

عملکرد یک سیستم جداساز پایه ترکیبی غیرخطی تحت حرکات زمین

یاسر مهرخواه

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، مؤسسه آموزش عالی سراج تبریز، ایران

چکیده

در فرآیند طراحی سازه کاهش انرژی وارده به سازه همواره مورد توجه و بررسی طراحان بوده است، از این رو سیستم‌های اتلاف انرژی و جداگرهای پایه روز به روز در فرایند طراحی مورد استقبال و بهره‌گیری قرار گرفته‌اند. در این تحقیق به بررسی اثر جداساز پایه بر روی یک سازه ۶ طبقه تحت رکوردهای زلزله ثبت شده کوبه ۱۹۹۵ و نورتریج ۱۹۹۴ و همچنین میراگر جرمی تنظیم‌شونده اینترتدار پرداخته شده است. در میراگر جرمی تنظیم‌شونده اینترتدار با استفاده از تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی یک سازه ۶ طبقه با تاثیر TMDI در طبقه سوم همراه با جداساز پایه و بررسی پارامترهای زلزله اثر میراگر جرمی تنظیم‌شونده اینترتدار بررسی شده است و مشاهده شده که این میراگر باعث افزایش مقاومت سازه در برابر زمین‌لرزه می‌شود. در سیستم جداساز پایه که با استفاده از مقدار RMS و تابع PSDF نمودارها و پارامترها بررسی شده‌اند و میزان اثرگذاری سیستم جداساز بر روی سازه مشخص شده و در نهایت در مورد نتایج عددی بحث و گفت‌گو شده است. لازم به ذکر است که پارامترهای زلزله که در سیستم ترکیبی بدست آمده‌اند به وسیله الگوریتم ژنتیک بهینه یابی شده‌اند.

کلید واژه‌ها: رفتار لرزه ای، سازه مجهز به TMDI، تاریخچه زمین لرزه واقعی.

مقدمه

قرارگیری ایران بر روی کمربند زلزله آلپ - هیمالیا به عنوان یک نقطه ضعف بزرگ برای کشور ما می باشد. متأسفانه با وجود اثبات کارایی ابزار کنترل سازه در بهبود پاسخ لرزه ای سازه ها، استفاده از این ابزارها در کشور ما چندان مورد توجه قرار نگرفته است. روشهای معمول استهلاک انرژی در سازه ها برای استفاده از تغییر شکل های غیر خطی مصالح به کار گرفته در ساخت آن استوار می باشد؛ ولی در حال حاضر مستهلک کردن انرژی وارد به سازه در اثر زلزله، به سمت استفاده از وسایل کنترل سازه ای غیر فعال، فعال، نیمه فعال و مرکب سوق یافته است. کنترل سازه یکی از فناوری های نسبتاً جدید در زمینه طراحی مقاوم سازه ها در برابر زلزله می باشد. در این روش بهبود پاسخ دینامیکی سازه با استفاده از تغییر در جرم، سختی، میرایی و یا با تامین نیروهای فعال و یا غیر فعال در سازه صورت می گیرد. کارایی ابزار کنترل سازه برای بهبود پاسخ سازه ها در مقابل باد و زلزله تایید شده است. [1].

جداگر هسته سربی^۱ یا همان جداساز لرزه ای LRB، در حال حاضر رایج ترین جداساز لرزه ای در دنیا است. جداساز هسته سربی LRB در سال ۱۹۷۴ توسط دانشمند نیوزیلندی، دکتر بیل رایینسون (بنیانگذار شرکت رایینسون ساینز میک) اختراع شد و برای اولین بار در سال ۱۹۸۱ در ساختمان ویلیام کلیتون در شهر ولینگتون نیوزیلند، مورد استفاده قرار گرفت. این نوع جداساز لرزه ای در کشورهای لرزه خیزی چون نیوزیلند، ژاپن، ایالات متحده، کره جنوبی و ترکیه، چند دهه ای است به عنوان کارآمدترین تکنولوژی کنترل ارتعاشات لرزه ای شناخته می شود و تاکنون در بیش از ۱۰۰۰۰ سازه در دنیا به کار رفته است. سازه های جداسازی لرزه ای شده با جداساز لرزه ای LRB در زلزله های مخربی چون لوماپریتا (۱۹۸۹)، نورتریج (۱۹۹۴)، کوبه (۱۹۹۵)، دارفیلد (۲۰۱۰) و کرایست چرچ (۲۰۱۱)، توهوکو (۲۰۱۱) و ... عملکرد بسیار مطلوبی داشته و بدون خسارت باقی مانده اند. بیمارستان دانشگاه کالیفرنیا جنوبی و بیمارستان زنان کریستچرچ واقع در نیوزیلند، از جمله ای این سازه ها است. این تکیه گاه متشکل از لایه های لاستیک طبیعی و فولاد است که به طور یکی در میان قرار گرفته اند. یک یا چند میله سربی نیز در میان آن وجود دارد. علاوه بر این پیرامون این جداگر لرزه ای لایه ای محافظ جهت تضمین پایداری محیطی و افزایش مقاومت در برابر حرارت، تعبیه شده است. [۲].

ایده میراگر جرمی تنظیم شونده اولین بار توسط فرام در سال ۱۹۰۹ مطرح گردید. پس از آن در سال ۱۹۲۸ اورماندروید و دن- هارتوگ برای اولین بار نظریه ی لرزش گیرهای بدون میرایی و با میرایی را برای سازه بدون میرایی مطالعه و اصول مقدماتی انتخاب مناسب پارامترهای این لرزش گیرها را ارائه کردند. آنها در مطالعات خود به این نتیجه دست یافتند که افزودن میرایی در میراگر جرمی تنظیم شونده، سبب افزایش بازدهی آن می شود. در سال ۱۹۵۶ دن هارتوگ در کتاب خود با عنوان ارتعاشات مکانیکی، تئوری مدون ضربه گیرها را درحالتی که سازه اصلی بدون میرایی باشد عرضه نمود. [۳].

پراگ و جانکید مروری بر روی مسئله طراحی بهینه پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم شونده ارائه کرده اند و وارپورتون و ایورینده به طور موفقیت آمیزی دقت فرض سازه ای چند درجه آزادی به عنوان یک سیستم یک درجه آزادی را با حل سازه ای اصلی الاستیک بی شماری که با میراگر جرمی تنظیم شونده مجهز شده اند نشان دادند. وارپورتون عبارات ساده ای برای پارامترهای جذب کننده برای سیستم اصلی دارای میرایی یا بدون میرایی یک درجه آزادی تحت تحریکات تصادفی و هارمونیک ارائه کرده است و همچنین فرمول طراحی بهینه برای سیستم میراگر جرمی تنظیم شونده تحت انواع مختلفی از بار مانند بار هارمونیک، بار باد، بار زلزله را پیشنهاد کردند. بسیاری از محققان مانند ویالورده و کویوما، رانا و سانق، لین و همکاران و ونگ و همکاران کاربرد میراگر جرمی تنظیم شونده را برای سازه هایی که در کمربندی زلزله قرار دارند بررسی کرده است. کراندل و مارک تئوری ارتعاشات تصادفی را به کار گرفتند تا سازه ای یک درجه آزادی با یک میراگر، در معرض تحریکات پایه را آنالیز کنند. نتایج نشان میدهد که میراگرهای جرمی تنظیم شونده می توانند به طور مؤثری ارتعاشات پایه را کاهش دهند. [4]

¹ Lead Rubber Bearing

صلاح دجرونی، مهدی عبدالدائم و همکاران در سال ۲۰۲۱ ضمن بررسی میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده اینترتردار (DMTDI) با میراگر جرمی تنظیم‌شونده اینترتردار (TMDI) مشاهده کردند که تحت ۱۰۰ زمین‌لرزه حوزه دور و نزدیک با استفاده از الگوریتم ژنتیک عملکرد سازه با میراگرهای (DMTDI) در بهینه کردن مقادیر بیشینه با عملکرد میراگرهای (TMDI) مقایسه شده و نتیجه شده که عملکرد میراگرهای دابل مطلوب تر و بهتر از عملکرد میراگر اینترتردار می‌باشد. [5]

اولین ساختمانی که توسط LRB ساخته شد، ساختمان ویلیام کلایتون در ولینگتون در نیوزیلند بود که در سال ۱۹۸۱ به پایان رسید و در چندین کشور دیگر نیز به اجرا درآمد. ساختمان‌هایی که با LRB جداسازی شدند بسیار خوب در طول زلزله‌های نورث‌ریچ ۱۹۹۴ و سال ۱۹۹۵ کوبه را عمل کردند که مناسب بودن LRB به عنوان یک جدا کننده موثر را تایید می‌کند. در گذشته، چندین مطالعه برای درک رفتار سازه‌های جدا شده توسط LRB وجود داشت [5-9]

استانیکزی و همکاران در سال ۲۰۱۸ کنترل لرزه‌ای پاسخ در ساختمان‌های دارای جداساز لرزه‌ای زیر اثر تحریک زلزله‌های مختلف را بررسی کردند. در این مطالعه با استفاده از میراگرهای جرمی چندگانه در یک طبقه و نیز توزیع این میراگرها در ارتفاع، بیش‌ترین کاهش در مقایسه با روش‌های کنترلی دیگر حاصل گردید. [10]

۲. معادلات حاکم بر میراگر جرمی تنظیم‌شونده اینترتردار در سیست‌های یک درجه آزادی

شکل ۱، سیستم ساده شده‌ی میراگر جرمی تنظیم‌شونده اینترتردار را نشان می‌دهد. پارامترهای m_s ، k_s و c_s به ترتیب جرم، سختی و میرایی روسازه اصلی بوده و پارامترهای m_b ، k_b و c_b با زیرنویس t بیان‌گر همین خصوصیات در میراگر اینترتردار هستند. همچنین u_s ، u_d و u_g به ترتیب تغییرمکان سازه اصلی نسبت به تکیه‌گاه، تغییرمکان میراگر نسبت به سازه و تغییرمکان تکیه‌گاه می‌باشند. معادلات دیفرانسیل حاکم بر ارتعاش دینامیکی سیستم به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$m_s \left(\ddot{x}_s + \ddot{x}_g \right) + c_s \left(\dot{x}_s - \dot{x}_b \right) + k_s (x_s - x_b) - c_t \left(\dot{x}_t - \dot{x}_s \right) - k_t (x_t - x_s) = 0 \quad (1)$$

$$m_b \left(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g \right) + c_b \dot{x}_b + F_b - c_s \left(\dot{x}_s - \dot{x}_b \right) - k_s (x_s - x_b) = 0 \quad (2)$$

$$m_t \left(\ddot{x}_t + \ddot{x}_g \right) + F_t + c_t \left(\dot{x}_t - \dot{x}_s \right) + k_t (x_t - x_s) = 0 \quad (3)$$

نیروی تولید شده توسط اینترتر. در رابطه ۴ b بیانگر شریب اینرسی اندازه‌گیری در واحد جرم است.

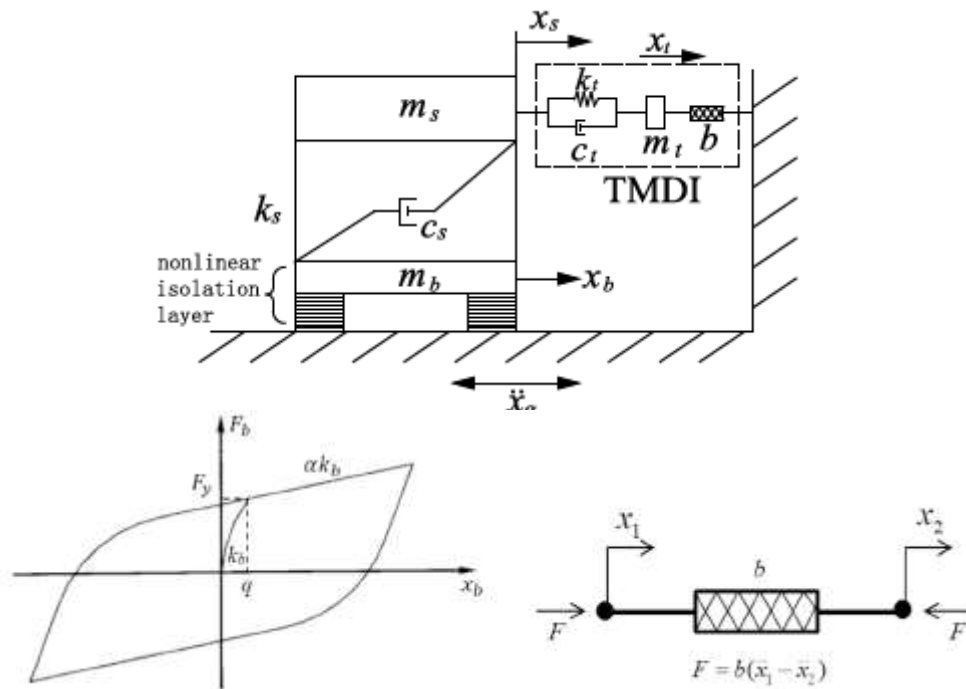
$$F_t = b \cdot \ddot{x}_t \quad (4)$$

ویژگی‌های نیروی بازگرداننده توسط مدل هیسترتیک - ون، که در شکل پایین نشان داده شده است، با شکل زیر شبیه‌سازی می‌شود:

$$F_b = a k_b x_b + (1 - a) F_y Z \quad (5)$$

$$q \dot{Z} = A \dot{x}_b - \gamma \left| \dot{x}_b \right| Z |Z|^{\eta-1} - \beta \dot{x}_b |Z|^{\eta} \quad (6)$$

در معادله ۶ پارامترهای γ ، A ، Z ، β ، η بدون بعد هستند و که شکل حلقه هیسترتیک را کنترل می‌کنند. پارامتر q جابجایی تسلیم قسمت تکیه‌گاه لاستیکی است و F_y در رابطه ۵ مقاومت تسلیم تکیه‌گاه لاستیکی است.



شکل ۱- مدل سازه‌ای همراه با سیستم غیرخطی BIS-TMDI در مخلی که TMD بر روی رو سازه و همچنین بر روی زمین توسط اینترتر لینک شده است. نمودار بوک-ون (سمت چپ). مدل مکانیکی دستگاه اینترتر سازه (سمت راست)

پارامتر αk_b متشکل از دو پارامتر α که نسبت سختی پیش از تسلیم به سختی تسلیم و پارامتر k_b که بیانگر سختی اولیه سیستم LRB است. در ادامه با معرفی مشخصه ها و سایر روابط به تجزیه و تحلیل مدل ها می پردازیم.

۳. پارامترها و روابط کاربردی انجام تحقیقات

در ادامه با معرفی پارامترها و روابط دخیل در مطالعات انجام گرفته به بررسی نتایج و نمودارهای بدست آمده توسط روابطی که در پایین آورده شده‌اند و همچنین روش تابع طیفی چگالی توان و مقدار میانگین ریشه دوم مطالعه نتایج انجام خواهد شد. برای تعیین مقادیر بهینه نسبت جرم، فرکانسی و میرایی روش‌های مختلفی از جمله بهینه‌سازی با کمک الگوریتم‌های ژنتیک یا میانگین مربع پاسخ‌ها به کاررفته است. بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده با موضوع میراگر جرمی تنظیم شونده، اغلب مناسب‌ترین نسبت میرایی میراگر را ۲۰ الی ۳۰ درصد پیشنهاد می‌نمایند. همچنین نسبت فرکانس میراگر به فرکانس مود تنظیم شده بین ۰/۸ الی ۱/۲ در تغییر است. این مقادیر برای شرایط مختلف ممکن است متفاوت باشد. بنابراین با استناد به نتایج به دست آمده در تحقیقات گذشته برای نسبت جرمی μ نسبت فرکانسی f و نسبت میرایی ξ_a می‌توان پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شونده را تنظیم نمود. این امر با استفاده از روابط زیر تحقق می‌یابد.

$$\mu_t = \frac{m_t}{m_s} \quad \mu_b = \frac{m_b}{m_s} \quad (7)$$

$$F_0 = \frac{F_y}{m_g} \quad , \quad (8)$$

$$\begin{aligned} x_{sr} &= x_s - x_b \\ x_{tr} &= x_t - x_s \end{aligned} \quad (10)$$

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{M}{\alpha k_b}} \quad (9)$$

در رابطه ۱۰ x_{sr} جابجایی قسمت روسازه نسبت به لایه جداساز است در حالیکه x_{tr} جابجایی TMDI نسبت به روسازه است.

$$\omega_s^2 = \frac{k_s}{m_s} \quad \omega_t^2 = \frac{k_t}{m_t} \quad (11)$$

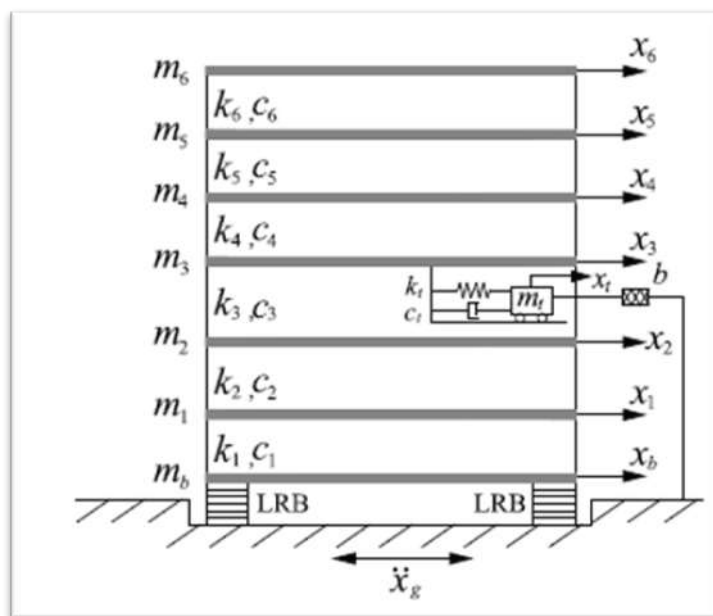
همچنین ضریب میرایی سیستم میراگر جرمی تنظیم شونده از رابطه تعیین می گردد:

$$\xi_s = \frac{c_s}{2 \cdot m_s \cdot \omega_s} \quad \xi_t = \frac{c_t}{2 \cdot m_t \cdot \omega_t} \quad (12)$$

$$\beta_t = \frac{b}{m_s} \quad (13)$$

$$c_d = 2\xi_d \sqrt{(m_d k_d)} \quad (14)$$

در روابط فوق ω فرکانس طبیعی مدل اول سازه است. در این مطالعه نسبت جرمی μ در نظر گرفته می شود. β_t ضریب جرم اینترتر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- سازه چند درجه آزاد همراه با سیستم غیر خطی BIS-TMDI

۴. پاسخ مدل‌های سازه‌ای و تفسیر نتایج

در ابتدا با استفاده از معادلات حرکت و همچنین نمودارهای به بررسی اثر نسبت جرمی اینترتردار تحت چندین حالت متفاوت از مقاومت تسلیم نرمالیزه شده پرداخته می‌شود و با بررسی نتایج به این موضوع می‌توان دست یافت که با افزایش مقدار نیروی نرمالیزه شده نقطه همگرایی کاهش پیدا کرده و سازه‌ها عملکرد مطلوب‌تری از خود در برابر نیروی وارده نشان می‌دهند. در ادامه هم با معرفی دو ضریب R_1 و R_2 بررسی‌های بیشتری انجام داده و پارامترهای زلزله را با ضرایب یاد شده در نمودارهای مجزا ترسیم شده و میزان تاثیرگذاری سیستم ترکیبی در هرکدام بررسی شده‌اند. در این تحقیق پارامترهای مهم زلزله تحت ۷ رکورد زمین‌لرزه مختلف بر روی سازه دارای سیستم ترکیبی و همچنین جداساز پایه بررسی شده و نتایج و گزارشات بدست آمده به‌وسیله جداول در ادامه آورده شده‌اند. در رابطه با دوره جداساز $T_b = 2.43$ s. در جدول ۱ ضرایب میرایی، سختی و میرایی مدل سیستم جداساز پایه ارائه شده‌است. پارامترهای β , γ , A ، و η از مدل BW (مدل هیسترتیک ون بوک) به ترتیب ۱، ۰.۵، ۰.۵، و ۱ هستند. پارامترهای TMDI به صورت زیر تنظیم می‌شوند: نسبت جرم برابر با ۰.۰۵ بوده و نسبت جرم اینترتر $\beta_t = 0.4$ ، از طریق ارتباط بین بیشینه مقدار شتاب زمین و توان طیف بهینه‌سازی قبلی، پارامترهای بهینه (ft و ξ_t) از TMDI بدست می‌آیند. داده‌های لرزه‌ای نزدیک - گسل - مانند رکوردهای لرزه‌ای از پایگاه‌داده پیر انتخاب می‌شوند که حاوی تعداد زیادی از سوابق لرزه‌ای نزدیک به گسل است. اصل انتخاب رکورد به شرح زیر است: فاصله گسل در فاصله ۲۰ کیلومتری است؛ شرایط خاک صلب است، بنابراین دامنه VS_{30} ۱۸۰ متر بر ثانیه است؛ زمان پالس متفاوت است، و غیره. هفت ورودی زمین‌لرزه نزدیک - گسل با دوره‌های مختلف پالس به منظور حل تحلیل تاریخچه زمانی پیاده‌سازی شده‌است. جزئیات اصلی آن‌ها از پایگاه اطلاعاتی peer در جدول ۲ نشان داده شده‌است. به منظور مقایسه، تمام این رکوردهای طبیعی بیشینه مقدار شتاب زمین به همان اندازه با ۰.۴ g اندازه‌گیری شدند. در تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی، تحلیل زیر بر جابجایی تمرکز دارد:

جدول ۱- جرم، سختی و ضریب میرایی مدل جداساز پایه

طبقه	لایه جداساز	۱	۲	۳	۴	۵	۶
جرم (t)	۵۰۰	۳۵۴,۶	۳۵۴,۶	۳۵۴,۶	۳۵۴,۶	۳۵۴,۶	۳۵۴,۶
سختی (KN/mm)	قبل از تسلیم ۱۷۰ بعد از تسلیم ۱۷	۶۸۰	۶۵۲	۵۷۰	۵۳۸	۴۸۶	۳۳۸
ضریب میرایی kn.s/m	۶۶۵	۴۹۰	۴۶۷	۴۱۰	۳۸۶	۳۴۸	۲۹۸

در جدول فوق مشخصات اصلی سازه و همپنین پارامتر میرایی آورده شده است.

جدول ۲- جزئیات اصلی حرکات زمین نزدیک گسل پالسی

نام زمین لرزه	سال	ایستگاه	شدت	سازوکار	فاصله کانونی کیلومتر	دوره سرعت پالس ثانیه	تناوب
دوزک	۱۹۹۹	Bolu	7.14	لغزش صفحات در امتداد هم	۱۲,۰۴	۰,۸۸۲	
نورثریچ	۱۹۹۴	Pardee-SCE	6.69	به صورت معکوس	۷,۴۶	۱,۲۳۲	
لوماپریا	۱۹۸۹	Gillory-Historic Bldg	6.93	به صورت معکوس و مورب	۱۰,۹۷	۱,۶۳۸	
هیلز	۱۹۸۷	Parachute	6.54	لغزش صفحات در امتداد هم	۰,۹۵	۲,۳۹۴	
کوبه	۱۹۹۵	Port Island	6.9	لغزش صفحات در امتداد هم	۳,۳۱	۲,۸۲۸	
کوکایلی	۱۹۹۹	Yarimca	7.51	لغزش صفحات در امتداد هم	۴,۸۳	۴,۹۴۹	
امپریال والی	۱۹۷۹	El Centro Differential Array	6.53	لغزش صفحات در امتداد هم	۵,۰۹	۶,۲۶۵	

در جدول شماره ۲ هفت رکورد ثبت شده زلزله در نقاط مختلف به همراه مشخصات و جزئیات مهم برای انجام تحقیقات و همچنین کمک به بررسی عملکرد سازه مورد مطالعه تحت سیستم‌های ترکیبی آورده شده است.

جدول ۳- بیشترین مقدار جابجایی تحت هفت زمین لرزه پالسی نزدیک گسل

نام زمین لرزه	بیشترین مقدار جابجایی بین سه سیستم	درصد کاهش در حالت سیستم ترکیبی با جداساز و سیستم ترکیبی با میراگر جرمی	تنظیم‌شونده و با میراگر جرمی	تنظیم‌شونده و با میراگر جرمی	تنظیم‌شونده اینترتردار
BIS	BIS-TMD	BIS-TMDI	BIS-TMD	BIS-TMDI	BIS-TMDI
دوزک	۰,۰۸۳۸	۰,۰۷۹۳	۰,۰۶۰۰	۵,۳۹	۲۸,۴۶
نورتریچ	۰,۲۲۴۸	۰,۲۰۱۳	۰,۱۶۰۴	۱۰,۴۵	۲۸,۶۴
لوماپیرا	۰,۲۱۸۱	۰,۲۰۳۰	۰,۱۴۶۲	۶,۹۳	۳۲,۹۸
هیلز	۰,۵۲۵۵	۰,۵۱۵۷	۰,۳۴۶۶	۱,۸۶	۳۴,۰۴
کوبه	۰,۴۴۴۰	۰,۴۲۵۴	۰,۲۹۹۰	۴,۱۹	۳۲,۶۶
کوکالی	۰,۲۳۱۵	۰,۲۲۵۷	۱۷,۳۳	۲,۵۴	۲۵,۱۷
امپریال والی	۰,۱۰۵۳	۰,۱۰۶۱	۰,۰۸۶۹	-۰,۶۸	۱۷,۴۷

در اینجا بیشترین مقدار جابجایی سازه تحت سه سیستم جداساز پایه و سیستم ترکیبی جداساز پایه با میراگر جرمی تنظیم‌شونده و همچنین سیستم ترکیبی جداساز پایه با میراگر جرمی تنظیم‌شونده اینترتردار بررسی شده‌اند و میزان کاهش جابجایی دو سیستم ترکیبی با سیستم جداساز پایه سنجیده شده و مقادیر در جدول ۳ ثبت شده‌اند.

جدول ۴- بیشترین مقدار جابجایی روسازه تحت هفت زمین لرزه پالسی نزدیک گسل

نام زمین لرزه	طبقات	بیشترین مقدار جابجایی بین سه سیستم جداساز و سیستم ترکیبی با میراگر جرمی تنظیم‌شونده و با میراگر جرمی تنظیم‌شونده اینتردار										درصد کاهش در حالت سیستم ترکیبی با میراگر جرمی تنظیم‌شونده و با میراگر جرمی تنظیم‌شونده اینتردار	
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۱	۲	۳	۴		۵
دوزک	BIS	۰,۰۰۵۱	۰,۰۱۰۷	۰,۰۱۶۹	۰,۰۲۲۹	۰,۰۲۸۳	۰,۰۳۳۱						
	BIS+MTD	۰,۰۰۰۴	۰,۰۰۹۹	۰,۰۱۱۵	۰,۰۲۰۰	۰,۰۲۰۲	۰,۰۲۲۹	۵,۶	۷,۳۹	۸,۸۰	۹,۹۲	۱۰,۸	۵,۶۰

	۲					۱	۵۲	۶	۴		۸		
	۱۸,۶ ۵	۱۴,۷ ۶	۱۸,۲ ۶	۲۲,۲ ۵	۲۲,۰ ۹	۱۸,۶ ۵	۰,۰۲ ۸۸	۰,۰۲ ۴۱	۰,۰۱۸ ۷	۰,۰۱۲ ۸	۰,۰۰۸۳ ۱	BIS+TMD I	
							۰,۰۴ ۹۵	۰,۰۴ ۲۳	۰,۰۳ ۴۹	۰,۰۲۶ ۷	۰,۰۱۷۶	BIS	نورثری چ
	۵,۵۲	۷,۴۷	۸,۹۰	۱۰,۱۲	۱۱,۲۴	۱۲,۴۱	۰,۰۴ ۶۸			۰,۰۲ ۴۰	۰,۰۱۵۶	BIS+TMD	
	۳۰,۱ ۵	۲۶,۷ ۶	۲۳,۰ ۸	۱۷,۰ ۲	۲۰,۴ ۸	۲۳,۴ ۵	۰,۰۳ ۴۶	۰,۰۳۱ ۰	۰,۰۲۶ ۸	۰,۰۲۲ ۱	۰,۰۱۴۰	BIS+TMD I	
							۰,۰۴ ۷۲	۰,۰۴۱ ۲	۰,۰۳ ۴۱	۰,۰۲ ۵۸	۰,۰۱۷۰	BIS	لوماپری را
	۰,۶۷ -	۱,۴۶	۲,۴۵	۳,۰۹	۳,۵۰	۳,۷۵	۰,۰۴ ۷۵	۰,۰۴۰ ۶	۰,۰۳ ۳۳	۰,۰۲ ۵۰	۰,۰۱۶۴	BIS+TMD	
	۱۴,۶۱	۱۳,۷ ۲	۱۲,۶۱	۱۰,۰۵	۱۲,۲ ۷	۱۴,۴ ۴	۰,۰۴۰ ۳	۰,۰۳ ۵۶	۰,۰۲۹ ۸	۰,۰۲ ۳۲	۰,۰۱۴۹	BIS+TMD I	
							۰,۰۷ ۷۰	۰,۰۶ ۸۷	۰,۰۵ ۸۰	۰,۰۴ ۴۷	۰,۰۲۹۸	BIS	هیلز
	۲,۹۵ -	۰,۵۶ -	۰,۱۸	۰,۴۴	۰,۷۵	۱,۱۱۹	۰,۰۷ ۹۳	۰,۰۶۹ ۱	۰,۰۵ ۷۹	۰,۰۴ ۴۵	۰,۰۲۹۶	BIS+TMD	
	۲۹,۳ ۷	۲۷,۹ ۵	۲۵,۳ ۰	۲۰,۰۱	۲۲,۶ ۸	۲۵,۰ ۸	۰,۰۵ ۴۴	۰,۰۴ ۹۵	۰,۰۴ ۳۳	۰,۰۳ ۵۸	۰,۰۲۳۰	BIS+TMD I	
							۰,۰۶ ۴۷	۰,۰۵ ۷۶	۰,۰۴ ۸۶	۰,۰۳ ۷۸	۰,۰۲۵۶	BIS	کوبه
	۲,۹۵ -	۱,۱۱	۲,۶۳	۳,۷۱	۲,۶۳	۴,۶۹	۰,۰۶ ۶۰	۰,۰۵ ۶۹	۰,۰۴ ۷۴	۰,۰۳ ۶۴	۰,۰۲۴۴	BIS+TMD	
	۲۳,۱ ۳	۲۲,۰ ۸	۲۰,۴ ۲	۱۷,۰ ۳	۲۰,۰۹	۲۲,۷ ۵	۰,۰۴ ۹۷	۰,۰۴ ۴۹	۰,۰۳ ۸۷	۰,۰۳۱ ۴	۰,۰۲۰۴	BIS+TMD I	
					۲۵,۱ ۷		۰,۰۴ ۳۳	۰,۰۳ ۸۲	۰,۰۳۱ ۹	۰,۰۲ ۴۲	۰,۰۱۵۸	BIS	کوکاید ی

	۱,۷۷	۰,۷۰	۱,۹۳	۲,۶۸	۲,۸۳	۲,۳۰	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۳۱	۰,۰۲	۰,۰۱۵۴	۰,۰۰	BIS+TMD
	-						۴۱	۸۰	۳	۳۶		۷۸	
	۱۵,۵	۱۴,۷	۱۳,۵	۱۱,۳	۱۱,۸	۱۲,۶۰	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۲۱	۰,۰۱۴۰	۰,۰۰	BIS+TMD I
	۷	۴	۷	۲	۳		۶۶	۲۶	۷۶	۵		۷۰	
امیرال والی							۰,۰۳	۰,۰۳۱	۰,۰۲	۰,۰۸	۰,۰۱۱۲	۰,۰۰	BIS
							۵۴	۰	۵۲	۶۹		۵۵	
	۸,۴۷	۹,۱۱	۷,۸۸	۴,۶۱	۲,۱۴	۴,۱۰	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۱۷	۰,۰۱۱۴	۰,۰۰	BIS+TMD
					-	-	۲۴	۸۱	۳۲	۵		۵۷	
	۱۰,۱۱	۱۱,۳۰	۱۲,۹۱	۴,۱۸	۱,۷۳	۳,۴۵	۰,۰۳۱	۰,۰۲	۰,۰۲۱	۰,۰۱۷	۰,۰۱۱۰	۰,۰۰	BIS+TMD I
							۸	۷۵	۹	۶		۵۳	

در جدول فوق ضمن بررسی جزئی جابجایی هر طبقه تحت سه سیستم جداساز پایه و سیستم ترکیبی جداساز پایه با میراگر جرمی تنظیم‌شونده و همچنین سیستم ترکیبی جداساز پایه با میراگر جرمی تنظیم‌شونده اینترتدار مقادیر بدست آمده برای همه طبقات نسبت به لایه جداساز سنجیده شده و بر حسب درصد در جدول بیتن شده است.

جدول ۵- بیشترین مقدار شتاب مطلق روسازه تحت هفت زمین لرزه پالسی نزدیک گسل

نام زمین لرزه	طبقا ت	بیشترین مقدار شتاب مطلق بین سه سیستم جداساز و سیستم ترکیبی با میراگر جرمی تنظیم‌شونده و با میراگر جرمی تنظیم‌شونده اینرتدار												درصد کاهش در در حالت سیستم ترکیبی با میراگر جرمی تنظیم‌شونده و با میراگر جرمی تنظیم‌شونده اینرتدار					
		لایه جدا ساز	۱	۲	۳	۴	۵	۶	لایه جدا ساز	۱	۲	۳	۴	۵	۶				
دوزک	BIS	۴,۲۴ ۷۴	۳,۲ ۳۶۹	۲,۴۰ ۹۵	۲,۱۲ ۷۸	۲,۸ ۵۰۷	۳,۵ ۷۷۸	۵,۱۳ ۸۰											
	BIS +M TD	۳,۷ ۶۷۴	۲,۸ ۶۸۶	۲,۱۵ ۴۲	۱,۹۲ ۹۵	۲,۵ ۷۰۳	۳,۱۹ ۰۱	۴,۸ ۲۴۵											
	BIS +T MD I	3.1 597	2.7 794	2.5 209	1.7 852	2.2 877	3.2 186	4.5 849	25. 61	14. 13	- 4.6 3	۱۶,۱ ۰	۱۹,۷ ۵	۱۰,۰ ۴	۲۵, ۶۱				

							7.2 609	4.1 983	4.2 155	3.6 928	3.7 857	4.1 853	5.4 041	BIS	نورثرد چ
20. 49	4.5 8	26. 02	11. 91	17. 15	17. 71	13. 62	5.7 732	4.0 061	3.1 180	3.2 531	3.1 366	3.4 441	4.6 681	BIS +T MD	
30. 44	9.8 9	21. 74	27. 27	22. 59	24. 17	25. 13	5.0 507	3.7 831	3.2 990	2.6 857	2.9 305	3.1 738	4.0 462	BIS +T MD I	
							5.6 466	4.1 179	3.2 370	2.8 943	2.8 414	3.7 391	4.6 852	BIS	لوماپر یرا
11. 11	12. 10	13. 48	15. 70	11. 26	10. 00	10. 65	5.0 193	3.6 195	2.8 006	2.4 398	2.5 215	3.3 654	4.1 862	BIS +T MD	
11. 92	15. 98	24. 80	31. 82	12. 96	10. 34	18. 27	4.9 737	3.4 597	2.4 343	1.9 733	2.4 730	3.3 524	3.8 291	BIS +T MD I	
							8.1 635	6.9 264	5.5 769	4.7 541	5.4 929	6.3 812	6.8 011	BIS	هیلز
23. 35	16. 21	10. 11	15. 64	14. 50	19. 11	22. 24	6.2 573	5.8 033	5.0 131	4.0 105	4.6 964	5.1 621	5.2 887	BIS +T MD	
39. 77	42. 77	45. 60	47. 16	47. 20	43. 75	37. 58	4.9 171	3.9 642	3.0 338	2.5 120	2.9 004	3.5 892	4.2 452	BIS +T MD I	
							6.8 910	5.7 195	4.6 363	4.3 991	4.3 488	4.8 571	5.5 610	BIS	کوبه
17. 65	18. 18	16. 46	15. 26	11. 78	16. 23	18. 69	5.6 746	4.6 798	3.8 733	3.7 280	3.8 365	4.0 690	4.5 217	BIS +T MD	

25.79	25.58	29.45	42.25	23.15	19.16	22.17	5.1137	4.2562	3.2711	2.5406	3.3420	3.9267	4.3284	BIS + T MD I	
							5.0704	4.0515	3.1883	3.0224	3.3551	3.7909	4.0528	BIS	کوکایدی
10.80	11.06	9.84	18.27	14.24	14.34	7.55	4.5229	3.6035	2.8745	2.4700	2.8772	3.2471	3.7467	BIS + T MD	
17.66	18.76	22.59	37.33	24.71	18.33	14.78	4.1748	3.2913	2.4681	1.8942	2.5262	3.0960	3.4537	BIS + T MD I	
							4.6544	3.9754	2.9625	2.5256	2.7032	3.3433	3.9277	BIS	امپریال والی
11.06	2.52	7.13	15.47	8.68	12.13	15.85	4.1398	3.8754	2.7514	2.1350	2.4685	2.9376	3.3053	BIS + T MD	
1.41	6.68	17.51	22.90	11.18	13.68	9.65	4.588	3.7098	2.4438	1.9474	2.4010	2.8860	3.5487	BIS + TM DI	

همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود سیستم ترکیبی جداساز پایه با میراگر جرمی تنظیم‌شونده و همچنین سیستم ترکیبی جداساز پایه با میراگر جرمی تنظیم‌شونده اینترتردار در مقایسه با جداساز پایه باعث کاهش بیشتر شتاب رو سازه و طبقات می‌شوند و در این میان سیستم ترکیبی جداساز پایه با میراگر جرمی تنظیم‌شونده اینترتردار نقش بیشتری در کاهش شتاب وارده به سازه داشته و با توجه به جدولی بیشترین تاثیر را در طبقه سوم در سیستم جداساز پایه با میراگر جرمی تنظیم‌شونده اینترتردار مشاهده می‌کنیم چون خود میراگر جرمی تنظیم‌شونده اینترتردار در طبقه سوم کار گذاشته شده بود و هرچه از طبقه پایین به سمت طبقه سوم حرکت می‌کنیم تاثیر گذاری سیستم بطور روشنی قابل ملاحظه است و از طبقه سوم به بعد میزان اثرگذاری سیستم کاهش پیدا کرده ولی همچنان تحت بسیاری از رکوردها سیستم ترکیبی اینترتردار موثرتر عمل می‌کند.

جدول ۶- بیشترین مقدار ضربه‌های وارده به TMD و TMDI تحت هفت زمین لرزه پالسی نزدیک گسل

نام زمین	بیشترین مقدار تکان خوردن	درصد نرخ کاهش BIS+TMDI نسبت به BIS+TMD	لرزه
	BIS+TMD	BIS+TMDI	
دوزک	۰,۱۰۴۴	۰,۰۶۴۸	۳۷,۹۱
نورثریچ	۰,۴۱۷۳	۰,۱۹۸۷	۵۲,۴۰
لوماپیرا	۰,۳۹۴۹	۰,۲۰۰۳	۴۹,۲۸
هیلز	۰,۹۴۷۵	۰,۴۸۵۹	۴۸,۷۲
کوبه	۰,۷۸۹۹	۰,۴۱۳۵	۴۷,۶۵
کوکایلی	۰,۴۵۰۸	۰,۲۳۹۲	۴۶,۹۴
امپریال والی	۰,۲۱۹۲	۰,۱۱۶۹	۴۶,۶۹

در جدول ۶ بیشترین مقدار تکان خوردن سازه در هفت زمین لرزه نزدیک گسل بررسی شده است و مشاهده شده که در همه‌ی زمین لرزه‌ها سازوکار اینترتردار تقریباً ۵۰ درصد میزان تکان خوردن را کاهش می‌دهد به جز زمین لرزه دوزک. پس می‌توان گفت که سیستم ترکیبی اینترتردار عملکرد سازه را در برابر زمین لرزه‌های نزدیک به گسل بسیار مطلوب می‌کند و سبب کاهش خسارات و آسیب‌های احتمالی هنگام زلزله می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

سیستم‌های ترکیبی به دلیل بهره‌گیری از دو سیستم مجزا اتلاف انرژی در سازوکار خود همواره نقش موثری در برابر تحریک‌های ناشی از زمین لرزه وارده به سازه داشته‌اند. در این تحقیق با بررسی دو سیستم ترکیبی شامل سیستم ترکیبی BIS-TMD و سیستم BIS-TMDI مشاهده شد که میزان تاثیرگذاری سیستم ترکیبی اینترتردار بیشتر از سیستم ترکیبی بدون اینترتر است. با توجه به جدول ۵ می‌توان این ادعا را ثابت کرد که میزان جذب انرژی و ضربه وارده به سازه تحت سیستم ترکیبی اینترتردار به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. هر چند که هر دو سیستم ترکیبی در مقایسه با سیستم جداساز پایه در میزان جذب انرژی عملکرد بهتری دارند اما عملکرد سیستم ترکیبی اینترتردار بهتر و موثرتر است. با توجه به جداول بالا می‌توان نتایج زیر را در باره‌ی سیستم‌های ذکر شده بدست آورد:

- ۱- سیستم غیر خطی BIS-TMDI باعث کاهش دامنه جابجایی لایه جداساز می‌شود. اثر بخشی کنترل سیستم غیرخطی BIS-TMDI بهتر از سیستم غیر خطی BIS-TMD می‌باشد و میزان توان TMDI کمتر از TMD است.

- ۲- براساس نتایج تحلیل تاریخچه زمانی برای انتخاب هفت حرکت زمین نزدیک به گسل، ارزش سیستم غیر خطی BIS-TMDI در کاهش جابجایی لایه ایزولاسیون، و همچنین عملکرد بهتر در پاسخ رو سازه؛ مطلوبتر به نیروهای وارده است.
- ۳- سیستم غیرخطی BIS-TMDI در کاهش شتاب مطلق وارد بر سازه در اثر زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل عملکرد بهتر و قابل اعتمادتری نسبت به سیستم غیرخطی BIS-TMD دارد.

فهرست منابع

1. Y. Ohtori, R. E. Christenson, B. F. Spencer and S. J. Dyke, "Benchmark Control Problems for Seismically Excited Nonlinear Buildings", *Journal of Engineering Mechanics*, 130(4), 366-385, 2004
2. R. S. Jangid. Stochastic response of building frames isolated by lead-rubber bearings. *Struct. Control Health Monit.* 2010; 17:1-22.
۳. سید حسین ، ح. عدالتی، م. بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی مجهز به TMD زیر اثر تاریخچه زمین لرزه واقعی. دوازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران . دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران. ۱۳۹۹
4. Salah Djerouni, Mahdi Abdeddaim, Said Elias, Rajesh Rupakhety. Optimum Double Mass Tuned Damper Inerter for Control of Structure Subjected to ground motions, *Journal of Building Engineering*. 2021. 44:103259.
5. Ghobarah A, Ali HM. Seismic design of base-isolated highway bridges utilizing lead-rubber bearings. *Canadian, Journal of Civil Engineering* 1990; 17:413-422.
6. Vlassis AG, Spyrakos CC. Seismically isolated bridge piers on shallow soil stratum with soil-structure interaction. *Computers and Structures* 2001; 79:2847-2861 .
7. Faravelli L. Modelling the response of an elastomeric base isolator. *Journal of Structural Control* 2001; 8:17-30.
8. Hwang JS, Chiou JM. An equivalent linear model of lead-rubber seismic isolation bearings. *Engineering Structures* 1996; 18:528-536 .
9. Tan RY, Huang MC. System identification of a bridge with lead-rubber bearings. *Computers and Structures* 2000; ۷۴:۲۶۷-۲۸۰.
10. Stanikzai, M.H., Elias, S., Matsagar, V.A. and Jain, A.K., (2018), "Seismic response control of base-isolated buildings using multiple tuned mass dampers," *Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 28, no. 3.

Performance of a Nonlinear Hybrid Base Isolator System Under Ground Motions

Yasar Mehrkhah

Master of Science in Structural Engineering, Siraj Institute of Higher Education, Tabriz, Iran

Abstract

In the structural design process, reducing the energy input to the structure has always been of concern and study by designers, therefore, energy dissipation systems and base isolators have been welcomed and utilized day by day in the design process. In this research, the effect of the base isolator on a 6-story structure under the recorded earthquake records of Kobe 1995 and Northridge 1994, as well as the inerted adjustable mass damper, has been investigated. In the inerted adjustable mass damper, the effect of the inerted adjustable mass damper has been investigated using nonlinear time history analysis of a 6-story structure with the effect of TMDI on the third floor along with the base isolator and the investigation of earthquake parameters, and it has been observed that this damper increases the resistance of the structure against earthquakes. In the base isolation system, the graphs and parameters have been examined using the RMS value and PSDF function, and the effect of the isolation system on the structure has been determined, and finally the numerical results have been discussed. It should be noted that the earthquake parameters obtained in the combined system have been optimized using a genetic algorithm.

Keywords: Seismic behavior, TMDI-equipped structure, real earthquake history.
