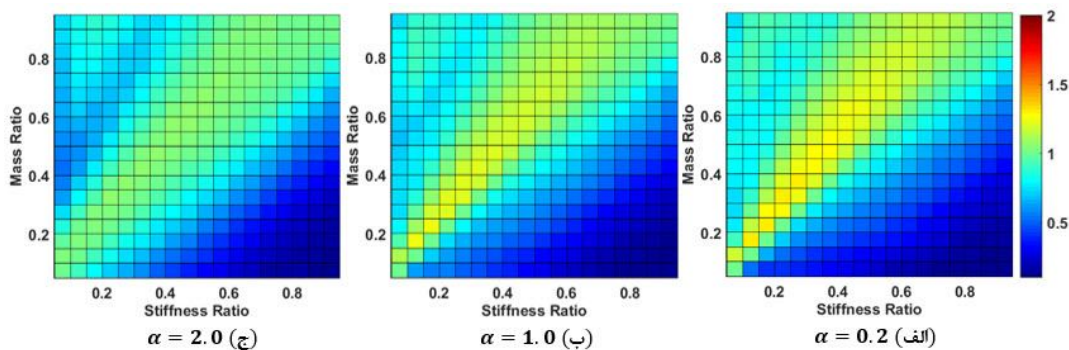
به‌ازای هر نسبت جداسازی (α_{s1} و α_{m1})، پاسخ س.ج.ق و بیشینه نیروی ایجاد شده در میراگر مایع لزج یکتا است و مشخص کردن یک مقدار مشخص برای ظرفیت میراگر برای نسبت‌های مختلف جداسازی منطقی نمی‌باشد. بنابراین به ازای هر مقدار α و در هر نسبت جداسازی (α_{s1} و α_{m1})، روال انتخاب پارامتر میراگر غیرخطی متناظر با میراگر خطی بر پایه نیروی تجربه شده در میراگر بوده است، به نحوی که بیشینه نیروی میراگر خطی به‌عنوان معیار ظرفیت میراگر انتخاب شده



شکل ۸- نسبت‌های پاسخ س.ج. ق با میراگر مایع لزج غیرخطی با توان‌های سرعت مختلف در زلزله RSN88_SFERN



شکل ۹- نسبت‌های پاسخ در س.ج. ق با میراگر مایع لزج غیرخطی با توان‌های سرعت مختلف در زلزله RSN1197_CHICHI



شکل ۱۰- نسبت‌های پاسخ در س.ج. ق با میراگر مایع لزج غیرخطی با توان‌های سرعت مختلف در زلزله RSN165_IMPVALL

در این جدول پارامتر میانگین برای نسبت پاسخ دو زیرسازه معیاری از کاهش پاسخ لرزه‌ای است. هر اندازه میانگین نسبت پاسخ از ۱/۰ کوچک‌تر باشد، مؤثر بودن جداسازی قائم را برای هر یک از زیرسازه‌ها به ازای پارامترهای میراگرهای ارتباطی نشان می‌دهد. میانگین برای نسبت‌های جداسازی $(\alpha_{s1}$ و α_{m1})، در حقیقت مرکز ثقل نسبت‌های جداسازی با پاسخ قابل پذیرش در نمودارهای نگاره‌ای است. انحراف استاندارد که از مهم‌ترین

مقایسه‌ای از تعداد نسبت‌های جداسازی مورد پذیرش در مقایسه با کل ترکیب‌های جداسازی مورد بررسی در هر زلزله معیار مناسبی از کارایی س.ج. ق را در کاهش پاسخ لرزه‌ای به دست می‌دهد و در این مطالعه این شاخص به صورت نسبت بیان شده و نسبت پذیرش تعریف می‌شود. خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از تحلیل‌های انجام گرفته در زلزله‌های مورد بررسی در جدول (۱) آورده شده است.

می‌توان اظهار کرد که جداسازی قائم در کاهش پاسخ لرزه‌ای با هر دو میراگر مایع لزج خطی و غیرخطی با توان سرعت در محدوده $0.5 \leq \alpha \leq 1.0$ کارآمد است.

۶- بحث در خصوص نتایج جداسازی قائم با میراگرهای مایع لزج غیرخطی

لازم به ذکر است آنچه در این بخش در مقایسه عملکرد میراگرهای مایع لزج خطی و غیرخطی بیان می‌شود صرفاً به نقش این میراگرها در کاهش پاسخ لرزه‌ای در جداسازی قائم می‌پردازد و نمی‌توان آن را به سایر موارد کاربرد میراگرها با اهداف مختلف عمومیت داد. به نظر می‌رسد علی‌رغم عملکرد مناسب میراگرهای غیرخطی در جذب و استهلاک انرژی، جذب ضربه‌های بزرگ و کاهش پاسخ لرزه‌ای در بیشتر کاربردهای عملی، استفاده از این میراگرها در جداسازی قائم به خصوص در توان‌های کوچک سرعت مناسب نباشد. این امر را می‌توان با توجه به مطالعه انجام گرفته در خصوص جداسازی قائم با میراگرهای ویسکوالاستیک توسط Milanchian و همکاران (۲۰۱۷) توجیه کرد. در آن بررسی نشان داده شد که سختی میراگر به خصوص در مقادیر بزرگ بر اندرکنش سازه‌ای و کنترل پاسخ در زیرسازه نرم تأثیر نامناسب دارد. لازم به ذکر است میراگرهای مایع لزج به‌تنهایی در فرکانس‌های کمتر از ۴ هرتز اثرات سختی از خود نشان نمی‌دهند (Soong و Costantinou، ۲۰۱۴).

در میراگرهای مایع لزج غیرخطی با کوچک‌تر شدن توان سرعت، حساسیت نسبت به سرعت نسبی میراگر کاسته شده و این میراگرها به کوچک‌ترین تغییر مکان نسبی عکس‌العمل نشان می‌دهند. در توان کوچک سرعت مطابق با شکل (۱)، با کوچک‌ترین جابه‌جایی و حرکت دو انتهای میراگر، نیروی اعمالی از طرف میراگر به حداکثر ظرفیت خود می‌رسد و در نتیجه ارتعاش دو سازه بی‌درنگ به یکدیگر بسته می‌شود. از این رو رفتار س. ج. ق با میراگرهای مایع لزج غیرخطی را می‌توان به رفتار س. ج. ق با میراگرهای لزج-کشسان تشبیه کرد که در آن سختی میراگر قابل توجه است. در جداسازی قائم اندرکنش سازه‌ای نقش مهمی در کاهش پاسخ لرزه‌ای ایفا می‌کند و میراگرهای مایع لزج غیرخطی موجب کاهش این اثر مهم می‌شوند، بنابراین جداسازی قائم با میراگرهای غیرخطی با توان سرعت کوچک توصیه نمی‌شود.

برای یک مدل نمونه از جداسازی قائم با نسبت جداسازی $\alpha_{s1} = 0.3$ و $\alpha_{m1} = 0.7$ ، تغییرات انرژی مستهلک شده در میراگر برحسب توان سرعت میراگر در شکل (۱۱-الف) نشان داده شده است. در شکل (۱۱-ب) نیز نسبت پاسخ تغییر مکان دو زیرسازه برحسب توان سرعت میراگر ارائه شده است.

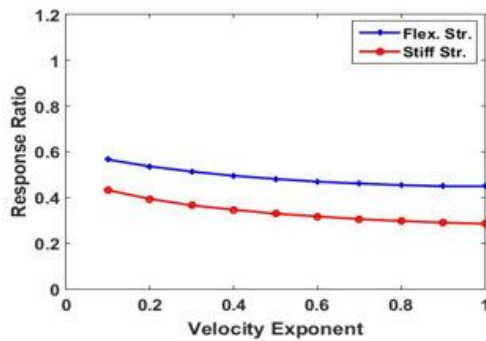
شاخص‌های پراکندگی می‌باشد برای نسبت‌های جداسازی $(\alpha_{s1}$ و α_{m1}) و نسبت‌های پاسخ دارای مفهوم متفاوتی است.

جدول ۱- میانگین و انحراف استاندارد نسبت‌های پاسخ مطلوب و نسبت پذیرش (AR)

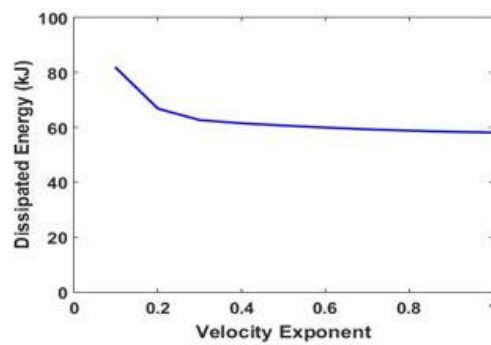
RSN88_SFERN						
α	کمیت	α_{s1}	α_{m1}	R_{Flex}	R_{Stiff}	AR
۰/۲	میانگین	۰/۳۵	۰/۶۵	۰/۶۹	۰/۴۳	۰/۹۳
	انحراف	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۱۳	۰/۲۲	
۰/۵	میانگین	۰/۳۴	۰/۶۶	۰/۶۹	۰/۴۲	۰/۹۸
	انحراف	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۱۲	۰/۲۲	
۱/۰	میانگین	۰/۳۴	۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۴۷	۰/۹۹
	انحراف	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۱۳	۰/۲۵	
RSN1197_CHICHI						
α	کمیت	α_{s1}	α_{m1}	R_{Flex}	R_{Stiff}	AR
۰/۲	میانگین	۰/۳۳	۰/۶۷	۰/۶۴	۰/۴۱	۱/۰
	انحراف	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۱۵	۰/۲۵	
۰/۵	میانگین	۰/۳۳	۰/۶۷	۰/۶۱	۰/۴۱	۱/۰
	انحراف	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۱۵	۰/۲۵	
۱/۰	میانگین	۰/۳۳	۰/۶۷	۰/۶۱	۰/۴۴	۱/۰
	انحراف	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۲۶	
RSN165_IMPVAL						
α	کمیت	α_{s1}	α_{m1}	R_{Flex}	R_{Stiff}	AR
۰/۲	میانگین	۰/۱۷	۰/۶۷	۰/۸۷	۰/۳۳	۰/۴۲
	انحراف	۰/۱۰	۰/۲۱	۰/۰۷	۰/۲۰	
۰/۵	میانگین	۰/۱۸	۰/۶۸	۰/۸۳	۰/۳۴	۰/۴۹
	انحراف	۰/۱۱	۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۲۰	
۱/۰	میانگین	۰/۲۵	۰/۶۹	۰/۸۰	۰/۴۳	۰/۶۵
	انحراف	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۱۲	۰/۲۳	

علی‌رغم این که شاخص پراکندگی در سایر کمیت‌ها معمولاً بیانگر عدم اطمینان به نتایج است برای نسبت‌های جداسازی، پراکندگی بیشتر نشان‌دهنده این است که امکان انتخاب بزرگ‌تری برای نسبت جداسازی وجود دارد. هر اندازه این شاخص بزرگ‌تر باشد به این معنی است که با جداسازی قائم کاهش پاسخ لرزه‌ای با اطمینان بیشتری محتمل است.

بررسی نتایج و نسبت‌های پذیرش (AR) ارائه شده در جدول (۱) دلالت بر این دارد که با انجام جداسازی قائم با میراگرهای غیرخطی نیز می‌توان به کنترل پاسخ در س. ج. ق دست یافت اما این میراگرها موجب بهبود عملکرد نسبت به میراگرهای خطی نشده است. تأثیر این میراگرها بر زیرسازه نرم و سخت متفاوت می‌باشد. در توان‌های کوچک سرعت میراگر، میانگین نسبت پاسخ در زیرسازه نرم کاهش و در زیرسازه سخت افزایش می‌یابد. کاهش پاسخ تغییر مکان تا ۴۰ درصد در زیرسازه نرم و بیشتر از آن در زیرسازه سخت در این جدول مشاهده می‌شود. به طور کلی



(ب)



(الف)

شکل ۱۱- تغییرات انرژی مستهلک شده در میراگر و نسبت پاسخ تغییر مکان برحسب توان سرعت در زلزله RSN1197_CHICHI

میراگر مایع لزج خطی و غیرخطی با توان سرعت در محدوده $0.5 \leq \alpha < 1.0$ می‌باشد، به طوری که کاهش پاسخ تا ۴۰ درصد در زیرسازه نرم و بیشتر از آن در زیرسازه سخت قابل دستیابی است.

در قیاس با عملکرد مناسب و شناخته شده میراگرهای غیرخطی در استهلاک انرژی و کاهش پاسخ سازه‌ها، نتایج این مطالعه بر عملکرد نه چندان رضایت‌بخش این میراگرها در جداسازی قائم در توان‌های سرعت کوچک دلالت داشت، زیرا در جداسازی قائم اندرکنش سازه‌ای نقش مهمی در کاهش پاسخ لرزه‌ای ایفا می‌کند و میراگرهای مایع لزج غیرخطی موجب کاهش این تأثیر مهم می‌شوند به طوری که حساسیت نسبت به مقدار سرعت نسبی میراگر کاسته شده و با کوچک‌ترین تغییر مکان، نیروی میراگر به بیشینه مقدار در نظر گرفته شده میل می‌کند بنابراین استفاده از این میراگرها در جداسازی قائم توصیه نمی‌شود.

۸- مراجع

- Chopra AK, "Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering", Prentice-Hall, 2007.
- Dipaola M, Navarra G, "Stochastic seismic analysis of MDOF structures with nonlinear viscous dampers", Structural Control and Health Monitoring, 2009, 16 (3), 303-318.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA 273), "NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings", 1997.
- Klein R, Todaro A, Finne I, "Investigation of a method to stabilize wind induced oscillations in large structures", American Society of Mechanical Engineers, 1972.
- Lee D, Taylor DP, "Viscous Damper development and future trends", The Structural Design of Tall Buildings, 2001, 10 (5), 311-320.
- Lin WH, Chopra AK, "Earthquake response of elastic

با توجه به نمودارهای ارائه شده آشکار است که با وجود یکسان بودن بیشینه نیروی میراگر در تمام ضریب توان‌های سرعت، میراگر مایع لزج خطی انرژی بیشتری را در قیاس با میراگرهای مایع لزج غیرخطی متناظر مستهلک کرده و کاهش پاسخ بیشتری را در زیرسازه نرم موجب شده است، در صورتی که این امر بر پاسخ زیرسازه سخت تأثیری نداشته است.

۷- خلاصه بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش کارایی تکنیک جداسازی قائم در کاهش پاسخ لرزه‌ای س. ج. ق با میراگرهای مایع لزج غیرخطی مطالعه شده است. در ابتدا ویژگی‌های جداسازی قائم با میراگرهای مایع لزج خطی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه مختصات جداسازی و نمودارهای نگاره‌ای که بیانگر پاسخ لرزه‌ای س. ج. ق می‌باشد معرفی شده است. از این نمودارها می‌توان به طور مؤثری در ارزیابی رفتار و طراحی لرزه‌ای جداسازی قائم بهره گرفت. برای میراگر مایع لزج غیرخطی تعریف نسبت میرایی با برحسب مشخصات سیستم امکان‌پذیر نبوده است، لذا برای مطالعه ویژگی‌های میراگرهای غیرخطی در یک بارگذاری دلخواه مانند زلزله از نتایج پاسخ‌گذرای سیستم یک درجه آزاد تحت بارگذاری هارمونیک بهره گرفته شده است. در این مطالعه نشان داده شد که تعریف ضریب میرایی مبتنی بر انرژی برحسب یک دامنه مشخص، برای مقیاس کردن مناسب نبوده و در یک تحریک پیشا مانند زلزله می‌تواند گمراه کننده باشد. بر این اساس چارچوبی برای مقایسه منطقی جداسازی قائم میراگرهای مایع لزج خطی و غیرخطی مبتنی بر ظرفیت نیروی میراگر پیشنهاد گردید.

تحلیل‌های متعددی با ضریب توان‌های سرعت و زلزله‌های مختلف انجام گرفت. نتایج دلالت بر این داشت که جداسازی قائم مورد مطالعه یک روش کارآمد برای کاهش پاسخ لرزه‌ای با هر دو

- SDF systems with non-linear fluid viscous dampers", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2002, 31 (9), 1623-1642.
- MAURER, *Earthquake Protection Systems, GENERAL BROCHURES*, 2011.
- Milanchian R, Hosseini M, Nekooei M, "Vertical isolation of a structure based on different states of seismic performance", *Earthquakes and Structures*, 2017, 13 (2), 103-118.
- Nekooei M, Ziyaeifar M, "Vertical Seismic Isolation of Structures", *Journal of Applied Sciences*, 2008, 8 (24).
- Paola MD, Mendola LL, Navarra G, "Stochastic seismic analysis of structures with nonlinear viscous dampers", *Journal of Structural Engineering*, 2007, 133, 1475-1478.
- Pekcan G, Mander JB, Chen SS, "Fundamental considerations for the design of non-linear viscous dampers", *Earthquake engineering & structural dynamics*, 1999, 28 (11), 1405-1425.
- Richardson A, Walsh KK, Abdullah MM, "Closed-form equations for coupling linear structures using stiffness and damping elements", *Structural Control and Health Monitoring*, 2013, 20 (3), 259-281.
- Soong TT, Constantinou MC, "Passive and active structural vibration control in civil engineering", Springer, 2014.
- Symans M, Constantinou M, "Passive fluid viscous damping systems for seismic energy dissipation", *ISET Journal of Earthquake Technology*, 1998, 35 (4), 185-206.
- Terenzi G, "Dynamics of SDOF systems with nonlinear viscous damping", *Journal of Engineering Mechanics*, 1999, 125 (8), 956-963.
- Xu Y, He Q, Ko J, "Dynamic response of damper-connected adjacent buildings under earthquake excitation", *Engineering Structures*, 1999, 21 (2), 135-148.
- Zhang W, Xu Y, "Dynamic characteristics and seismic response of adjacent buildings linked by discrete dampers", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1999, 28 (10), 1163-1185.
- Zhang W, Xu Y, "Vibration analysis of two buildings linked by Maxwell model-defined fluid dampers", *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 233 (5), 775-796.
- Zhu H, Ge D, Huang X, "Optimum connecting dampers to reduce the seismic responses of parallel structures", *Journal of Sound and Vibration*, 2011, 330 (9), 1931-1949.
- Zhu H, Xu Y, "Optimum parameters of Maxwell model-defined dampers used to link adjacent structures", *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 279 (1), 253-274.
- Ziyaeifar M, "Method of Mass Isolation in Seismic Design of Structures", *Proceeding of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, 2000.
- Ziyaeifar M, Gidfar S, Nekooei M, "A model for mass isolation study in seismic design of structures", *Structural Control and Health Monitoring*, 2012, 19 (6), 627-645.

EXTENDED ABSTRACT

Vertical Isolation of 1-Story Structures with the Nonlinear Viscous Dampers for Seismic Response Reduction

Reza Milanchian ^a, Mahmood Hosseini ^{b,*}, Masoud Nekooei ^c

^a Department of Structural Engineering, Mahabad Branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran

^b Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

^c Department of Structural Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 02 June 2017; Accepted: 22 June 2018

Keywords:

Vertical seismic isolation, Nonlinear viscous dampers, Structural control, Seismic response reduction, Non-classical damping, Runge-Kutta method.

1. Introduction

The viscous dampers have been considered as preferred supplementary energy dissipating devices for structural vibration control, especially in innovative lateral displacement control strategies. The interactional effects of connected structures were first discussed as a seismic response reduction approach for building systems by Klein et al. (1972). In the vertically isolated structures (VIS), vertical isolation layers are applied in a way to partition the structure into two interactional inner and outer substructures (Ziyaeifar et al. 2012.) A comprehensive investigation was performed on displacement control features of the vertically isolated structures interconnected by viscous and viscoelastic links (Milanchian et al. 2017).

In the present study, the effects of nonlinear behavior of viscous dampers in the efficiency of the VIS are taken into consideration. By using a set of earthquakes with a wide range of dominant periods, and conducting a series of nonlinear time history analyses, the application of nonlinear viscous dampers (NVDs) in the VIS has been thoroughly studied. In these analyses, the interaction effect of isolation ratios and link parameters on response control of the VIS was explored. Also, color contour graphs were defined for presentation and investigation of large amounts of output results, in which three states of Mass Isolation, Interactional State, and Control Mass have been differentiated.

2. Methodology

The features of nonlinear damping in an SDOF subjected to harmonic loading are investigated. Particular attention has been paid to the effect of nonlinear damping on the transient part of the response, rather than the steady state one. That is because the response to seismic excitations basically has transient nature (Fig. 1). Then, a framework has been created for comparison of linear viscous dampers (LVDs) and NVDs based on the damper force capacity.

* Corresponding Author

E-mail addresses: milanchian@iau-mahabad.ac.ir (Reza Milanchian), hosseini@iiees.ac.ir (Mahmood Hosseini), nekooei@srbiau.ac.ir (Masoud Nekooei).

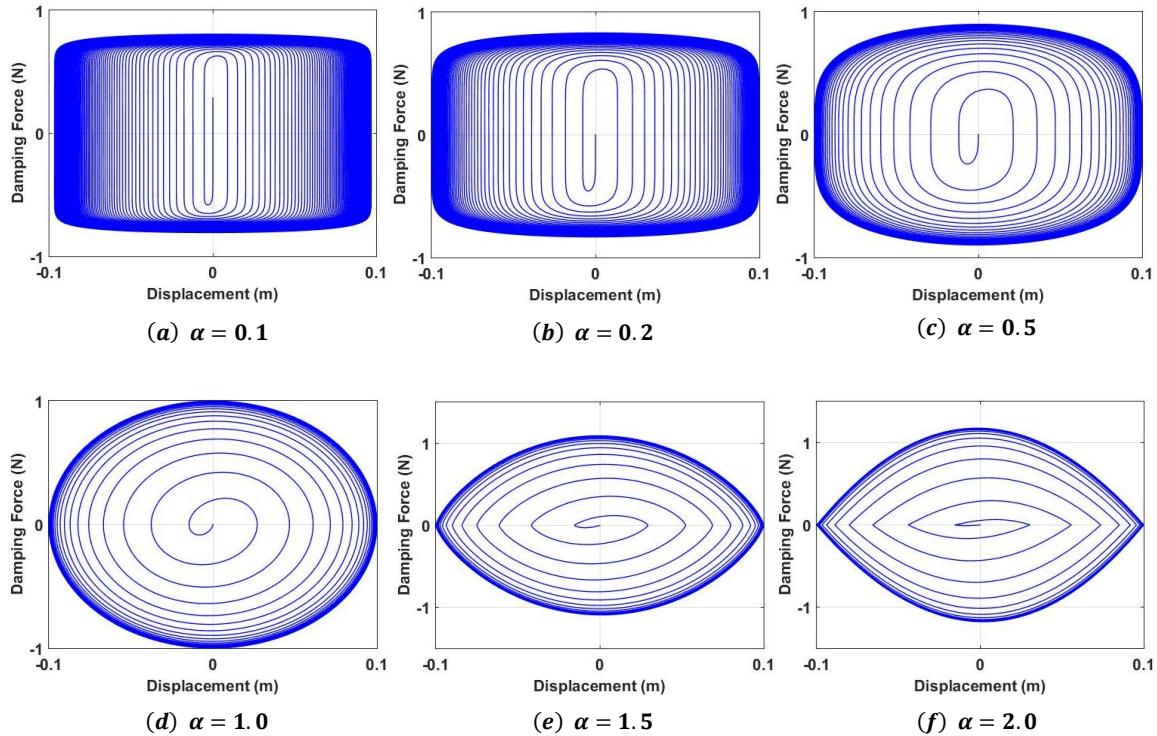


Fig. 1. Hysteresis curves for the different velocity exponents of NVDs

Although the application of the VIS in a three-dimensional structure can be achieved through partitioning the building's structure into two inner and outer substructures, it is presumably adequate to consider two-dimensional frame structures for investigating the fundamental features of the work, on this basis the analytical model of the VIS and their governing equation of motion subjected to earthquake excitations were developed. To clarify the basic concepts of the VIS, a model of 1-story single frame is considered. The 1-story VIS is subjected to different earthquake excitations, and its response histories are obtained by a series of time history analysis (THA) cases. In the considered VIS model, to solve the governing nonlinear differential equations of motion, the Runge-Kutta numerical method was employed. The maximum displacement in response history of each isolated structure, which is the most important seismic response parameter, is selected as a criterion for seismic performance evaluation.

For the VIS, presentation and investigation of a large number of the output results should include those related to both parts of the isolated structures, hence, an appropriate and comprehensive graphical representation has been introduced. In the suggested Cartesian coordinate system, horizontal and vertical coordinate's axes are considered as the stiffness and mass ratios, respectively, and the color contour graphs demonstrate the seismic response. In such graphs, the results corresponding to the stiff substructure are in central symmetry with those of flexible substructure, as the center point of the graph corresponds to $\alpha_m=0.5$ and $\alpha_s=0.5$. This representation was called Vertical Isolation Contour Graph (VICG). The efficiency of the NVD in the VIS is supposed to be evaluated by comparing it with its linear equivalent.

Hence, response history analyses initially were carried out for the VIS with the linear viscous link (

Fig. 2-c). Then, for a given velocity exponent, α , and for every pair of isolation ratios (α_{s1} and α_{m1}), the procedure for selecting the proper NVD corresponding to linear one is mainly dependent on the damper experienced force, as the maximum value of damper force in the linear viscous link is considered as damper capacity criterion. Then, the nonlinear damping coefficient, c_{nl} , is calculated in a way that the maximum values in linear and nonlinear cases become equal.

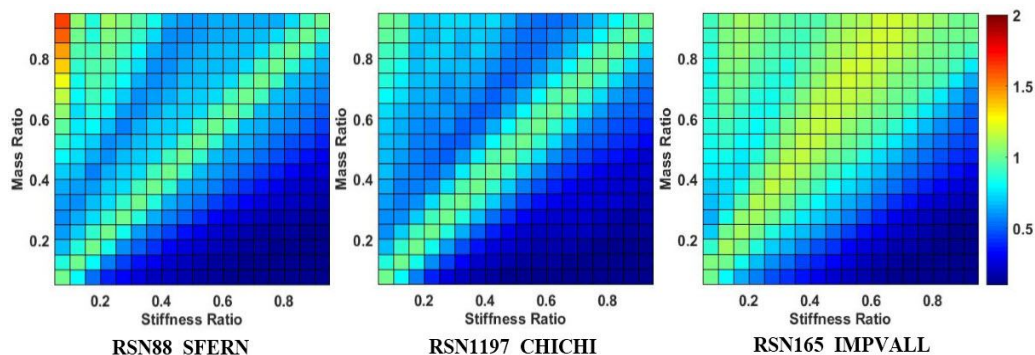


Fig. 2. Response ratios of the VIS for different velocity exponents of NVDs (RSN88_SFERN earthquake)

3. Results and discussion

Contrary to the appropriate effectiveness of NVD in shock-absorbing, dissipating induced energy and response reduction of structures, the results of this study did not indicate that much satisfactory performance of NVDs in the VIS, especially with low velocity exponents. In the NVD with low velocity exponent, the sensitivity to the relative velocity of damper decreases, conversely, the damper force gets more related to the damper relative displacements. The VIS with NVDs can resemble the VIS with visco-elastic dampers with large stiffness values in the aforementioned manner. In the VIS, the structural interaction has the main role in the response reduction, and the NVDs decrease this significant effect.

4. Conclusions

Due to time varying vibrational response of structures in earthquakes, nonlinear features of viscous dampers have been studied in the transient state of SDOF subjected to harmonic loading. Defining the damping of a system equipped with NVDs is an ambiguous topic since the recognized damping ratio for a structure with a linear viscous damper in terms of its mass, stiffness and damping coefficient is meaningless and the behavior of a system with an NVD could be similar to that of a system with hysteretic damping in some aspects. The energy-based-equivalent damping coefficient for the specified displacement value is not an appropriate scaling method and can be misleading for a random excitation like earthquake-induced motions. The numerous analyses with various velocity exponents were performed on different earthquakes and introduced VICGs were used for investigation of results. It was shown that the considered isolation technique is an effective approach in response reduction in the cases of both LVD and NVD. However, the results of this study did not indicate that much satisfactory performance of NVDs in the VIS, especially with low velocity exponents.

5. References

- Klein R, Todaro A, Finne I, "Investigation of a method to stabilize wind induced oscillations in large structures", American Society of Mechanical Engineers, 1972.
- Ziyaeifar M, Gidfar S, Nekooei M, "A model for mass isolation study in seismic design of structures", Structural Control and Health Monitoring, 2012, 19 (6), 627-645.
- Milanchian R, Hosseini M, Nekooei M, "Vertical isolation of a structure based on different states of seismic performance", Earthquakes and Structures, 2017, 13 (2), 103-118.