

بررسی طیفی رفتار سازه‌های جداسازی شده جرمی و کنترل نیمه فعال آنها در برابر زلزله

مسعود نکویی^۱ و منصور ضیایی فر^۲

۱- دانشجوی دکترای مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران،
nekoeei@iiees.ac.ir

۲- دانشیار پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

چکیده

سازه‌های جداسازی شده جرمی مورد بررسی در این مقاله از یک زیرسیستم جرمی شامل جرم اصلی سازه قرار گرفته بر روی قایی با سختی کم که از طریق مکانیزم جداسازی در ارتفاع سازه شامل میراگرهای ویسکوز به زیرسیستم سختی سازه شامل قاب مهار شده با سختی زیاد متصل شده است، تشکیل شده‌اند. مدل تحلیلی مورد استفاده یک مدل دو جرم- فنر می‌باشد که یک حالت کلی‌تری از مدل سه المانی ماکسول می‌باشد. سیستم کنترلی مورد استفاده شامل میراگرهای هیدرولیکی نیمه‌فعال می‌باشد که به عنوان جزئی از مکانیزم جداسازی در ارتفاع سازه در بین دو زیرسیستم جرمی و سختی سازه قرار می‌گیرند. در این تحقیق قابلیت روش جداسازی جرمی در کاهش اثرات ناشی از زلزله با دو رویکرد پارامتری و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در رویکرد پارامتری با تعریف ضریب جداسازی و به دست آوردن مشخصات دینامیکی سیستم، مقدار بهینه نسبی ثابت میرایی به صورت پارامتری به دست آورده شده و رابطه ضریب جداسازی با حداکثر نسبت میرایی مورد اصلی سیستم نشان داده شده است. در رویکرد عددی پاسخ طیفی سازه‌های جداسازی شده جرمی در برابر زلزله طیس در دو حالت غیرکنترلی و تحت تأثیر کنترل نیمه‌فعال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج عددی، نشان‌دهنده کاهش قابل توجه نیروهای ورودی زلزله در سازه‌های جداسازی شده جرمی نسبت به سازه‌های جداسازی نشده جرمی و نیز عملکرد مناسبتر سازه در حالت کنترلی می‌باشند.

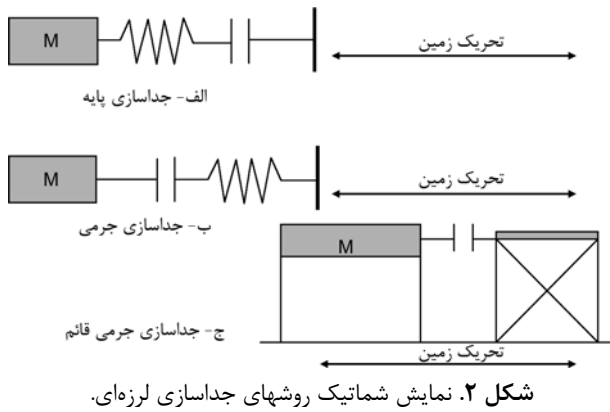
کلید واژه‌ها:

جداسازی لرزه‌ای، جداسازی جرمی، جداسازی قائم، ضریب جداسازی، نسبت میرایی ماکزیمم، کنترل نیمه‌فعال

۱- مقدمه

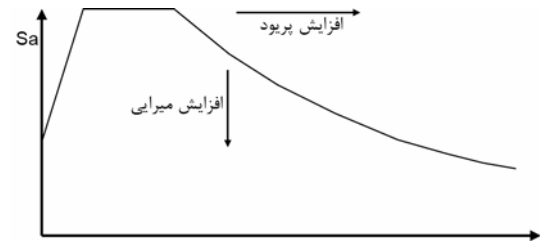
در مشخصه‌های دینامیکی سیستم در ارتباط با سختی و میرایی آن در جهت کاهش نیرو و انرژی ورودی به سازه در اثر زلزله می‌پردازند. در روند جدید طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، برای مقابله با انرژی ورودی به سازه، دو دیدگاه وجود دارد. دیدگاه اول شامل طرحهایی است که سبب کاهش نیروی وارد به سازه از طریق افزایش پیروی سازه می‌شوند که سیستم‌های جداسازی پایه در این طبقه‌بندی قرار می‌گیرند. در این سیستم‌ها با افزایش پیروی سازه و ایجاد یک تغییر در پیروی سازه، نیروهای وارد به سازه در اثر زلزله کاهش می‌یابند. دومین دیدگاه توصیه بر استفاده از مکانیزم‌های اتلاف انرژی در سازه در جهت افزایش میرایی سازه دارد. در این حالت با قرار دادن ادوات جذب انرژی در محل‌های مناسب سازه، بخشی از انرژی ورودی زلزله بوسیله آنها مستهلک شده، در نتیجه

فلسفه عمومی روشهای طراحی متداول سازه‌ها در برابر زلزله بر دو اصل ایجاد سختی و مقاومت در سازه جهت کنترل تغییر مکان جانبی و جلوگیری از تخریب اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای تحت اثر زلزله‌های کوچک و متوسط و ایجاد شکل-پذیری و قدرت جذب انرژی مناسب در سازه برای ممانعت از فروریختگی سازه در زلزله‌های شدید بنا شده است. در این روشهای طراحی، سازه در مقابل زلزله‌های متوسط و شدید رفتاری غیرارتجاعی دارد و از این رو شکل‌پذیری و جذب انرژی ناشی از زلزله به صورت تغییر شکل خمیری و ایجاد مفاصل پلاستیک از خصوصیات اساسی طراحی در این روشها می‌باشد. این مفاصل محل تجمع خسارت بوده و اغلب قابل تعمیر نیستند. حال آن که روشهای نوین طراحی لرزه‌ای سازه‌ها اغلب توصیه به حفظ رفتار ارتجاعی سیستم دارند و در عمل با تغییر



در این مقاله به بررسی طیفی رفتار لرزه‌ای این نوع سازه‌های جداسازی شده جرمی قائم به عنوان یکی از سیستم‌های نوین طراحی لرزه‌ای که با تمرکز بر جداسازی جرم سازه به عنوان عامل اصلی کاهش اثرات ناشی از زلزله در عین بالابردن عملکرد لرزه‌ای سیستم سازه‌ای، به لحاظ سهولت اجرا و اقتصادی بودن قابل رقابت با روشهای متداول طراحی لرزه‌ای سازه‌ها به نظر می‌رسد، پرداخته می‌شود. همچنین کنترل این نوع سازه‌های جداسازی شده جرمی در برابر زلزله با هدف دست یافتن به عملکرد لرزه‌ای مطلوبتر این سازه‌ها مورد بررسی قرار داده می‌شود. در این تحقیق سعی شده است تا با درک مشکلات و محدودیتهای موجود در سیستم‌های غیرفعال و فعال، از سیستم‌های نیمه‌فعال برای کنترل این سازه‌ها در برابر زلزله مورد استفاده قرار گیرد، به طوری که با حفظ قابلیت اعتماد سیستم‌های غیرفعال، تواناییهای سیستم‌های فعال را نیز در واکنش نسبت به تغییرات دارا باشد و در عین حال انرژی خارجی مورد نیاز برای کنترل سازه بسیار کوچکتر از انرژی مورد نیاز سیستم‌های کنترل فعال باشد. بنابراین ابزارها و عناصر کنترل در این سیستم‌ها، انرژی مکانیکی اضافه‌ای را به سیستم سازه اضافه نمی‌نمایند و بنابراین پایداری سازه همواره برقرار بوده و نگرانی از عملکرد ناصحیح سیستم کنترلی وجود نخواهد داشت و به لحاظ اقتصادی نیز به صرفه می‌باشند [۶-۷]. در زمینه سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال کارهای زیادی انجام گرفته است که از آن جمله می‌توان به کارهای دایک، اسپنسر و بیکر در زمینه میراگرهای با مایع قابل کنترل و کارهای کبوری، کوراتا و کورینو در زمینه میراگرهای با منفذ خروجی قابل کنترل یا میراگرهای هیدرولیکی نیمه‌فعال نام برد [۸-۱۰]. سیستم کنترلی مورد استفاده در این مقاله شامل میراگرهای هیدرولیکی نیمه فعال می‌باشد که به عنوان جزیی از مکانیزم جداسازی در ارتفاع سازه در بین دو زیرسیستم جرمی و سختی سازه قرار می‌گیرند. در این تحقیق قابلیت روش جداسازی جرمی در

خسارت وارده به سازه که ناشی از اتلاف انرژی به صورت هیسترتیک می‌باشد، کاهش می‌یابد. اغلب از هر دو دیدگاه در روشهای جداسازی لرزه‌ای سازه‌ها در جهت کاهش نیروی ورودی زلزله استفاده می‌شود که این مسأله در شکل (۱) به‌طور شماتیک نشان داده شده است [۱-۲].



شکل ۱. نمایش شماتیک ایده روشهای جداسازی لرزه‌ای.

در روشهای جداسازی لرزه‌ای همچون جداسازی پایه، نرمی موجود در لایه‌های جداگر سبب افزایش پریود سازه شده و نیروهای وارد به سازه را کاهش می‌دهد. در این روش علاوه بر جرم سازه، سیستم سختی جانبی آن نیز از زمین جدا می‌گردد، شکل (۲-الف). از آنجایی که جرم عامل اصلی جذب انرژی در سازه می‌باشد اگر بتوان فقط جرم را از منبع ایجاد انرژی جدا نمود، می‌توان کارایی سیستم را بالا برده و در ضمن هزینه‌های ساخت را نیز کاهش داد. این نگرش که جداسازی جرمی نام گرفته است، توجه اصلی را به جرم سازه به عنوان عامل مورد نظر در جداسازی معطوف می‌دارد که محور اصلی این تحقیق می‌باشد، شکل (۲-ب). این که بتوان تمامی جرم ساختمان را از سیستم سختی جانبی آن جدا نمود غیرممکن خواهد بود، با این وجود راه‌حلهای مناسبی برای این که بتوان مقدار عمده‌ای از جرم سیستم را جدا نمود وجود دارند که ضیایی‌فر و همکاران به آنها پرداخته‌اند [۳-۵].

در میان راه‌حلهای متفاوتی که در این رابطه می‌توان یافت، در سازه‌های معمولی جداسازی می‌تواند با استفاده از جداسازی قائم جرم از سختی جانبی در ارتفاع ساختمان انجام گیرد. این روش سیستم را به دو زیرسیستم همان‌گونه که در شکل (۲-ج) نشان داده شده، تقسیم می‌نماید. در این روش سعی بر این است که با تمرکز اکثر جرم سازه در یک زیرسیستم جرمی و نرم نمودن آن، پریود زیرسیستم افزایش داده شود تا نیروی وارد به آن کاهش یابد. برای کاهش تغییرمکانها و همچنین مقاومت در برابر نیروهای جانبی، می‌توان از زیرسیستم سختی جانبی سازه کمک گرفت. در این راستا از سیستم‌های جذب انرژی مانند میراگرهای ویسکوز به عنوان جزیی از سیستم جداساز، برای کنترل تغییرمکان و اتلاف انرژی مابین دو زیرسیستم جرمی و سختی استفاده می‌شود.

سختی سازه جداسازی شده جرمی می‌باشند، شکل (۳).
فرم ماتریسی معادلات فوق به صورت رابطه (۴) قابل ارائه می‌باشد:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M]\{1\}\ddot{u}_g \quad (4)$$

که ماتریسهای M ، C و K به ترتیب ماتریسهای جرم، میرایی و سختی و بردار U بردار جابه‌جایی سازه جداسازی شده جرمی می‌باشد که به صورت روابط (۵) تا (۸) قابل محاسبه می‌باشند:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & \cdot \\ \cdot & m_p \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} (c_1 + c_p) & -c_p \\ -c_p & (c_p + c_p) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 & \cdot \\ \cdot & k_p \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\{U\} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_p \end{bmatrix} \quad (8)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، ماتریس میرایی سیستم فوق برخلاف سیستم‌های کلاسیک، متناسب با ماتریسهای جرم و سختی سیستم نمی‌باشد و به بیان دیگر:

$$[C] \neq \beta_1 [M] + \beta_p [K] \quad (9)$$

که در رابطه (۹) β_1 و β_2 ضرایب تناسب هستند. بنابراین در حالت کلی برای به دست آوردن پارامترهای دینامیکی سیستم فوق باید از روشهای تحلیل سیستم‌های با میرایی غیرکلاسیک (نامتناسب) استفاده کرد.

۲-۱- بررسی پارامتری مسئله

در اینجا برای بررسی سیستم فوق از یک روش مستقیم برای حل معادلات دیفرانسیل حرکت سازه استفاده می‌شود. از ترکیب معادلات دیفرانسیل حرکت درگیر ذکر شده در روابط (۲) و (۳) بدون حضور نیروی زلزله می‌توان به معادله دیفرانسیل درجه ۴ غیر درگیر در رابطه (۱۰) دست یافت:

$$(m_1 m_p)^{(r)} u_1 + [m_1(c_p + c_r) + m_p(c_p + c_1)]^{(r)} u_1 + [m_1 k_p + m_p k_1 + (c_p + c_1)(c_p + c_r) - c_p^2]^{(r)} u_1 \quad (10)$$

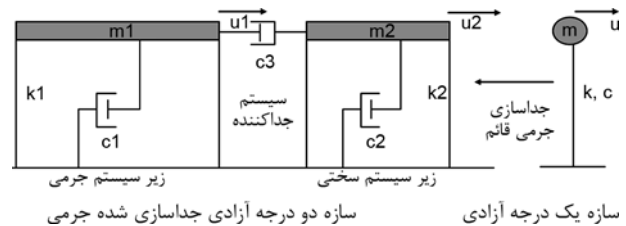
$$+ [k_1(c_p + c_r) + k_p(c_p + c_1)]^{(l)} u_1 + (k_1 k_p) u_1 = \cdot$$

معادله دیفرانسیل فوق در حقیقت نشاندهنده رفتار یک مدل کلی تری از مدل ماکسول می‌باشد به طوری که اگر $m_p = 0$ و $c_1 = c_p = 0$ در نظر گرفته شود، مدل فوق به یک مدل سه المانی ماکسول مانند شکل (۴) تبدیل می‌شود. مدل سه المانی ماکسول یکی از مدل‌های مناسب برای بررسی دقیق رفتار سیستم‌های دینامیکی به‌شمار می‌رود [۱۰، ۱۴].

در کاهش اثرات ناشی از زلزله در دو حالت غیرکنترلی و تحت تأثیر کنترل نیمه‌فعال با استفاده از یک مدل تحلیلی مناسب دو جرم و فنر [۱۱-۱۳] و بکارگیری یک الگوریتم کنترلی ساده در عین حال کارا، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- بررسی تئوری مسئله و مدل مورد استفاده

همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، یک سازه یک درجه آزادی طراحی شده بر اساس روشهای متداول طراحی لرزه‌ای در صورتی که به روش جداسازی جرمی طراحی شود به یک سازه دو درجه آزادی که دارای دو زیرسیستم یک درجه آزادی می‌باشد، تبدیل می‌شود. در این سازه زیرسیستم جرمی (با سختی کم) که قسمت عمده جرم سازه را دارا می‌باشد از طریق مکانیزم جداسازی که شامل میراگر است به زیرسیستم سختی (با جرم کم) که دارای سختی زیادی می‌باشد، متصل شده است.



شکل ۳. یک مدل ساده جهت بررسی رفتار سازه‌های جداسازی شده جرمی.

در شکل فوق پارامترهای m_1 ، k_1 و c_1 به ترتیب معرف جرم، سختی و میرایی زیرسیستم جرمی، پارامترهای m_p ، k_p و c_p به ترتیب معرف جرم، سختی و میرایی زیرسیستم سختی و c_3 معرف ثابت میرایی سیستم جداکننده در سازه دو درجه آزادی جداسازی شده جرمی می‌باشند و پارامترهای m ، k و c به ترتیب معرف مقادیر جرم، سختی و میرایی سازه یک درجه آزادی اولیه می‌باشند که بنابراین تساویها به قرار رابطه (۱) می‌باشند:

$$m = m_1 + m_p, \quad k = k_1 + k_p, \quad c = c_1 + c_p \quad (1)$$

معادلات دیفرانسیل حرکت سازه دو درجه آزادی جداسازی

شده جرمی در برابر زلزله به صورت روابط (۲) و (۳) می‌باشد:

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 + c_p (\dot{u}_1 - \dot{u}_p) = -m_1 \ddot{u}_g \quad (2)$$

$$m_p \ddot{u}_p + c_p \dot{u}_p + k_p u_p + c_p (\dot{u}_p - \dot{u}_1) = -m_p \ddot{u}_g \quad (3)$$

که در این معادلات \ddot{u}_g شتاب زمین در هنگام زمین‌لرزه، u_1 و u_p به ترتیب معرف جابه‌جاییهای زیرسیستم‌های جرمی و

همان‌طور که مشاهده می‌شود سیستم فوق دارای دو مود ارتعاشی می‌باشد که مشخصات آنها از معادله فوق قابل استخراج می‌باشد. می‌توان نشان داد که وقتی مقدار c_p از مقدار زیر که در اینجا c_{opt} نامیده می‌شود بیشتر شود، فرکانس هر دو مود ارتعاشی به سمت فرکانس سازه یک درجه آزادی اولیه جداسازی نشده، شکل (۳)، که برابر $w = \sqrt{\frac{k}{m}}$ می‌باشد، میل خواهد کرد، رابطه (۱۵).

$$c_{opt} = 2 \frac{(1-\alpha)}{(1+\alpha)} \sqrt{\alpha} mw \quad (15)$$

همچنین می‌توان نشان داد که وقتی مقدار c_p برابر c_{opt} می‌باشد، نسبت میرایی هر دو مود ارتعاشی برابر رابطه (۱۶) که ماکزیمم نسبت میرایی مود اصلی سیستم نیز محسوب می‌شود، می‌باشد.

$$\zeta_{max} = \frac{(1-\alpha)}{2\sqrt{\alpha}} \quad (16)$$

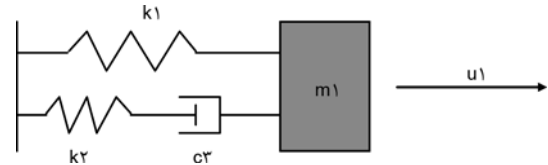
بنابراین به طور مثال به ازای $\alpha = 0.2$ ، میرایی ماکزیمی در حدود $\zeta_{max} = 90\%$ برای مود اصلی سیستم به ازای $c_p = c_{opt}$ حاصل می‌شود که مقدار بسیار بالایی برای نسبت میرایی یک سیستم محسوب می‌شود و به نوعی اهمیت بررسی رفتار سازه‌های جداسازی شده جرمی را نشان می‌دهد. در صورتی که نسبت میرایی ظاهری این سیستم طبق رابطه (۱۷) تعریف شود، آنگاه برای مثال فوق درصد میرایی ظاهری سیستم برابر $d = 25\%$ می‌باشد که تفاوت قابل توجهی با نسبت میرایی مود اصلی سیستم دارا می‌باشد که این مسأله لزوم استفاده از روشهای تحلیل سیستم‌های با میرایی غیر کلاسیک را در مورد این سازه‌ها نشان می‌دهد.

$$d = \frac{c_p}{2mw} \quad (17)$$

در شکل‌های (۵) و (۶) تغییرات میرایی و پریود سیستم جداسازی شده جرمی به ازای ضریب جداسازی $\alpha = 0.2$ بر حسب تغییرات میرایی ظاهری سیستم که مبین تغییرات ثابت میرایی میراگر جداکننده دو زیرسیستم می‌باشد، آورده شده است. در شکل (۶) مقادیر مربوط به تغییرات پریود به صورت نسبت این مقادیر به پریود سازه جداسازی نشده جرمی T آورده شده است.

در صورتی که زیرسیستم سختی به عنوان یک تکیه‌گاه صلب برای زیرسیستم جرمی فرض شود، نسبت میرایی ظاهری زیرسیستم جرمی طبق رابطه (۱۸) قابل تعریف می‌باشد:

$$dm = \frac{c_p}{2m_1w_1} \quad (18)$$



شکل ۴. مدل سه المانی ماکسول.

اگر جواب عمومی معادله دیفرانسیل فوق به صورت Ae^{st} در نظر گرفته شود، از جایگذاری این جواب در معادله مذکور، یک معادله جبری درجه ۴ به صورت رابطه (۱۱) به دست می‌آید که ریشه‌های این معادله مشخص‌کننده جوابهای عمومی معادله دیفرانسیل فوق و نیز مشخصات دینامیکی سیستم مورد بررسی می‌باشد.

$$\begin{aligned} & (m_1 m_p) S^4 + [m_1(c_p + c_r) + m_p(c_p + c_r)] S^3 \\ & + [m_1 k_p + m_p k_1 + (c_p + c_r)(c_p + c_r) - c_p^2] S^2 \\ & + [k_1(c_p + c_r) + k_p(c_p + c_r)] S + (k_1 k_p) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

که با فرض $c_1 = c_p = 0$ معادله جبری (۱۲) از رابطه (۱۱) حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} & (m_1 m_r) S^4 + c_r(m_1 + m_r) S^3 \\ & + (m_1 k_r + m_r k_1) S^2 + c_r(k_1 + k_r) S + (k_1 k_r) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

لازم به ذکر است که در حالت کلی معادلات جبری درجه ۴ فوق به صورت عددی قابل حل می‌باشند. در اینجا برای حل پارامتری معادله جبری فوق ضریب جداسازی لرزه‌ای α به صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌شود [۱۱-۱۲]:

$$m_p = \alpha m_1, \quad k_1 = \alpha k_p \quad (13)$$

بنابراین معادله جبری آورده شده در رابطه (۱۲) با توجه به رابطه (۱) و تعریف فوق به صورت رابطه (۱۴) قابل تفکیک است:

$$\begin{aligned} & \left[S^2 + \frac{1}{2} \frac{c_p}{m} \left(\frac{1+\alpha}{\alpha} \right)^2 \right] - \\ & \left[\sqrt{\frac{c_p^2}{m^2} \left(\frac{1+\alpha}{\alpha} \right)^2 - 4 \frac{k}{m} \left(\frac{1-\alpha}{\sqrt{\alpha}} \right)^2} \right] S + \frac{k}{m} \times \\ & \left[S^2 + \frac{1}{2} \frac{c_p}{m} \left(\frac{1+\alpha}{\alpha} \right)^2 + \right. \\ & \left. \left[\sqrt{\frac{c_p^2}{m^2} \left(\frac{1+\alpha}{\alpha} \right)^2 - 4 \frac{k}{m} \left(\frac{1-\alpha}{\sqrt{\alpha}} \right)^2} \right] S + \frac{k}{m} \right] = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

می‌شود که مقادیر آنها وابسته به زلزله رخ داده می‌باشد و به طور شماتیک در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. همچنین طبق رابطه (۱۶) در صورتی که ضریب جداسازی لرزه‌ای $\alpha=0.1$ اختیار شود، می‌توان به ماکزیمم درصد میرایی مود اصلی سیستم بالاتر از ۱۰۰ درصد نیز دست یافت. نتایج این بررسیها در بخش نتایج عددی آورده شده است.

۲-۲- تعیین مشخصات دینامیکی سیستم در حالت کلی

در تحلیل یک سیستم دینامیکی مشابه مدل ارائه شده در قسمت قبل اگر ماتریس میرایی متناسب با ماتریسهای جرم و سختی نباشد و یا در حالت کلی اگر ماتریسهای مشخصه یک سیستم دینامیکی (ماتریس جرم، سختی و میرایی) در رابطه تعریف شده توسط کاگی و اکلی [۱۵] ذکر شده در رابطه (۱۹) صادق نباشند، سیستم مورد نظر دارای میرایی غیرکلاسیک خواهد بود.

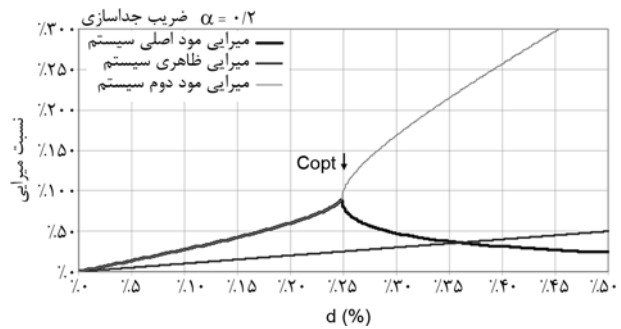
$$[C][M]^{-1}[K] = [K][M]^{-1}[C] \quad (19)$$

در این حالت تحلیل مودال سازه بر مبنای استفاده از اشکال مودی سیستم با میرایی غیر کلاسیک (اشکال مودی مختلط) صورت می‌پذیرد. در تحلیل مودال سیستم‌های با میرایی غیرکلاسیک، معمولاً معادله دیفرانسیل n بعدی حرکت به یک معادله دیفرانسیل درجه اول $2n$ بعدی تبدیل می‌شود. در این رابطه می‌توان به تحقیقات فوس [۱۶] اشاره نمود. به عنوان یک بررسی جامع روشهای تحلیل مودال سیستم‌های با میرایی غیر کلاسیک کار انجام یافته توسط ولتسوس و ونچورا [۱۷] قابل ذکر است. همچنین در این زمینه می‌توان به کار سینگ و آشتیانی [۱۸] اشاره نمود.

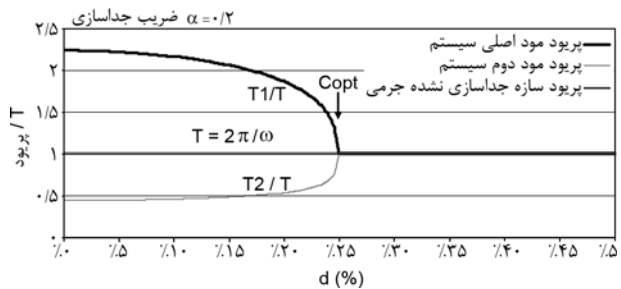
۳- کنترل نیمه فعال سازه جداسازی شده جرمی

به طور کلی همان طور که در ابتدای مقاله نیز ذکر شد، معایبی در سیستم‌های کنترل فعال و غیرفعال مشاهده می‌شود که دامنه کارایی آنها را محدود می‌سازد، بنابراین در این تحقیق از سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال که معایب فوق در آنها کاهش یافته و سطح عملکرد سیستم کنترلی در آنها افزایش یافته است [۱۹-۲۰]، برای کنترل سازه‌های جداسازی شده جرمی استفاده می‌شود.

برای کنترل سازه‌های جداسازی شده جرمی همان طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، از میراگرهای هیدرولیکی نیمه‌فعال به عنوان سیستم جداکننده دو زیرسیستم سختی و نرمی و نیز به عنوان سیستم کنترلی این سازه‌ها استفاده می‌شود.

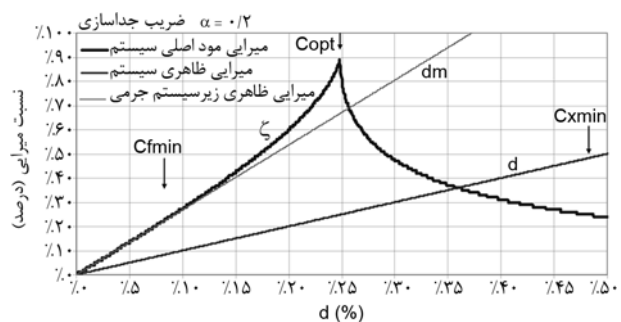


شکل ۵. تغییرات میرایی سیستم جداسازی شده جرمی بر حسب تغییرات میرایی ظاهری سیستم.



شکل ۶. تغییرات پریود سیستم جداسازی شده جرمی بر حسب تغییرات میرایی ظاهری سیستم.

در رابطه (۱۸) m_1 و w_1 به ترتیب فرکانس و جرم زیرسیستم جرمی می‌باشد. برای مثال فوق درصد میرایی ظاهری زیرسیستم جرمی برابر $dm = 67\%$ می‌باشد که تخمین نزدیکی برای میرایی واقعی سیستم محسوب می‌شود. در شکل (۷) تغییرات میرایی واقعی سیستم با تغییرات میرایی ظاهری سیستم در دو حالت فوق مقایسه شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود به ازای ثابت میرایی‌های کمتر از C_{opt} میرایی ظاهری زیرسیستم جرمی مقادیر نسبتاً نزدیکی را نسبت به میرایی واقعی سیستم دارا می‌باشد. به جز ثابت میرایی C_{opt} مقادیر ثابت میرایی دیگری تحت عنوان C_{fmin} و C_{xmin} در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند که به ترتیب معرف ثابتهای میرایی می‌باشند که به ازای آنها جابه‌جایی کمینه زیرسیستم جرمی و برش پایه کمینه در سازه تحت زلزله ایجاد

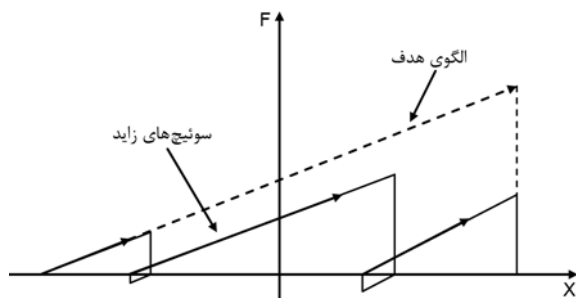


شکل ۷. مقایسه تغییرات میرایی واقعی سیستم جداسازی شده جرمی با تغییرات میرایی ظاهری سیستم.

$$\begin{cases} c_r = c_{r \max} & \text{if } \dot{u}_1(\dot{u}_1 - \dot{u}_r) > 0 \\ c_r = c_{r \min} & \text{if } \dot{u}_1(\dot{u}_1 - \dot{u}_r) < 0 \end{cases} \quad (20)$$

روابط بالا نشان می‌دهد که چنانچه جهت نیروی میراگر خلاف جهت حرکت جرم اصلی سازه (واقع بر زیر سیستم نرمی) باشد، از ثابت میرایی بالا برای میراگر استفاده می‌شود و در غیر این صورت ثابت میرایی حداقل برای میراگر انتخاب خواهد شد. بنابراین این الگوریتم باعث می‌شود که تغییر مکان سازه نرم تحت کنترل قرار گیرد، شکل (۸).

در این سیستم کنترلی نیمه‌فعال جلوگیری از سوئیچ کردنهای بی‌مورد و زاید *Extra Switching* یکی از مسائل مورد توجه می‌باشد؛ زیرا که جلوگیری از این مسأله موجب بهینه‌تر شدن سیستم کنترلی و بالاتر رفتن سطح عملکرد سیستم می‌شود که این مسأله به‌طور شماتیک در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، سوئیچ کردنهای بی‌مورد و زاید مانع از این می‌شود تا سیستم کنترلی به‌طور بهینه عمل کند. لازم به ذکر است که در سیستم‌های چند درجه آزادی *MDOF* جلوگیری از سوئیچ کردنهای بی‌مورد و زاید از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد [۱۰].

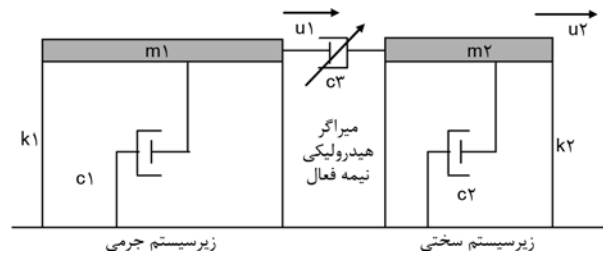


شکل ۱۰. نمایش شماتیک تأثیر منفی سوئیچ کردنهای زاید در سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال [۱۰].

همان‌طور که ذکر شد در این تحقیق از الگوریتم *On/Off Skyhook* در کنترل نیمه‌فعال سازه‌های جداسازی شده جرمی در برابر زلزله استفاده می‌شود. ثابتهای میرایی حداقل و حداکثر میراگر سیستم جداساز که در این الگوریتم کنترلی استفاده شده است، با توجه به پاسخ مناسبتر سازه در برابر زلزله (شامل جابه‌جایی، نیرو، شتاب و ...) به‌صورت رابطه (۲۱) در نظر گرفته شده‌اند:

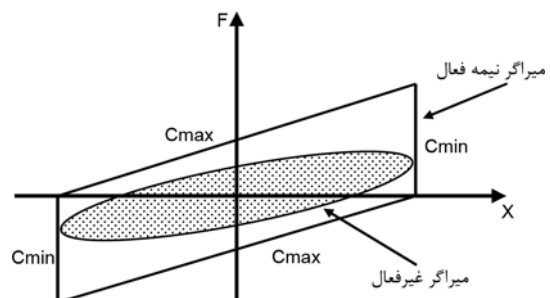
$$c_{r \min} = 0.9 c_{opt} \quad , \quad c_{r \max} = 3 c_{r \min} \quad (21)$$

که c_{opt} از رابطه (۱۵) قابل محاسبه می‌باشد. در این الگوریتم کنترلی با استفاده از جملات شرطی منطقی دیگر سعی بر بالا بردن عملکرد سیستم کنترلی می‌شود. از جمله پارامترهای



شکل ۸. مدل مورد استفاده برای کنترل نیمه‌فعال سازه‌های جداسازی شده جرمی.

در این سیستم الگوریتمهای کنترلی به‌صورت الگوریتم‌های باز- بسته *on/off* یا *Bang-Bang* می‌باشند که در عین ساده بودن سبب می‌شوند تا سیستم کنترلی که در اینجا میراگرهای هیدرولیکی نیمه‌فعال می‌باشند با تغییر در ثابت میرایی خود (با باز و بسته کردن شیر کنترلی) و سوئیچ کردن بین دو حالت کنترلی، باعث بهبود عملکرد سیستم نسبت به حالت غیرفعال شود که در شکل (۹) مقایسه این عملکردها تحت یک بار هارمونیک نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، سیستم کنترلی با سوئیچ کردن بین دو حالت کنترلی میزان انرژی بیشتری را در این بارگذاری تلف می‌کند که البته این مسأله می‌تواند با افزایش نیروی میراگر نیز همراه باشد. در حقیقت در این سیستم کنترلی با استفاده از الگوریتمهای کنترلی نیمه‌فعال مناسب، سطح عملکرد سیستم افزایش داده می‌شود و بنابراین می‌توان به سطح عملکرد مورد نظر و تأمین محدودیتهای مربوط به پاسخ سازه در برابر زلزله (مانند محدودیتهای مربوط به جابه‌جایی و جابه‌جایی نسبی در طبقات سازه) دست یافت.

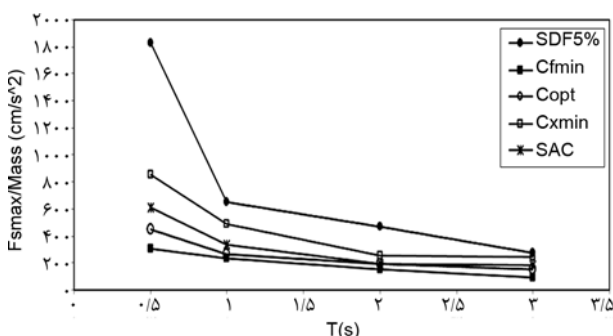


شکل ۹. مقایسه عملکرد میراگر نیمه‌فعال و میراگر غیرفعال تحت بارگذاری هارمونیک [۱۰].

از میان الگوریتم‌های مناسب برای استفاده در این سیستم کنترلی جهت کنترل نیمه‌فعال سازه‌های جداسازی شده جرمی، الگوریتم *On/Off Skyhook* [۲۱]، در این تحقیق انتخاب شد. منطبق بر این الگوریتم بر اساس رابطه (۲۰) قابل بیان می‌باشد:

تحلیلی بخش ۲ بدین صورت تعیین می‌شوند که در عین ایجاد میرایی یکسان در زیرسیستم‌های جرمی و سختی، میرایی سازه یک درجه آزادی (SDF) جداسازی نشده جرمی نیز به ازای $c = c_1 + c_2$ معادل ۵ درصد باشد. بررسی رفتار این سازه‌ها در برابر زلزله با استفاده از برنامه کامپیوتری که برای تحلیل این سازه‌ها تهیه شده است، انجام شده است. در این برنامه کامپیوتری از روش غیرشرطی پایدار انتگرال‌گیری گام‌به‌گام تتای ویلسون برای تحلیل تاریخچه زمانی سازه‌های جداسازی شده جرمی که تحت تأثیر کنترل نیمه‌فعال نیز قرار دارند استفاده شده است که ضریب تتای ویلسون در این بررسیها برابر $1/4$ و گام زمانی انتگرال‌گیری برابر 0.02 ثانیه در نظر گرفته شده است. برای تعیین مشخصه‌های دینامیکی سیستم از روشهای تحلیل سیستم‌های با میرایی غیرکلاسیک ذکر شده در بخش ۲ و برای کنترل نیمه‌فعال سازه‌های جداسازی شده جرمی از الگوریتم کنترلی معرفی شده در بخش ۳ استفاده شده است. در شکل‌های (۱۲) تا (۱۶) پاسخ سازه‌های جداسازی شده جرمی در برابر زلزله در در حالت‌های غیرکنترلی و کنترلی (SAC) مورد بررسی قرار گرفته و با پاسخ سازه‌های جداسازی نشده جرمی یک درجه آزادی با میرایی ۵ درصد ($SDF5\%$) در برابر زلزله مقایسه شده است. همچنین در جدول‌های (۱) تا (۴) مقایسه نتایج عددی این بررسیها آورده شده است.

نتایج به‌طور کلی، نشان‌دهنده کاهش قابل توجه نیروهای ورودی زلزله در سازه‌های جداسازی شده جرمی نسبت به سازه‌های جداسازی نشده جرمی و عملکرد لرزه‌ای بهتر این سازه‌ها در برابر زلزله می‌باشند. همچنین این نتایج عملکرد مطلوبتر سازه‌های جداسازی شده جرمی در برابر زلزله را در حالت کنترلی نسبت به حالات دیگر نشان می‌دهند. این سیستم کنترلی توانسته است در عین کنترل نیرو و شتاب در سازه به جابه‌جاییهای کمینه در سازه دست یابد.

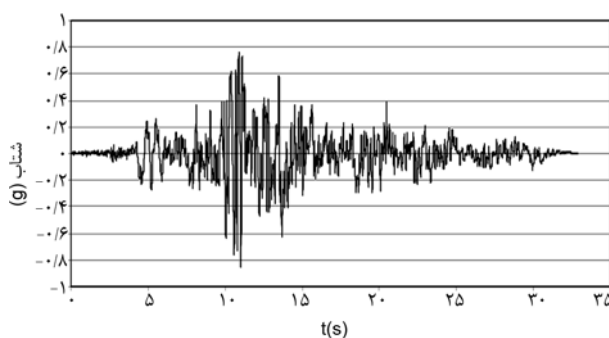


شکل ۱۲. مقایسه مقادیر بیشینه برش پایه در سازه‌های جداسازی شده جرمی در حالت‌های غیرکنترلی و کنترلی با سازه‌های جداسازی نشده جرمی.

مهم در این عملیات منطقی می‌توان به جابه‌جایی زیرسیستم‌های سختی و جرمی و فاصله زمانی بین سوئیچ‌های متوالی اشاره کرد. معادلات دیفرانسیل حرکت سازه دو درجه آزادی جداسازی شده جرمی تحت تأثیر کنترل نیمه‌فعال نیز مطابق روابط (۲) و (۳) می‌باشد با این تفاوت که ثابت c_2 بین دو مقدار فوق متغیر می‌باشد. با توجه به این رفتار غیرخطی میراگر از روش غیرشرطی پایدار انتگرال‌گیری گام به گام تتای ویلسون [۲۲] برای تحلیل تاریخچه زمانی این معادلات استفاده شده است. نتایج مربوط به کنترل نیمه‌فعال سازه‌های جداسازی شده جرمی در برابر زلزله به صورت نمودارهایی تحت عنوان SAC ($Semi-Active Control$) در بخش نتایج عددی آورده شده است.

۴- نتایج عددی

در این تحقیق بررسی رفتار خطی سازه‌های جداسازی شده جرمی در برابر زلزله به صورت بررسی طیفی براساس مدل ارائه شده در بخش ۲ انجام شده است. در این بررسی رفتار سازه‌های جداسازی شده جرمی در برابر زلزله طیس ۱۹۷۸، شکل (۱۱)، در دو حالت غیرکنترلی و کنترلی مورد بررسی قرار گرفته شده است و با رفتار سازه‌های جداسازی نشده جرمی مقایسه شده است. در حالت غیرکنترلی یا غیرفعال بررسی رفتار سازه جداسازی شده جرمی به ازای مقادیر مختلفی از ثابت میرایی میراگر جداکننده دو زیر سیستم انجام شده است.



شکل ۱۱. شتابنگاشت زلزله طیس ۱۹۷۸.

نتایج ارائه شده در این بخش شامل سه حالت از ثابت میرایی میراگر می‌باشد که در آنها به ترتیب نیروی برش پایه سازه حداقل باشد $c_2 = c_f \min$ ، درصد میرایی سیستم حداکثر باشد $c_2 = c_{opt}$ و جابه‌جایی زیرسیستم جرمی حداقل باشد $c_2 = c_{x \min}$. ضریب جداسازی در این بررسیها برابر 0.1 در نظر گرفته شده است. پیرو سازه‌های در نظر گرفته شده در این بررسی طیفی به ترتیب برابر 0.15 ، 0.1 ، 0.2 و 0.3 ثانیه می‌باشد. لازم به ذکر است که ضرایب c_1 و c_2 آورده شده در مدل

جدول ۱: میرایی مود اصلی سیستم در هر یک از حالت‌های غیرکنترلی جداسازی شده جرمی برای سازه‌های با پیوندهای مختلف.

نسبت میرایی (درصد)			$\alpha = 0.1$
C_{xmin}	C_{opt}	C_{fmin}	$T(s)$
۲۷	۱۱۸	۳۷	۰/۵۰
۱۵	۱۱۸	۲۴	۱/۰۰
۲۱	۱۱۸	۲۹	۲/۰۰
۹	۱۱۸	۲۴	۳/۰۰

جدول ۲: نسبت مقادیر بیشینه برش پایه سازه‌های جداسازی شده جرمی در حالت‌های غیرکنترلی و کنترلی به مقادیر بیشینه برش پایه سازه‌های جداسازی نشده جرمی با پیوندهای مختلف.

$F_{smax}(IS)/F_{smax}(SDF5\%)$				$\alpha = 0.1$
SAC	C_{xmin}	C_{opt}	C_{fmin}	$T(s)$
۰/۳۳	۰/۴۶	۰/۲۵	۰/۱۷	۰/۵۰
۰/۵۱	۰/۷۴	۰/۴۰	۰/۳۵	۱/۰۰
۰/۴۱	۰/۵۵	۰/۴۰	۰/۳۲	۲/۰۰
۰/۶۵	۰/۸۹	۰/۵۴	۰/۳۲	۳/۰۰

جدول ۳: نسبت مقادیر بیشینه جابه‌جایی زیرسیستم جرمی در سازه‌های جداسازی شده جرمی در حالت‌های غیرکنترلی و کنترلی به مقادیر بیشینه جابه‌جایی سازه‌های جداسازی نشده جرمی با پیوندهای مختلف.

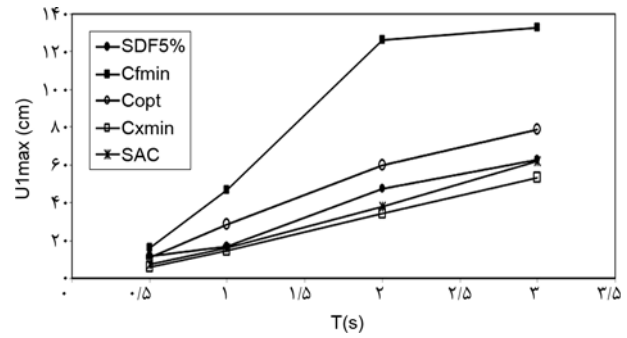
$U_{lmax}/U_{lmax}(SDF5\%)$				$\alpha = 0.1$
SAC	C_{xmin}	C_{opt}	C_{fmin}	$T(s)$
۰/۶۴	۰/۵۰	۰/۹۳	۱/۳۷	۰/۵۰
۰/۹۷	۰/۹۰	۱/۷۱	۲/۸۲	۱/۰۰
۰/۸۰	۰/۷۲	۱/۲۶	۲/۶۵	۲/۰۰
۰/۹۸	۰/۸۵	۱/۲۶	۲/۱۱	۳/۰۰

جدول ۴: نسبت مقادیر بیشینه شتاب زیرسیستم جرمی در سازه‌های جداسازی شده جرمی در حالت‌های غیرکنترلی و کنترلی به مقادیر بیشینه شتاب سازه‌های جداسازی نشده جرمی با پیوندهای مختلف.

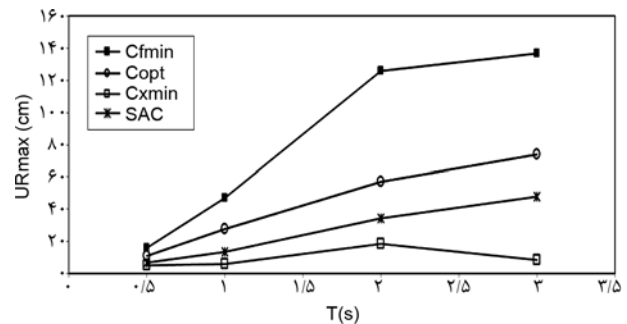
$A_{lmax}/A_{lmax}(SDF5\%)$				$\alpha = 0.1$
SAC	C_{xmin}	C_{opt}	C_{fmin}	$T(s)$
۰/۸۲	۰/۴۶	۰/۲۵	۰/۱۶	۰/۵۰
۰/۵۱	۰/۷۴	۰/۳۹	۰/۳۳	۱/۰۰
۰/۹۵	۰/۵۴	۰/۴۰	۰/۳۵	۲/۰۰
۰/۷۰	۰/۸۹	۰/۵۴	۰/۲۷	۳/۰۰

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

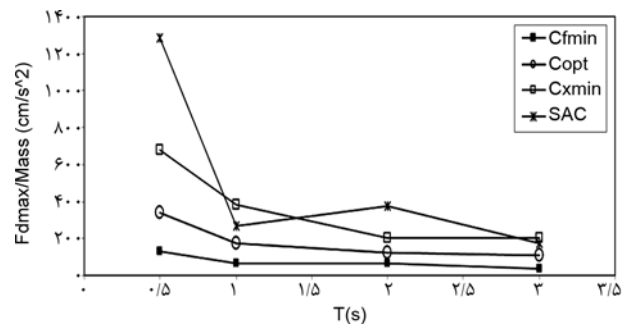
نتایج این تحقیق نشان‌دهنده کاهش قابل توجه نیروهای ورودی زلزله در سازه‌های جداسازی شده جرمی نسبت به



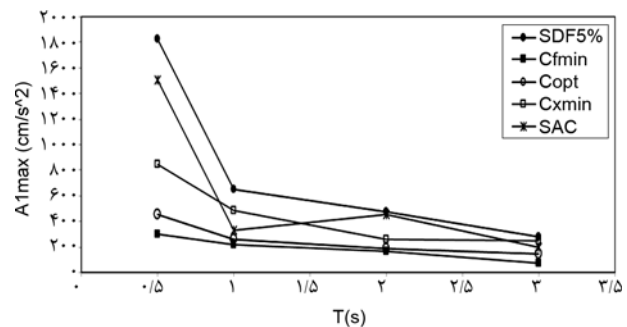
شکل ۱۳. مقایسه مقادیر بیشینه جابه‌جایی زیرسیستم جرمی در سازه‌های جداسازی شده جرمی در حالت‌های غیرکنترلی و کنترلی با مقادیر بیشینه جابه‌جایی سازه‌های جداسازی نشده جرمی.



شکل ۱۴. مقایسه مقادیر بیشینه جابه‌جایی نسبی دو زیرسیستم جرمی و سختی درسازه‌های جداسازی شده جرمی در حالت‌های غیرکنترلی و کنترلی.



شکل ۱۵. مقایسه مقادیر بیشینه نیروی میراگر در سازه‌های جداسازی شده جرمی در حالت‌های غیرکنترلی و کنترلی.



شکل ۱۶. مقایسه مقادیر بیشینه شتاب زیرسیستم جرمی در سازه‌های جداسازی شده جرمی در حالت‌های غیرکنترلی و کنترلی با مقادیر بیشینه شتاب سازه‌های جداسازی نشده جرمی.

مراجع

1. Skinner, R.I., Robinson, W.H., and McVerry, G.H. (1993). "An Introduction to Seismic Isolation", J. Wiley & Sons, London.
2. Soong, T.T. and Dargush, G.F. (1997). "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", J. Wiley & Sons, London.
3. Ziyaeifar, M. and Noguchi, H. (1998). "Partial Mass Isolation in Tall Buildings", *Earthquake Engineering and Structure Dynamic*, **27**, 49-65.
4. Ziyaeifar, M. (2002). "Mass Isolation, Concept and Techniques", *European Earthquake Engineering*, **2**, 64-76.
5. Ziyaeifar, M. and Tavousi, Sh. (2005). "Mass Participation in Non-Classical Mass Isolated Systems", *Asian J. of Civil Engineering (Building & Housing)*, **6**(4), 273-301.
6. Kurata, N. and Kobori, T. (2003). "Reliability of Applied Semiactive Structural Control System", *Journal of Structural Engineering*, **129**(7), 914-921.
7. Spencer, B.F., Jr. and Nagarajaiah, S. (2003). "State of the Art of Structural Control", *J. of Structural Engineering*, **129**(7), 845-856.
8. Chu, S.Y., Soong, T.T., and Reinhorn, A.M. (2005). "Active, Hybrid and Semi-Active Structural Control", J. Wiley & Sons, London.
9. Kurata, N., Kobori, T., Takahashi, M., and Niwa, N. (1999). "Actual Seismic Response Controlled Building with Semi-Active Damper System", *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, **28**, 1427-1447.
10. Kurino, H., Tagami, J., Shimizi, K., and Kobori, T. (2003). "Switching Oil Damper with Built-in Controller for Structural Control", *J. of Structural Engineering*, **129**(7), 895-904.
11. Nekooei, M. and Ziyaeifar, M. (2008). "Seismic Behaviour of Vertical Mass Isolated Structures", *2008 Seismic Engineering Conf. Commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake*, 1449-1458.
12. Nekooei, M. and Ziyaeifar, M. (2008). "Vertical Seismic Isolation of Structures", *J. of Applied Sciences*, **8**(24), 4656-4661.

سازه‌های جداسازی نشده جرمی می‌باشند. این کاهش در پیوندهای پایین بیشتر بوده است و کاهش نسبی نیروها در بعضی حالات به حدود یک چهارم و حتی کمتر می‌رسد که این مسأله بیانگر قابلیت بالای روشهای جداسازی جرمی در کاهش نیروهای ناشی از زلزله می‌باشد. کاهش نیروها در سازه‌های جداسازی شده جرمی همراه با کاهش شتاب در زیرسیستم جرمی این سازه‌ها و در بعضی حالات توأم با کاهش جابه‌جایی نسبت به سازه‌های جداسازی نشده جرمی می‌باشد که این مسأله نشانگر سطح عملکرد بالاتر این سازه‌ها در برابر زلزله می‌باشد. همچنین این نتایج عملکرد مطلوبتر سازه‌های جداسازی شده جرمی در برابر زلزله را در حالت کنترلی نسبت به حالات دیگر نشان می‌دهند. در حالت کنترلی در عین کمینه کردن جابه‌جاییهای زیرسیستم جرمی، نیروی برش پایه ایجاد شده در سازه در مقایسه با حالت مشابه غیرکنترلی که دارای جابه‌جاییهای کمینه می‌باشد و همچنین در مقایسه با سازه‌های جداسازی نشده جرمی، دارای مقادیر کمتری می‌باشد. البته لازم به ذکر است که در نیروی میراگر و شتاب زیرسیستم جرمی در حالت کنترلی نسبت به حالات دیگر غیرکنترلی افزایش مشاهده می‌شود که این مسأله در سیستم‌های کنترلی مورد انتظار می‌باشد؛ ولیکن همچنان شتاب ایجاد شده در زیرسیستم جرمی در حالت کنترلی از شتاب سازه‌های جداسازی نشده جرمی کمتر می‌باشد. همچنین در حالت کنترلی با توجه به متغیر بودن ثابت میرایی میراگر، حساسیت کمتری به تغییرات این پارامتر سازه‌ای نسبت به حالت غیرکنترلی وجود دارد.

به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که سازه‌های جداسازی شده جرمی از عملکرد لرزه‌ای بهتری در مقایسه با سازه‌های جداسازی نشده جرمی برخوردار بودند که این تفاوت عملکردی را سازه‌های جداسازی نشده جرمی با رفتار غیرخطی خود به صورت مفاصل پلاستیک که اغلب قابل تعمیر بعد از زلزله نمی‌باشند، باید جبران کنند. بنابراین می‌توان روشهای جداسازی جرمی را به عنوان یکی از روشهای نوین طراحی لرزه‌ای نام برد که در عین بالابردن عملکرد لرزه‌ای سیستم سازه‌ای، به لحاظ سهولت اجرا و اقتصادی بودن قابل رقابت با روشهای متداول طراحی لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد و گزینه‌های مختلفی را برای طراحی در اختیار طراح قرار می‌دهد که می‌تواند جایگزین مناسبی برای روشهای متداول طراحی لرزه‌ای سازه‌ها باشد. این گزینه‌ها می‌توانند هم به صورت غیرفعال و هم به صورت نیمه‌فعال که قابلیت اطمینان مناسبی در حین زلزله برخوردار هستند، در جهت رسیدن به سطح عملکرد بالاتر در برابر زلزله مورد استفاده قرار گیرند.

- quake Engineering and Structural Dynamic*, **14**, 133-146.
19. Shimizu, K., Yamada, T., Tajami, J., and Kurino, H. (2004). "Vibration Tests of Actual Buildings with Semi-Active Switching Oil Damper", *Proc. Of the 13th World Conf. of Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 153.
 20. Kurino, H., Matsunaga, Y., Yamada, T., and Tajami, J. (2004). "High Performance Passive Hydraulic Damper with Semi-Active Characteristics", *Proc. of the 13th World Conf. of Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 33.
 21. Carter, A.K., Ahmadian, M., and Baumann, W.T. (1998). "Transient Motion Control of Passive and Semiactive Damping for Vehicle Suspensions", M.Sc. Thesis in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic and State University.
 22. Paz, M. (1985). "Structural Dynamics", Van Nostrand Reinhold Company Inc.
 13. 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*.
 14. Ziyaeifar, M. (2005). "Interaction Study of Train-Bridge-Track Systems Using Maxwell Model", *Vehicle System Dynamics*, **43**(11), 771-794.
 15. Caughey, T.K. and O'Kelly, M.E.J. (1965). "Classical Normal Modes in Damped Linear Dynamic Systems", *J. of Applied Mechanics*, **32**, 583-588.
 16. Foss, K.A. (1958). "Co-ordinates Which Uncouple the Equations of Motion of Damped Linear Dynamic Systems", *J. Applied Mechanics*, **25**, 361-364.
 17. Veletsos, A.S. and Ventura, C.E. (1986). "Modal Analysis of Non-Classical Damped Linear Systems", *Earthquake Engineering Structure Dynamic*, **14**, 217-243.
 18. Singh, M.P. and Ghafory-Ashtiany, M. (1986). "Modal Time History Analysis of Non-Classically Damped Structures for Seismic Motions", *Earth-*