

### چکیده

روش جداسازی جرمی قائم (VMI) به عنوان یکی از روش های جدید برای کنترل لرزه ای سازه ها مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش کل سازه به صورت دو زیرسیستم جرمی و سختی تفکیک می شود و ارتباط بین آنها توسط یک لایه جداساز برقرار می گردد. در این تحقیق از میراگر مگنتورئولوژیک در دو حالت کنترل غیرفعال با ولتاژ صفر و کنترل نیمه فعال با ولتاژ متغیر بین صفر و ۹ ولت و نیز میراگر ویسکوز بر اساس روش کنترلی غیرفعال بر مبنای میرایی بهینه به عنوان لایه جداساز مابین دو زیرسیستم مذکور استفاده شده است. جهت بررسی کارایی روش پیشنهادی، چهار تیپ سازه یک درجه آزاد با زمان تناوب های ۰/۵، ۱/۰، ۲/۰ و ۳/۰ ثانیه با جرم های یکسان برابر ۱۰۰ تن، مورد بررسی قرار گرفتند. هفت زلزله با مشخصات زلزله های حوزه نزدیک با بزرگی بیش از ۶/۵ ریشتر و فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتر تا گسل جهت آنالیز مدل ها انتخاب شدند. نتایج حاکی از آن است که روش کنترل نیمه فعال توانایی کاهش ماکزیمم جابه جایی و ماکزیمم برش پایه سازه را به میزان ۶ و ۳۰ درصد نسبت به حالت جداسازی نشده داراست. همچنین استفاده از روش های میرایی بهینه و کنترل غیرفعال به ترتیب سبب کاهش ۲۱ درصدی و افزایش ۸ درصدی ماکزیمم جابه جایی سازه و کاهش ۵۷ و ۶۳ درصدی ماکزیمم برش پایه سازه به صورت میانگین، نسبت به حالت جداسازی نشده می شوند.

**واژگان کلیدی:** کنترل لرزه ای، جداسازی جرمی قائم، سختی، میراگر مگنتورئولوژیک، کنترل نیمه فعال.

## کاربرد میراگرهای MR در کنترل لرزه ای سازه ها به روش جداسازی جرمی قائم

محمد شاهرخ عبدی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مسعود نکویی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، nekooei@srbiau.ac.ir

محمدعلی جعفری صحنه سرایی

استادیار، گروه سازه های صنعت برق، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

### ۱- مقدمه

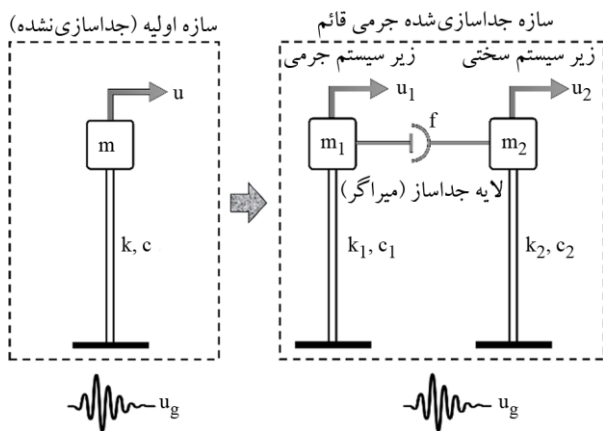
در سازه است. با توجه به پیشرفت های اخیر در فناوری ساخت و نصب این تجهیزات، استفاده از تجهیزات هوشمند قابل کنترل به دلیل کارایی بیشتر در امر کنترل سازه مورد اقبال قرار گرفته است. با استفاده از این نوع از تجهیزات کنترل سازه، ظرفیت مقاومتی لرزه ای سازه افزایش یافته و سازه توان بیشتری جهت تحمل بارهای لرزه ای وارده خواهد داشت [۲].

در رابطه با دستگاه های مکمل میرایی، سه دسته بندی وجود دارد. دسته اول دستگاه های غیرفعال هستند که غیرقابل کنترل بوده و احتیاجی به برق ندارند. دسته دوم، دستگاه های فعال هستند که قابل کنترل بوده اما جهت انجام فعالیت، نیازمند مقدار

هر سیستم مکانیکی یا سازه ای در برخی از فرکانس ها، با بیشترین دامنه ممکن نوسان انجام می دهد که به این وضعیت رزونانس گفته می شود. برای جلوگیری از وقوع این پدیده در سازه، باید تا جایی که امکان دارد سعی کنیم مشخصات رفتاری سازه را از این محدوده دور کنیم. یکی از روش هایی که سبب انجام چنین هدایتی می شود، انتقال پرودییک<sup>۱</sup> نام دارد. انتقال پرودییک در یک سازه، سبب کاهش پاسخ های لرزه ای سازه و جلوگیری از وقوع پدید رزونانس خواهد شد [۱]. جهت نیل به چنین رویکردی، انعطاف پذیری و میرایی سازه باید افزایش یابد. یکی از راهکارهای افزایش میرایی، استفاده از تجهیزات کنترلی

شکل (۲) نحوه استفاده از روش VMI را در کنترل سازه نشان می‌دهد.

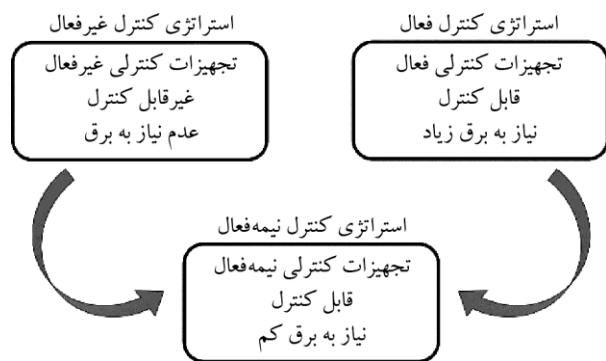
تفاوت اصلی روش VMI با روش همبسته کردن سازه‌ها<sup>۳</sup> در آن است که در این روش خود سازه اصلی به دو سازه مجزا تقسیم می‌شود که دو رفتار کاملاً متفاوت دارند. یکی از آنها رفتاری نرم و دیگری رفتاری سخت دارد؛ اما در روش همبسته کردن سازه‌ها، کنترل دو سازه اصلی توسط همدیگر مطرح است که این دو سازه الزامی به رعایت رفتار نرم یا سخت ندارند.



شکل (۲): ساختار روش جداسازی جرمی قائم.

ضیایی فر و نوگوچی [۵] در سال ۱۹۹۸ در جهت توسعه روش‌های جداسازی سازه‌ها، موضوع جداسازی جرم سازه را در جهت کنترل لرزه‌ای سازه مورد مطالعه قرار دادند. ضیایی فر [۶] در سال ۲۰۰۰ نشان داد که روش جداسازی جرمی توانایی مناسبی جهت کنترل لرزه‌ای سازه‌های بلند دارد. ضیایی فر و طاووسی [۷] در سال ۲۰۰۵ روشی را برای محاسبه ضریب جداسازی جرمی در سیستم‌های جداسازی شده جرمی غیر کلاسیک ارائه دادند. نکویی و ضیایی فر [۸] در سال ۲۰۰۸ یک روش پارامتری را برای محاسبه مقدار بهینه ضریب میرایی لایه جداساز در سازه‌های جداسازی شده جرمی قائم ارائه دادند. کارایی روش جداسازی جرمی قائم در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه جداسازی شده با استفاده از میراگرهای غیرفعال با میرایی بهینه توسط سایر مطالعات نکویی و ضیایی فر [۹-۱۱] نشان داده شد. ضیایی فر و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۲ ثابت میرایی را با

قابل توجهی برق می‌باشند. دسته سوم از این وسایل، دستگاه‌های نیمه‌فعال هستند. این دسته، دارای خصوصیات ترکیبی از دستگاه‌های غیرفعال و فعال می‌باشند، بدین معنی که قابل کنترل بوده ولی نیازمند مقدار برق بسیار کمی جهت انجام فعالیت خود هستند. شکل (۱) الگوریتم کارکرد تجهیزات کنترلی نیمه‌فعال را به صورت شماتیک نشان می‌دهد [۳].



شکل (۱): استراتژی کنترل نیمه‌فعال.

روش جداسازی جرمی قائم<sup>۲</sup> که به اختصار VMI نامیده می‌شود، به‌عنوان یکی از روش‌های کنترل لرزه‌ای سازه‌ها توسط نکویی و ضیایی فر [۴] مطرح گردید. در این روش، سازه اصلی به دو زیرسیستم جرمی و سختی تقسیم می‌شود و ارتباط بین این دو زیرسیستم توسط یک لایه جداساز که همان میراگر است، برقرار می‌شود. فلسفه اصلی این روش استفاده از اصل انتقال پیرودیگ به‌عنوان یک راهکار در جهت کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه است. در این روش قسمت اعظم جرم سازه در زیرسیستم جرمی متمرکز می‌شود. با این حال، این زیرسیستم درصد کمی از سختی سازه اصلی را در برمی‌گیرد. برخلاف زیرسیستم جرمی، زیرسیستم سختی دارای درصد کمی از جرم سازه و درصد اعظم سختی سازه است. استفاده از این روش جداسازی سبب می‌شود زیرسیستم جرمی رفتاری همانند یک سازه نرم به خود گرفته و از منطقه رزونانس دور شود. نکته قابل توجه اما مهم در این موضوع، کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای زیرسیستم جرمی است که توسط ارتباط آن با زیرسیستم سختی که به‌وسیله میراگرهای رابط تأمین می‌شود، حاصل خواهد شد.

صفر و ماکزیمم مورد بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت، سازه‌های مورد بحث در حالت کنترل نشده و کنترل شده با میراگر غیرفعال با میرایی بهینه  $(C_{opt})^A$  جهت بررسی و مقایسه با عملکرد میراگرها MR مورد تحلیل قرار خواهند گرفت.

## ۲- بررسی تئوری مسئله

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، سازه‌های جداسازی شده جرمی قائم دارای دو زیرسیستم جرمی و سختی هستند. اگر جرم، میرایی و سختی سازه اصلی را به ترتیب با  $c$ ،  $m$  و  $k$  نشان دهیم، این پارامترها برای زیرسیستم جرمی به صورت  $c_1$ ،  $m_1$  و  $k_1$  و برای زیرسیستم سختی به صورت  $c_2$ ،  $m_2$  و  $k_2$  بیان می‌شوند. از آنجایی که مدل‌های مورد بررسی به صورت یک درجه آزاد می‌باشند، جابه‌جایی سازه اصلی را با  $u$  و جابه‌جایی زیرسیستم‌های جرمی و سختی را به ترتیب با  $u_1$  و  $u_2$  نشان می‌دهیم. اگر نیروی میراگر رابط بین دو زیرسیستم را با  $f$  نشان دهیم، معادله حرکت سازه جداسازی شده جرمی قائم به صورت ماتریسی توسط رابطه (۱) قابل بیان است:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 \\ -1 \end{bmatrix} f - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} +1 \\ +1 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (1)$$

برای محاسبه جرم و سختی زیرسیستم جرمی و سختی، ضریب جداسازی با نام  $\rho$  به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود. لازم به ذکر است که در واقعیت به جای یک ضریب می‌بایست دو ضریب جداسازی با نام‌های  $\rho_k$  و  $\rho_m$  داشته باشیم که اولی برای جداسازی جرمی و دومی برای جداسازی سختی است. در این تحقیق به جهت سهولت دسترسی به نتایج، فرض شده است که هر دو این ضرایب دارای مقادیر یکسان و برابر  $\rho$  باشند. ارتباط بین جرم و سختی سازه اصلی با زیرسیستم‌ها نیز بر اساس رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$\rho = \frac{m_2}{m_1} = \frac{k_1}{k_2} \quad (2)$$

$$m = m_1 + m_2, c = c_1 + c_2, k = k_1 + k_2 \quad (3)$$

عنوان میرایی مانا<sup>۴</sup> برای سازه‌های جداسازی شده جرمی قائم ارائه دادند. میلانچیان و همکاران [۱۳-۱۴] و میلانچیان و حسینی [۱۵]، به بررسی اثر روش VMI بر روی سازه‌های یک درجه آزاد با پریودهای کمتر از ۰/۵ و بیشتر از ۰/۵ ثانیه دارای میراگرهای ویسکوز و ویسکوالاستیک پرداختند. ایشان محدوده مناسبی از مشخصات میراگرها و محدوده بهینه‌ای از نسبت‌های جداسازی را ارائه دادند. در سال ۲۰۲۰ میلانچیان و همکاران [۱۶] جداسازی قائم ساختمان یک طبقه با میراگرهای مایع لزج غیرخطی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات ایشان دلالت بر این داشت که فن جداسازی قائم، یک روش کارآمد برای کاهش پاسخ لرزه‌ای با هر دو میراگر مایع لزج خطی و غیرخطی با توان سرعت در محدوده ۰/۵ تا ۱/۰ می‌تواند در نظر گرفته شود. در سال ۲۰۲۱، نکویی و همکاران [۱۷] به بررسی سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای قائم با هسته گهواره‌ای پرداختند. در این تحقیق از یک هسته گهواره‌ای که از قاب سازه‌ای جداسازی شده است، استفاده شده و کنترل لرزه‌ای آن توسط میراگر ویسکوز صورت گرفته است و در نهایت رابطه‌ای برای ثابت میرایی بهینه میراگر بر اساس فرکانس‌های اصلی و نسبت میرایی سیستم مورد بحث، ارائه شده است.

در این تحقیق، اثر استفاده از یکی از کاراترین میراگرهای نیمه‌فعال در کنترل لرزه‌ای سازه‌ها، بانام میراگرهای مگنتورئولوژیک<sup>۵</sup> در کنترل سازه‌ها با روش VMI مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، سازه‌های یک درجه آزاد با زمان تناوب‌های ۰/۵، ۱/۰، ۲/۰ و ۳/۰ ثانیه مورد بررسی قرار می‌گیرند. با توجه به آنکه در روش VMI دو زیر سازه در مجاورت هم قرار می‌گیرند، هفت زلزله با مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک با بزرگی بیش از ۶/۵ ریشتر و فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتر تا گسل جهت آنالیز مدل‌ها انتخاب شدند. تمامی سازه‌ها دارای جرم‌های یکسان بوده و با توجه به زمان تناوب‌های اصلی اشاره شده، سختی سازه‌ها محاسبه می‌شود. جهت مقایسه کارایی استفاده از میراگرهای MR، این میراگرها در دو حالت غیرفعال با ولتاژ صفر (Passive-off)<sup>۶</sup> و نیمه‌فعال (Semi-Active)<sup>۷</sup> با ولتاژ متغیر

### ۳- میراگرهای با میرایی بهینه $C_{opt}$

همان‌طور که در قسمت مقدمه بیان شد، یکی از میراگرهای مورد استفاده در این تحقیق میراگر ویسکوز با مقدار میرایی بهینه  $C_{opt}$  است. مطابق رابطه‌ای که توسط نکویی و ضیایی فر [۱۰] در سال ۲۰۰۸ ارائه شد،  $C_{opt}$  را می‌توان از رابطه (۴) محاسبه نمود. در نهایت نیروی قابل تولید توسط میراگر با این میرایی بهینه به وسیله رابطه (۵) قابل حصول است.

$$C_{opt} = 2 \frac{1-\rho}{(1+\rho)^2} \sqrt{\rho mk} \quad (4)$$

$$f = C_{opt} (\dot{u}_1 - \dot{u}_2) \quad (5)$$

لازم به ذکر است مقدار  $C_{opt}$  به دست آمده از رابطه (۴) با فرض ضریب جداسازی جرمی و سختی مشابه و برابر هم به دست آمده است و این بدان معناست که حل دقیق در محاسبه  $C_{opt}$  تنها زمانی امکان‌پذیر است که مقدار این دو ضریب یکسان فرض شود. اگر مقدار این دو ضریب متفاوت در نظر گرفته شود، حل دقیقی برای مقدار  $C_{opt}$  وجود نداشته و برای محاسبه مقدار آن باید از روش‌های عددی استفاده شود. لذا در این تحقیق، مشابه تحقیقات قبلی نکویی و ضیایی فر، از یک ضریب یکسان برای موضوع جداسازی جرمی قائم استفاده می‌شود.

یکی از مزیت‌های  $C_{opt}$  آن است که اگر میراگر مورد استفاده در سیستم VMI دارای میرایی بیشتر از این مقدار بهینه باشد، می‌توان نشان داد که فرکانس ارتعاش دو زیرسیستم به سمت فرکانس ارتعاش سازه اصلی میل خواهد نمود [۸].

### ۴- میراگرهای MR

با توجه به مطالعات اسپنسر و همکاران [۱۸] در سال ۱۹۹۷، نیروی قابل تولید توسط میراگر MR بر اساس مدل اصلاح‌شده بوک-ون (شکل ۳) به صورت روابط (۶) تا (۹) بیان می‌شود. در این روابط  $x$ ،  $y$  و  $z$  به ترتیب معرف جابه‌جایی، شبه‌جابه‌جایی داخلی و جابه‌جایی هیستریک میراگر می‌باشند. سختی انباشتگر و میرایی ویسکوز در سرعت‌های زیاد، با  $k_1$

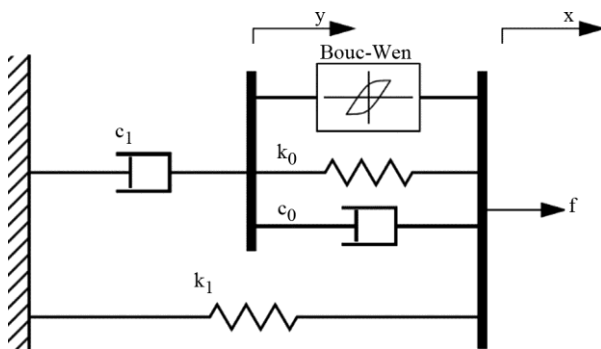
$c_0$  نشان داده شده است. از یک میراگر با میرایی  $c_1$  برای ایجاد ناحیه جمع‌شدگی در نمودار نیرو-سرعت مطابق نتایج آزمایشگاهی برای سرعت‌های کم استفاده شده است. از  $k_0$  نیز برای کنترل سختی در سرعت‌های زیاد استفاده شده است.  $x_0$  نیز بیانگر جابه‌جایی اولیه متناظر فنر  $k_1$  است.  $n$ ،  $A$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  پارامترهایی برای کنترل حلقه هیستریک مدل و  $\alpha$  نیز یک ضریب تکاملی است [۱۸].

$$f = c_1 \dot{y} + k_1 (x - x_0) \quad (6)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} [\alpha z + c_0 \dot{x} + k_0 (x - y)] \quad (7)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| z |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A (\dot{x} - \dot{y}) \quad (8)$$

$$x = u_1 - u_2, \dot{x} = \dot{u}_1 - \dot{u}_2 \quad (9)$$



شکل (۳): مدل اصلاح‌شده بوک-ون برای میراگر MR [۱۸].

برای آنکه مدل مذکور حالت کنترل‌پذیر پیدا کند، پارامترهای  $\alpha$ ،  $c_0$  و  $c_1$  باید همانند رابطه (۱۰) برحسب یک مقدار ورودی  $u$  وابسته به ولتاژ اعمالی به میراگر، بازنویسی شوند. مقدار  $u$  بر اساس پالایه مرتبه اول ولتاژ اعمالی به میراگر به دست می‌آید (رابطه ۱۱). در رابطه (۱۱)،  $\eta$  پارامتری ذاتی میراگر و  $v$  ولتاژ اعمالی به میراگر بوده و می‌تواند یکی از دو مقدار ۰ یا  $V_{max}$  را به خود اختصاص دهد.

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b(u), c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b}(u), c_1 = c_1(u) = c_{1a} + c_{1b}(u) \quad (10)$$

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (11)$$

بر اساس پیشنهاد دایک و همکاران [۱۹] در سال ۱۹۹۶،

متفاوت هستند. زلزله‌های مورد استفاده در این تحقیق، هفت زلزله با مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک است که انتخاب آنها بر مبنای فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتری از گسل و بزرگی بیش از ۶/۵ صورت گرفته است. جدول (۱) زلزله‌های مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

نکویی و ضیایی فر [۴] در سال ۲۰۰۹ بهینه‌ترین مقدار ضریب جداسازی را در محدوده ۰/۱ تا ۰/۲ پیشنهاد داده بودند. همچنین بر اساس نتایج تحقیقات ضیایی فر و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۲، مقدار بهینه ضریب جداسازی برابر ۰/۱۷ به دست آمد. با توجه به این نتایج مقدار ضریب جداسازی در این تحقیق برابر ۰/۱۵ در نظر گرفته شد (۰/۱۵). جدول (۲) مشخصات مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

با توجه به جرم انتخابی برای مدل‌ها، میراگر MR با ظرفیت تولید نیروی ۱۰۰۰ کیلو نیوتن با مشخصات ارائه شده در جدول (۳) مورد استفاده قرار گرفت. ماکزیمم ظرفیت این میراگر در ولتاژ ۱۰ ولت تولید می‌شود.

الگوریتم بهینه حلقه‌ای<sup>۹</sup>، به عنوان یکی از مناسب‌ترین الگوریتم‌ها برای کنترل میراگرهای MR پیشنهاد داده شد. مطابق این الگوریتم، ولتاژ اعمالی به میراگر را می‌توان بر اساس رابطه شماره (۱۲)، به دست آورد. در این رابطه،  $V_{max}$  ماکزیمم ولتاژ اعمالی به میراگر،  $H(\cdot)$  تابع پله،  $f_i$  نیروی اندازه شده میراگر و  $f_c$  نیروی مطلوب میراگر جهت اعمال به سازه است که مطابق رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$v_i = V_{max} H\{(f_{ci} - f_i)f_i\} \quad (12)$$

$$f_c = L^{-1} \left\{ -K_c(s) L \begin{Bmatrix} y \\ f \end{Bmatrix} \right\} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)،  $K_c$  بیانگر یک کنترل گر بهینه خطی،  $\{ \cdot \}$  تبدیل لاپلاس و  $y$  پاسخ‌های اندازه‌گیری شده سیستم است.

## ۵- نتایج عددی

در این تحقیق چهار تپ سازه یک درجه آزاد با زمان تناوب‌های ۰/۵، ۱/۰، ۲/۰ و ۳/۰ ثانیه و میرایی ۵ درصد، مورد بررسی قرار می‌گیرند. تمامی سازه‌ها دارای جرم یکسان با سختی

جدول (۱): زلزله‌های حوزه نزدیک انتخاب شده در این تحقیق [۲۰].

شماره زلزله	RSN	PGA (g)	نام زلزله	سال	نام ایستگاه	بزرگی	نوع مکانیسم
۱	۱۴۳	۰/۸۵۴	طیس، ایران	۱۹۷۸	Tabas	۷/۳۵	Reverse
۲	۷۵۳	۰/۶۴۵	لوماپریتا	۱۹۸۹	Corralitos	۶/۹۳	Reverse Oblique
۳	۸۲۸	۰/۵۹۱	کاپ‌مندوسینو	۱۹۹۲	Petrolia	۷/۰۱	Reverse
۴	۱۰۸۶	۰/۶۰۵	نورث‌ریج-۰۱	۱۹۹۴	Sylmar - Olive View Med FF	۶/۶۹	Reverse
۵	۱۱۱۱	۰/۴۸۳	کوبه، ژاپن	۱۹۹۵	Nishi - Akashi	۶/۹۰	Strike Slip
۶	۴۴۵۶	۰/۴۶۳	مونت‌نگرو، یوگسلاوی	۱۹۷۹	Petrovac - Hotel Olivia	۷/۱۰	Reverse
۷	۸۱۶۴	۰/۲۸۲	دوزجه، ترکیه	۱۹۹۹	IRIGM 487	۷/۱۴	Strike Slip

جدول (۲): مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق.

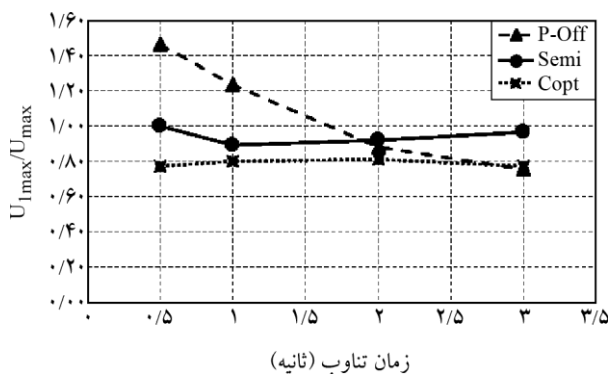
نام مدل	سازه اصلی			زیروسیستم جرمی		زیروسیستم سختی		Copt (کیلونیوتن در ثانیه بر متر)
	زمان تناوب (ثانیه)	جرم (تن)	سختی (کیلونیوتن بر متر)	جرم (تن)	سختی (کیلونیوتن بر متر)	جرم (تن)	سختی (کیلونیوتن بر متر)	
ST-۰/۵	۰/۵	۱۰۰	۱۵۷۹۱	۸۶/۹۶	۲۰۵۹/۷۰	۱۳/۰۴	۱۳۷۳۱/۳۰	۶۲۵/۶۲
ST-۱/۰	۱/۰	۱۰۰	۳۹۴۷	۸۶/۹۶	۵۱۴/۸۳	۱۳/۰۴	۳۴۳۲/۱۷	۳۱۲/۸۱
ST-۲/۰	۲/۰	۱۰۰	۹۸۶	۸۶/۹۶	۱۲۸/۶۱	۱۳/۰۴	۸۵۷/۳۹	۱۵۶/۴۰
ST-۳/۰	۳/۰	۱۰۰	۴۳۸	۸۶/۹۶	۵۷/۱۳	۱۳/۰۴	۳۸۰/۸۷	۱۰۴/۲۷

جدول (۳): پارامترهای مدل بوک-ون اصلاح شده برای میراگر MR با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلو نیوتن [۲۱].

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$C_{0a}$	۵۰/۳۰ (کیلونیوتن در ثانیه بر متر)	$\alpha_a$	۸/۷۰ (کیلونیوتن بر متر)
$C_{0b}$	۴۸/۷۰ (کیلونیوتن در ثانیه بر متر بر ولت)	$\alpha_b$	۶/۴۰ (کیلونیوتن بر متر بر ولت)
$k_0$	۰/۰۰۵۴ (کیلونیوتن بر متر)	$\gamma$	۴۹۶/۰ (میکروثانیه)
$C_{1a}$	۸۱۰۶/۲ (کیلونیوتن در ثانیه بر متر)	$\beta$	۴۹۶/۰ (میکروثانیه)
$C_{1b}$	۷۸۰۷/۹ (کیلونیوتن در ثانیه بر متر بر ولت)	A	۸۱۰/۵۰
$k_1$	۰/۰۰۸۷ (کیلونیوتن بر متر)	n	۲
$x_0$	۰/۱۸ (متر)	$\eta$	۱۹۵ (میلی ثانیه)

جدول (۴): میانگین نسبت پاسخ‌های سازه‌های جداسازی شده به سازه‌های جداسازی نشده تحت اثر زلزله‌های منتخب.

نسبت پاسخ‌ها	زمان تناوب سازه (ثانیه)	Copt	Passive Off	Semi Active
ماکزیمم جابه‌جایی	۰/۵	۰/۷۷	۱/۴۶	۱/۰۰
ماکزیمم شتاب		۰/۳۴	۰/۲۴	۰/۳۲
ماکزیمم برش پایه		۰/۳۲	۰/۲۱	۰/۳۸
ماکزیمم جابه‌جایی	۱/۰	۰/۸۰	۱/۲۳	۰/۸۹
ماکزیمم شتاب		۰/۴۴	۰/۲۶	۰/۴۵
ماکزیمم برش پایه		۰/۴۳	۰/۲۹	۰/۶۴
ماکزیمم جابه‌جایی	۲/۰	۰/۸۱	۰/۸۸	۰/۹۲
ماکزیمم شتاب		۰/۴۶	۰/۳۵	۰/۵۶
ماکزیمم برش پایه		۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۸۵
ماکزیمم جابه‌جایی	۳/۰	۰/۷۷	۰/۷۶	۰/۹۶
ماکزیمم شتاب		۰/۴۷	۰/۴۳	۰/۶۲
ماکزیمم برش پایه		۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۹۴



شکل (۴): میانگین نسبت ماکزیمم جابه‌جایی زیرسیستم جرمی به ماکزیمم جابه‌جایی سازه جداسازی نشده تحت اثر زلزله‌های منتخب.

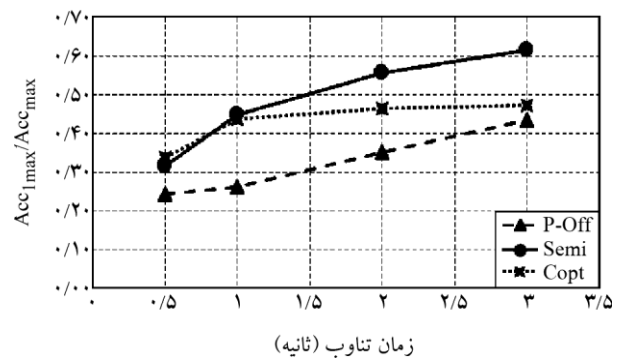
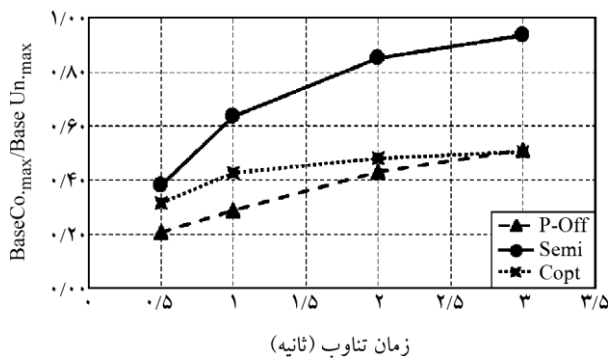
نتایج مربوط به میانگین نسبت ماکزیمم شتاب زیر سازه جرمی به ماکزیمم شتاب سازه جداسازی نشده تحت اثر زلزله‌های منتخب، در جدول (۴) و شکل (۴) ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، استفاده از میراگرهای MR در حالت کنترلی نیمه‌فعال سبب کاهش ۶۸، ۵۴، ۴ و ۳۸ درصدی ماکزیمم شتاب سازه نسبت به حالت کنترل نشده به ترتیب در سازه‌های با زمان تناوب ۰/۵، ۱/۰، ۲/۰ و ۳/۰ ثانیه می‌شود. با توجه به جدول (۵)، برخلاف نتایج مربوط به ماکزیمم جابه‌جایی، در مقایسه روش Semi با روش‌های Copt

در این تحقیق سه حالت استفاده از میراگرها برای کنترل سازه‌های VMI مورد استفاده قرار گرفته است. حالت اول که با Copt نشان داده می‌شود بیانگر استفاده از میراگر ویسکوز با میرایی بهینه است که مقدار این میرایی برای مدل‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. حالت دوم استفاده از میراگر MR در وضعیت Passive-off است. در این حالت میراگر رفتاری غیرفعال در ولتاژ صفر ولت داشته و عملاً غیرقابل کنترل است. حالت سوم نیز استفاده از میراگر MR در حالت نیمه‌فعال با ولتاژ متغیر صفر و ۹ ولت است (Semi-Active).

نتایج مربوط به میانگین نسبت ماکزیمم جابه‌جایی زیر سازه جرمی به ماکزیمم جابه‌جایی سازه جداسازی نشده تحت اثر زلزله‌های منتخب، در جدول (۴) و شکل (۴) ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، استفاده از میراگرهای MR در حالت کنترلی نیمه‌فعال سبب کاهش صفر، ۱۱، ۸ و ۶ درصدی ماکزیمم جابه‌جایی سازه نسبت به حالت جداسازی نشده به ترتیب در سازه‌های با زمان تناوب ۰/۵، ۱/۰، ۲/۰ و ۳/۰ ثانیه می‌شود. با این حال همان‌طور که در جدول (۵) نیز ارائه شده است، در مقایسه روش Semi با روش‌های Copt و Passive-off در سازه‌های مورد بحث، به صورت میانگین روش Semi نسبت به روش Copt عملکرد پایین تری در حد ۲۰ درصد برای کنترل این پاسخ داشته اما در مقایسه با روش Passive-off بیش از ۷ درصد عملکرد بالاتری داشته است.

جدول (۵): مقایسه عملکرد روش نیمه‌فعال با روش‌های غیرفعال در کنترل پاسخ‌های سازه.

زمان تناوب سازه (ثانیه)	نوع پاسخ	Semi Copt	Semi P.off	نوع پاسخ	Semi Copt	Semi P.off
۰/۵	نسبت ماکزیمم جابه‌جایی	-۳۰/۱۸	-۳۰/۱۰	نسبت ماکزیمم جابه‌جایی	۵/۹۷	-۸۳/۲۹
۱/۰		-۱۰/۸۷	-۷۲/۵۵		-۲/۶۱	-۱۱۹/۹۳
۲/۰		-۱۳/۱۳	-۵۸/۲۵		-۲۰/۰۵	-۹۸/۳۱
۳/۰	متوسط عملکرد	-۲۵/۱۳	-۴۲/۰۵	متوسط عملکرد	-۳۰/۳۲	-۸۳/۲۸
		-۱۹/۸۳	-۵۰/۷۴		-۱۱/۷۵	-۹۶/۲۰



شکل (۶): میانگین نسبت ماکزیمم برش پایه سازه کنترل شده به ماکزیمم برش پایه سازه جداسازی نشده تحت اثر زلزله‌های منتخب.

شکل (۵): میانگین نسبت ماکزیمم شتاب زیرسیستم جرمی به ماکزیمم شتاب سازه جداسازی نشده تحت اثر زلزله‌های منتخب.

جدول‌های (۴) و (۵) نتایج فوق را به صورت عددی برای تمامی روش‌های کنترلی مورد استفاده در این تحقیق بیان می‌کند. توجه شود که عدد منفی در جدول (۵) به معنای عملکرد پایین‌تر نسبت به روش‌های مقایسه شده است.

و Passive-off در سازه‌های مورد بحث، به صورت میانگین عملکرد پایین‌تری در حدود ۱۲ و ۵۱ درصد نسبت به دو روش غیرفعال به دست آمد.

جهت بررسی نیروی تولید شده توسط میراگرها و کنترل ماکزیمم ظرفیت نیرویی میراگر مورد استفاده در این تحقیق، مقایسه بین نیروی میراگر در سه حالت کنترلی در جدول (۶) ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج این جدول نیز مشخص است، تمامی نیروها از ظرفیت اسمی میراگر استفاده شده در این تحقیق که ۱۰۰۰ کیلو نیوتن است، کمتر بوده و از این بابت مشکل خاصی وجود ندارد. با این حال بر اساس این نتایج می‌توان تشخیص داد که در این سازه‌ها، می‌توان از میراگرهای با ظرفیت نیرویی به مراتب پایین‌تری استفاده نمود.

نتایج مربوط به میانگین نسبت ماکزیمم برش پایه سازه جداسازی شده به ماکزیمم برش پایه سازه جداسازی نشده تحت اثر زلزله‌های منتخب، در جدول (۴) و شکل (۶) ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، استفاده از میراگرهای MR در حالت کنترلی نیمه‌فعال سبب کاهش ۶۱، ۳۶، ۱۴ و ۶ درصدی ماکزیمم برش پایه سازه نسبت به حالت جداسازی نشده به ترتیب در سازه‌های با زمان تناوب ۰/۵، ۱/۰، ۲/۰ و ۳/۰ ثانیه می‌شود. همان‌طور که در جدول (۵) نیز ارائه شده است، در مقایسه روش Semi با روش‌های Copt و Passive-off در سازه‌های مورد بحث، به صورت میانگین عملکرد پایین‌تری در حدود ۵۸ و ۹۶ درصد نسبت به دو روش غیرفعال به دست آمد که این نتایج مشابهت زیادی با مقایسه عملکردی سه روش کنترلی در مقایسه نتایج مربوط به ماکزیمم شتاب سازه‌ها دارد.

جهت کنترل درستی کارکرد میراگر MR در حالت نیمه‌فعال، نمودار ولتاژ اعمالی به میراگر در طی زمان بارگذاری در شکل (۷) برای سازه با زمان تناوب ۱/۰ ثانیه تحت اثر زلزله شماره ۱ ارائه شده است.

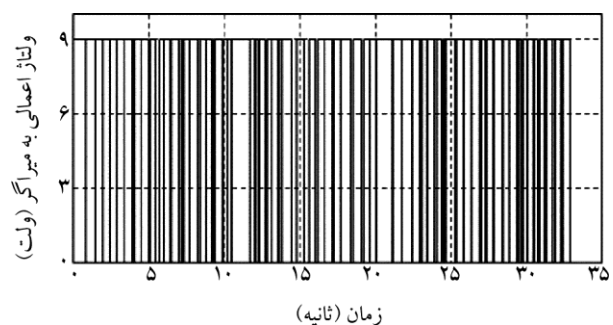
Semi در کاهش پاسخ‌های سازه جداسازی شده نسبت به سازه جداسازی شده است. به‌طور میانگین روش Semi توانایی کاهش پاسخ ماکزیمم جابه‌جایی زیر سازه جرمی را به میزان ۶ درصد در سازه‌های جداسازی شده نسبت به سازه‌های جداسازی نشده داشته است. روش‌های Copt و Passive-off به‌ترتیب سبب کاهش ۲۱ درصدی و افزایش ۸ درصدی این پاسخ شده‌اند. در بررسی پاسخ ماکزیمم شتاب زیر سازه جرمی در حالت جداسازی شده نسبت به حالت جداسازی نشده، روش Semi توانایی کاهش ۵۲ درصدی پاسخ را به‌طور میانگین داشته است. با این حال عملکرد این روش در روش Copt و Passive-off به‌ترتیب به میزان ۱۳ و ۵۰ درصد، عملکرد پایین‌تری در کنترل این پاسخ داشته است. در بررسی پاسخ برش پایه سازه جداسازی شده نسبت به سازه جداسازی نشده نیز مشخص شد که روش Semi توانایی کاهش ۳۰ درصدی این پاسخ را به‌طور میانگین داشته است. با این حال، عملکرد این روش در مقایسه با روش‌های غیرفعال در کنترل این پاسخ، پایین‌تر بوده است. در نهایت با عنایت به نتایج حاصله، مشخص شد که استفاده از روش جداسازی جرمی قائم سازه‌ها با استفاده از میراگرهای MR در حالت کنترل نیمه‌فعال و غیرفعال، عملکرد بسیار مناسبی در کاهش پاسخ سازه جداسازی شده در مقایسه با سازه جداسازی نشده دارد.

### مراجع

1. Skinner, R.I., Robinson, W.H., and McVerry, G.H. (1993) *An Introduction to Seismic Isolation*. John Wiley & Sons Ltd. Baffins Lane. Chichester, West Sussex PO19 1UD, England.
2. Cheng, F.Y., Jiang, H., and Lou, K. (2008) *Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control*. CRC Press/Taylor & Francis Group.
3. Christenson, R.E. (2001) *Semiactive Control of Civil Structures for Natural Hazard Mitigation: Analytical and Experimental Studies* (Ph.D. Thesis). Department of Civil Engineering and Geological

جدول (۶): میانگین ماکزیمم نیروی تولیدشده توسط میراگر تحت اثر زلزله‌های منتخب.

ماکزیمم نیروی میراگر (کیلو نیوتن)			زمان تناوب سازه (ثانیه)
Semi Active	Passive Off	Copt	
۳۶۲/۳	۷۱/۱	۲۹۹/۹	۰/۵
۳۰۸/۲	۷۷/۹	۱۸۶/۴	۱/۰
۲۶۲/۵	۱۲۹/۱	۱۵۳/۱	۲/۰
۲۲۸/۲	۱۵۹/۸	۱۷۷/۹	۳/۰



شکل (۷): تغییرات ولتاژ اعمالی به میراگر در روش کنترل نیمه‌فعال در سازه با زمان تناوب ۱/۰ ثانیه تحت اثر زلزله شماره ۱.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، تغییرات به‌صورت مناسبی بین ولتاژ صفر و ولتاژ ماکزیمم صورت گرفته و میراگر فقط با یک ولتاژ مشخص فعالیت نداشته است.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق استفاده از روش جداسازی جرمی قائم به‌عنوان یکی از روش‌های کنترل لرزه‌ای سازه‌ها مورد تحقیق قرار گرفت. سازه‌های مورد بررسی در این تحقیق همگی سازه‌های یک‌درجه آزاد با طیف گسترده‌ای از زمان‌های تناوب می‌باشند. دو استراتژی کنترلی غیرفعال و نیمه‌فعال برای میراگرهای استفاده شده در سازه‌های مورد بحث، مورد بهره‌برداری قرار گرفت. استراتژی غیرفعال با نام‌های Copt و Passive-off و استراتژی نیمه‌فعال با نام Semi-Active در این تحقیق ذکر شده است. در روش Copt از یک میراگر ویسکوز با میرایی بهینه استفاده شده است. از میراگر MR با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلو نیوتن نیز برای روش‌های Passive-off و Semi-Active استفاده شده است. نتایج تحقیق حاکی از عملکرد مناسب روش



14. Milanchian, R., Hosseini, M., and Nekooei, M. (2018) Vertical seismic isolation by viscous and visco-elastic dampers based on different states performance for response reduction. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, **5**(5), 91-104.
15. Milanchian, R. and Hosseini, M. (2019) Study of vertical seismic isolation technique with nonlinear viscous dampers for lateral response reduction. *Journal of Building Engineering*, **23**, 144-154.
16. Milanchian, R., Hosseini, M., and Nekooei, M. (2020) Vertical isolation of 1-story structures with the nonlinear viscous dampers for seismic response reduction. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, **50.1**(98), 65-76.
17. Nekooei, M., Rahgozar, N., and Rahgozar, N. (2021) Vertical seismic isolated rocking-core system. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, **0**(0), 1-10.
18. Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K., and Carlson, J.D. (1997) Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of Engineering Mechanics*, **123**, 230-238.
19. Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Sain, M.K., Carlson, J.D. (1996) Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction. *Smart Materials and Structures*, **5**(5), 565-575.
20. PEER (2013) *PEER NGA-West2 Database*. Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley, California.
21. Uz, M.E. and Hadi, M.N.S. (2014) Optimal design of semi active control for adjacent buildings connected by MR damper based on integrated fuzzy logic and multi-objective genetic algorithm. *Engineering Structures*, **69**, 135-148.
- Sciences, University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana.
4. Nekooei, M. and Ziyaeifar, M. (2009) Spectral investigation on behaviour of mass isolated structures and their semi-active control against earthquakes. *JSEE*, **10**, 243-252.
5. Ziyaeifar, M. and Noguchi, H. (1998) Partial mass isolation in tall buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **27**, 49-65.
6. Ziyaeifar, M. (2000) Method of mass isolation in seismic design of structures. *The 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zeland.
7. Ziyaeifar, M. and Tavousi, S. (2005) Mass participation in non-classical mass isolated systems. *Asian Journal Of Civil Engineering (Building And Housing)*, **6**, 273-301.
8. Nekooei, M. and Ziyaeifar, M. (2008) Vertical seismic isolation of structures. *Journal of Applied Sciences*, **8**, 4656-4661.
9. Nekooei, M. and Ziyaeifar, M. (2008) Seismic behaviour of vertical mass isolated structures. *2008 Seismic Engineering Conference: Commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake*, AIP Publishing, Reggio Calabria, Italy.
10. Nekooei, M. and Ziyaeifar, M. (2008) Spectral investigation on the seismic behaviour of vertical mass isolated structures against earthquake. *The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
11. Nekooei, M. and Ziyaeifar, M. (2012) Vertical seismic isolated structures with semi-active control system. *The 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal.
12. 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**, 627-645.
13. Milanchian, R., Hosseini, M., and Nekooei, M. (2017) Vertical isolation of a structure based on different states of seismic performance. *Earthquakes and Structures*, **13**(2), 103-118.

### واژه‌نامه

- 1- انتقال پریودیک  
Periodic Shift
- 2- جداسازی جرمی قائم  
Vertical Mass Isolation (VMI)
- 3- همبسته کردن سازه‌ها  
Coupled Structures
- 4- میرایی مانا  
Stall Damping

MR Dampers	۵- میراگرهای مگنتورئولوژیک
Passive Control	۶- کنترل غیرفعال
Semi Active Control	۷- کنترل نیمه‌فعال
Optimal Damping (Copt)	۸- میرایی بهینه
Clipped-Optimal Algorithm	۹- الگوریتم بهینه حلقه‌ای

## Application of MR Dampers in Seismic Control of Structures Using Vertical Mass Isolation Method

Mohamad Shahrokh Abdi<sup>1</sup>, Masoud Nekooei<sup>2\*</sup>, and Mohammad Ali Jafari<sup>3</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, \*Corresponding Author, email: nekooei@srbiau.ac.ir
3. Assistant Professor, Structural Department of Transmission and Distribution Research Center, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran

Vertical Mass Isolation (VMI) method is used for the seismic control of structures. In this method, the entire structure is a combination of two mass and stiffness subsystems with an isolator layer located in-between. This method mainly uses the principle of periodic shift as a solution to reduce the seismic responses of the structure. In this method, the majority part of the structure mass is concentrated in the mass subsystem. However, this subsystem constitutes a small percentage of the stiffness of the main structure. Unlike the mass subsystem, the stiffness subsystem constitutes a small percentage of structural mass and a large percentage is structural stiffness. This isolation method makes the mass subsystem behave like a soft structure and move away from the resonance zone. The important point is the seismic control of the mass subsystem, which will be supplied by its connection with the stiffness subsystem provided by the interface dampers. The main difference between the VMI method and coupled structures methods is that the main structure is divided into two isolated structures with two completely different behaviors in this method. One of them has a soft behavior and the other has a hard behavior. However in the coupled structure methods, the control of the two main structures is done by each other and observing soft or stiffness behavior in these two structures is not required. A magnetorheological (MR) damper is used as the isolator layer to control the structure. The model used for these dampers is based on the modified Bouc-Wen model proposed by Spencer et al. in 1997. The clipped-optimal procedure that is one of the most beneficial algorithms is applied to control the MR damper. Passive-off and semi-active control techniques are applied to control the MR damper based on the applied controlling voltage. The maximum voltage that is applied to the MR damper, is equal to 9 V. A third control technique named Copt, which is based on the optimal damping, is used to compare with MR damper results. To evaluate the performance of the proposed control system, a wide range of structures with low to high floors are considered. To do this, structures with heights equal to 27, 54, 108 and 162 meters were selected. Using approximate fundamental period based on ASCE-7, the periods of structures are 0.5, 1.0, 2.0 and 3.0 seconds, respectively. Since all models are SDOF and linear elastic analysis is applied, the structural mass is considered equal for all models ( $M=100$  ton), but the stiffness of models is calculated based on their mass and periods. The damping ratio for non-isolated structure is considered to be 0.05. The results indicate the proper performance of the semi-active method in reducing the responses of the isolated structures compared to the non-isolated structures. This method decreases, on average, the top floor displacement of mass-subsystem by 6%. However, the Copt method decreases it by 21% and the passive-off method increases it by 8%. The semi-active method decreases, on average, the top floor acceleration of mass-subsystem by 13% and 50%, less than the Copt and the passive-off methods, respectively. The findings demonstrated that the semi-active control method based on a maximum voltage of 9 V will reduce, on average, the maximum base shear of isolated structures by 30% compared with non-isolated structures. The parametric approach based on the Nekooei relation (Copt) that is applied as a passive control device had acceptable results for controlling the acceleration and base shear of the structure. This method led to the absolute acceleration of top floor and the base shear of structures to decrease by 53~68% compared to the uncontrolled structure. However, the efficiency of Copt method to reduce the top floor displacement is less than the maximum base shear of the structure.

**Keywords:** Seismic Control, Vertical Mass Isolation, Stiffness, Magnetorheological Damper, Semi Active Control.