

## یادداشت پژوهشی

### چکیده

تجربه زلزله‌های اخیر در کشور نشان می‌دهد که مقدار و گستردگی خسارت وارد شده به ساختمان‌های قاب خمشی که در پلان نامتقارن بودند، به مراتب بیشتر از سایر سیستم‌های سازه‌ای است. یکی از راه‌های کاهش این خسارات، استفاده از سیستم‌های کنترلی است که در این پژوهش میزان کارایی برخی انواع کنترل غیرفعال برای کاهش اثر نامنظمی پیچشی در سازه‌های ساختمانی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از انواع سیستم‌های مطرح کنترل غیرفعال، میراگر جرمی تنظیم شده می‌باشد که معمولاً خود دارای جرم قابل توجهی هستند. این موضوع به دلیل آنکه استفاده از آنها را در اجرا محدود می‌کند، می‌تواند نقطه‌ضعفی برای این نوع از سیستم‌ها باشد؛ بنابراین در پژوهش پیش رو علاوه بر آنها، استفاده از سیستم نوین میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی که دارای جرم کمتری هستند، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، رفتار لرزه‌ای سه ساختمان فاقد میراگر، مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده و مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی تحت پنج رکورد زلزله نشان داد که میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی با جرم کمتر توانسته عملکرد بهتری داشته باشد. همچنین نتیجه به دست آمده از تحلیل حساسیت بر نحوه‌ی تنظیم میراگر جرمی چرخشی با تغییر ساختار میراگر و کاهش جرم آن مؤید این است که می‌توان جرم میراگر را تا حدود ۵۰ درصد کاهش داد، بدون اینکه کاهش قابل ملاحظه‌ای در کارایی آن ایجاد شود.

**واژگان کلیدی:** سازه فلزی، نامنظمی پیچشی، کنترل غیرفعال، تحلیل تاریخچه زمانی، میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی، تحلیل حساسیت.

## بهبود عملکرد رفتار سازه نامنظم پیچشی با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی

محمدعلی شاه‌رخی‌نژاد

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مجید محمدی (نویسنده مسئول)

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

### ۱- مقدمه

فرکانس از طریق نیروهای ورودی زلزله تحریک شوند، حرکت در فازی خارج از حرکت سازه تشدید شده و انرژی از طریق نیروی اینرسی که میراگر به سازه وارد می‌کند، مستهلک می‌شود؛ بنابراین برآورد و بررسی میزان جرم، سختی و میرایی TMD و همچنین مکان قرارگیری آن بسیار حائز اهمیت است. هنگامی که سازه‌های نامتقارن تحت اثر بارهای لرزه‌ای جانبی قرار می‌گیرند، علاوه بر حرکت جانبی، به دلیل منطبق نبودن مرکز سختی و مرکز جرم، حرکت پیچشی نیز خواهند داشت. معمولاً این رفتار باعث می‌شود که در طی حوادث لرزه‌ای، پاسخ سازه‌های نامتقارن بزرگ‌تر از پاسخ سازه‌های متقارن مشابه

میراگر جرمی تنظیم شده یکی از ابزارهای کنترل غیرفعال جهت استهلاک انرژی است. در سازه‌های مجهز به انواع میراگر و از جمله میراگر جرمی تنظیم شده (TMD)<sup>۱</sup> به دلیل اینکه مقداری از انرژی سازه به میراگر جرمی تنظیم شده TMD منتقل می‌شود، تقاضای اتلاف انرژی در اعضای اصلی سازه تحت اثر نیروهای خارجی کاهش می‌یابد. قطعات اصلی این سیستم شامل جرم، فنر و میراگر هستند که برای کاهش پاسخ دینامیکی سازه به آن نصب می‌شود و عملکرد آن اساساً بر مبنای کاهش انرژی ارتعاشی سازه می‌باشد، بدین صورت که فرکانس TMD را معمولاً برابر با مود غالب سازه قرار می‌دهند؛ بنابراین هرگاه این

می شوند. با وجود تمامی این خصوصیات، استفاده از چنین میراگرهایی، مشکلاتی را نیز به دنبال خواهد داشت. از مهم ترین ایرادات این میراگر، جرم اضافه ای است که به سازه اضافه می کند. اخیراً میراگر جدیدی تحت عنوان میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی در سال ۱۳۹۰، ارائه شد که می تواند با وارد کردن اثر لختی دورانی تا حدودی جرم میراگر جرمی تنظیم شده را کاهش دهد بدون اینکه نقضی در عملکرد میراگر به وجود آید [۷]. هدف از این تحقیق بررسی عملکرد سازه های با رفتار پیچشی مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی می باشد. برای این منظور، ابتدا سه ساختمان پنج طبقه نامنظم و مشابه، واقع در شهر تهران (نوع خاک سه) و با فرض استفاده از قاب خمشی فولادی سه دهانه به ترتیب، بدون میراگر جرمی، مجهز به میراگر جرمی و مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی طراحی شدند و سپس تحت پنج رکورد زلزله قرار داده شده و در انتها نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به دست آمده به منظور ارزیابی رفتار ساختمان ها با یکدیگر مقایسه می شوند.

## ۲- میراگرهای جرمی تنظیم شده

میراگرهای جرمی تنظیم شده یکی از ابزارهای کارآمد در کنترل ارتعاش سازه ها هستند. هدف از به کارگیری میراگر جرمی تنظیم شده در یک سازه همانند بسیاری دیگر از میراگرها، کاهش تقاضای اتلاف انرژی در اعضای اصلی سازه ها از طریق انتقال بخشی از انرژی میراگر جرمی تنظیم شده می باشد. طرز عملکرد و مفهوم میراگر جرمی تنظیم شده را می توان با بررسی یک ضربه گیر نامیرا شامل یک جرم کوچک  $m_d$  و یک فنر با سختی  $k_d$  متصل شده به جرم اصلی  $m$  با سختی  $k$  در شکل (۱) دریافت.

تحت یک بارگذاری هارمونیک ساده می توان نشان داد که جرم اصلی  $m$  می تواند کاملاً مانند گار باقی بماند در صورتی که فرکانس طبیعی ضربه گیر،  $\sqrt{\frac{k_d}{m_d}}$ ، مساوی با فرکانس تحریک می گردد. این پدیده را می توان به دو صورت تفسیر نمود. اول اینکه ضربه گیر نامیرا انرژی وارد از تحریک را در صورت برابر

باشد. در نتیجه هنگام وقوع چنین حوادثی، میزان آسیب ها و خسارت وارده به این نوع سازه ها شدیدتر خواهد بود [۱]. با توجه به اینکه طراحی نامتقارن سازه ها امری اجتناب ناپذیر است، استفاده از تجهیزات میرایی الحاقی و سیستم های کنترلی به عنوان یک راه حل مناسب و مؤثر برای کاهش پاسخ پیچشی این نوع سازه ها توسط محققین پیشنهاد شده است [۲].

اساس رفتار میراگر جرمی متوازن بر روی سازه ها ریشه در عملکرد جذب کننده های ارتعاشات دینامیکی داشته که از سال ۱۹۰۹ توسط فرام مورد مطالعه قرار گرفته است. در سال ۱۹۵۶ هارتوگک تصحیحات و مباحثی تکمیلی بر کار فرام انجام داد و بعداً سیستم های جذب کننده دینامیکی میرا و نامیرا را با وجود میرایی سیستم اصلی مورد بررسی قرار داد [۳]. در سال ۱۹۶۰ اسنودن برای بهبود عملکرد، رفتار جذب کننده صلب را در کاهش پاسخ سیستم اصلی مورد بررسی قرار داد. نتیجه مطالعات اخیر نشان داد که جذب کننده های مکانیکی با استفاده از مواد با سختی متناسب با فرکانس و ضریب میرایی ثابت می تواند به طور قابل ملاحظه ای ارتعاش تشدید شده سیستم اصلی را کاهش دهد. در سال ۱۹۷۷ میدها و همکاران به صورت عددی اثر یک سیستم جذب کننده انتقالی - چرخشی را در کاهش مقادیر مودال خمشی و پیچشی مربوط به یک ساختمان مورد بررسی قرار دادند [۴].

در ایران نیز این موضوع در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این میان زهرایی و قنادی اصل [۵] کاربرد میراگر جرمی برای کاهش ارتعاشات لرزه ای ساختمان های میان مرتبه را بررسی نموده و نشان داده اند که مشخصات زلزله بر راندمان میراگر جرمی مؤثر است. دهقان و همکاران [۶] نیز بر روی معیاری برای پایداری تأثیر عملکرد بهینه میراگرهای جرمی چندگانه کار کردند. بیشتر مطالعات برای کاهش اثر باد بر انواع سازه ها انجام گرفته است و میزان کارایی این میراگرها در کاهش ارتعاشات لرزه ای کمتر بررسی شده است. میراگرهای جرمی به واسطه ی جرمشان، اگر با خصوصیات سازه تنظیم شوند، بخشی از انرژی وارده را جذب نموده و موجب کاهش ارتعاشات سازه

داریم:  $p = \hat{p} \sin \Omega t$

$$u = \hat{u}(\sin \Omega t + \delta_1) \quad (3)$$

$$u_d = \hat{u}_d(\sin \Omega t + \delta_1 = \delta_2) \quad (4)$$

که  $\hat{u}$  و  $\delta$  مقادیر بزرگنمایی دامنه و جابه‌جایی فاز را مشخص می‌کنند. مقدار بار بحرانی زمانی اعمال می‌شود که پدیده تشدید اتفاق رخ دهد، یعنی  $\omega = \Omega$ ، در نهایت با حل معادلات فوق در حالت تشدید خواهیم داشت:

$$\hat{u} = \frac{\hat{p}}{k\mu} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\xi}{m} + \frac{1}{2\xi_d}\right)^2}} \quad (5)$$

$$\hat{u}_d = \frac{1}{2\xi_d} \hat{u} \quad (6)$$

$$\tan \delta_1 = -\left(\frac{2\xi}{m} + \frac{1}{2\xi_d}\right), \quad \tan \delta_2 = -\frac{\Pi}{2} \quad (7)$$

با توجه به رابطه (7)، پاسخ جرم تنظیم شده، ۹۰ درجه با فاز پاسخ جرم اصلی تفاوت دارد. این تفاوت فاز باعث کاهش انرژی به وسیله جرم میراگر می‌شود [8]. برای تنظیم پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده یعنی  $\alpha$  نسبت فرکانسی،  $\mu$  نسبت جرمی و  $\xi$  نسبت میرایی روابط به دو صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

**(الف) اگر سازه نامیرا باشد:**

با استفاده از روابط واربرتون [9] داریم:

$$\lambda = \frac{\omega_g}{\omega_s} = 1 \rightarrow \alpha_{opt} = \frac{\sqrt{(1-0.6\mu)(1+\mu)^2}}{1+\mu} \quad (8)$$

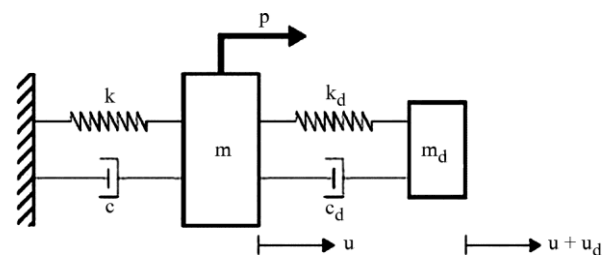
$$\xi_{opt} = \frac{\sqrt{\mu(1+2.5\mu+2\mu^2)}}{2(1+2.7\mu)} \quad (9)$$

$$1 < \lambda < 3 \rightarrow \alpha_{opt} = \frac{\sqrt{1-\frac{\mu}{6}}}{1+\mu} \quad (9)$$

$$\lambda \geq 3 \rightarrow \alpha_{opt} = \frac{\sqrt{1-\frac{\mu}{2}}}{1+\mu} \quad (10)$$

$$\lambda \leq 1 \rightarrow \xi_{opt} = \frac{\sqrt{\mu\left(1-\frac{\mu}{4}\right)}}{4(1+\mu)\left(1-\frac{\mu}{2}\right)} \quad (10)$$

بودن فرکانس‌ها کاملاً جذب می‌کند و مانع از ارتعاش جرم اصلی می‌شود. به‌عنوان دومین تفسیر می‌توان این‌گونه بیان نمود که ضربه‌گیر در فاز متقابل عمل کرده و در هر لحظه نیرویی دقیقاً برابر با نیروی وارده از تحریک خارجی را به جرم اصلی وارد می‌آورد. لذا برآیند نیروهای جرم اصلی صفر شده و ثابت می‌ماند. برای بررسی روابط دینامیکی حاکم بر میراگر جرمی تنظیم شده، مطابق شکل (۱) یک سیستم یک درجه آزادی که دارای سختی  $k$  و جرم  $m$  و ضریب میرایی  $c$  است به‌عنوان سازه اصلی و یک سیستم دیگر که متصل به سازه اصلی است با جرم  $m_d$  و سختی  $k_d$  و ضریب میرایی  $c_d$  را به‌عنوان میراگر جرمی تنظیم شده در نظر می‌گیریم. هدف از اضافه کردن میراگر جرمی به سازه اصلی کاهش دامنه ارتعاش سازه تحت بار خارجی  $p$  می‌باشد. تغییر مکان‌های مختلف سیستم نیز عبارتند از  $u$  تغییر مکان نسبی جرم اصلی نسبت به زمین و  $u_d$  تغییر مکان نسبی جرم میراگر نسبت به جرم اصلی [8].



شکل (۱): نمای شماتیک سیستم یک درجه آزاد به همراه میراگر جرمی تنظیم شده [8].

معادلات حاکم بر جرم اصلی به صورت زیر است [8]:

$$(1+\mu)\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2u = \frac{p}{m} - \mu\ddot{u}_d \quad (1)$$

معادلات حاکم بر میراگر به صورت زیر است:

$$\ddot{u}_d + 2\xi_d\omega_d\dot{u}_d + \omega_d^2u_d = -\ddot{u} \quad (2)$$

که در روابط فوق  $\omega$  و  $\omega_d$  به ترتیب فرکانس زاویه‌ای ارتعاش سازه اصلی و میراگر جرمی و همچنین  $\xi$  و  $\xi_d$  ثابت میرایی سازه اصلی و میراگر جرمی می‌باشد.  $\mu$  نسبت جرمی ( $\mu = \frac{m_d}{m}$ ) می‌باشد.

برای حل معادلات فوق با فرض  $\omega_d = \omega$  و

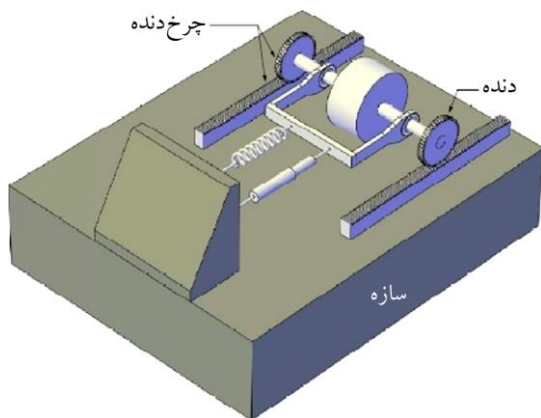
$$\omega_d = \alpha \times \omega \quad (16)$$

$$k_d = m_d \times \omega_d^2 \quad (17)$$

$$c_d = 2 \times m_d \times \omega_d \times \xi \quad (18)$$

### ۳- میراگر جرمی چرخشی تنظیم شونده

با توجه به تحقیقات گذشته، بهترین حالت تنظیم میراگر جرمی، زمانی است که جرم میراگر بین ۲ تا ۱۰ درصد جرم سازه در نظر گرفته شود. از این رو اشکال اصلی TMD، جرم بالای آن است که با توجه به تحمیل کردن جرم بیشتر به سازه، از نظر اقتصادی به صرفه نیست. به همین دلیل نوع جدیدی از TMD ارائه شده که در آن ممان اینرسی جرمی نیز به معادلات تعادل دینامیکی سیستم وارد شده است. در این حالت ممان اینرسی جرمی (تابعی از ابعاد و جرم دستگاه) به عنوان یک لختی ثانویه عمل کرده و می تواند جایگزین بخشی از جرم گردد. در میراگر جرمی چرخشی چنین لختی ای در حرکت های رفت و برگشتی به کار گرفته شده و لذا امکان افزایش جرم مؤثر و یا به عبارت دیگر، کاهش جرم واقعی وسیله به وجود آمده است [۷]. در صورت استفاده از دو چرخ دنده در گیر که در شکل (۲) نشان داده شد، می توان اطمینان حاصل نمود که همیشه سیستم عملکرد غلظتی داشته و جرم اصلی دستگاه همواره در حرکت رفت و برگشتی ناگزیر به چرخش است. میراگر جدید تحت عنوان میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی یا Whirling TMD نام گذاری شده است [۷].



شکل (۲): میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی [۷].

### (ب) اگر سازه میرا باشد:

۱. با استفاده از روابط هوانگ و وارنیچای [۱۰] داریم:

$$\lambda = \frac{\omega_g}{\omega_s} = 1 \rightarrow \alpha_{opt} = \frac{\sqrt{(1-0.6\mu)(1+\mu)^2}}{1+\mu} - 0.7\xi_s, \quad (11)$$

$$\xi_{opt} = \frac{\sqrt{\mu(1+2.5\mu+2\mu^2)}}{2(1+2.7\mu)}$$

$$1 < \lambda < 3 \rightarrow \alpha_{opt} = \frac{\sqrt{1-\frac{\lambda\mu}{6}}}{1+\mu} - \frac{0.7\xi_s}{1-\frac{\mu}{2}}, \quad (12)$$

$$\xi_{opt} = \frac{\sqrt{\mu\left(1-\frac{\mu}{4}\right)}}{4(1+\mu)\left(1-\frac{\mu}{2}\right)} + 0.25\mu\xi_s$$

$$\lambda \geq 3 \rightarrow \alpha_{opt} = \frac{\sqrt{1-\frac{\mu}{2}}}{1+\mu} - \frac{0.7\xi_s}{1-\frac{\mu}{2}}, \quad (13)$$

$$\xi_{opt} = \frac{\sqrt{\mu\left(1-\frac{\mu}{4}\right)}}{4(1+\mu)\left(1-\frac{\mu}{2}\right)} + 0.25\mu\xi_s$$

۲. با استفاده از روابط صادق و همکاران [۱۱] داریم:

$$\alpha = \frac{1}{1+\mu} \left( 1 - \xi_s \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \right), \quad \xi = \frac{\xi_s}{1+\mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \quad (14)$$

که در روابط فوق  $\xi_s$  نسبت میرایی سازه،  $\alpha$  نسبت فرکانسی میراگر به سازه،  $\xi$  نسبت میرایی میراگر به سازه،  $\mu$  نسبت جرمی جرم سازه به میراگر و  $\omega_g$ ، فرکانس زمین می باشد.

با توجه به روابط فوق مشاهده می شود که با افزایش نسبت جرمی، نسبت فرکانس کاهش و نسبت میرایی افزایش پیدا می کند. همچنین با نسبت جرمی یکسان، با افزایش میرایی سازه، نسبت فرکانسی کاهش و نسبت میرایی افزایش می یابد. مقدار نسبت میرایی محاسبه شده از روابط صادق بیشتر و بزرگ تر از روابط دیگر خواهد بود. با استفاده از روابط (۱) الی (۱۴) برای محاسبه جرم، سختی و میرایی میراگر جرمی تنظیم شده داریم:

$$m_d = \mu \times m \quad (15)$$

استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی می توان جرم تجهیز را به اندازه  $\frac{I_w}{r_g^2}$  کاهش داد بدون اینکه عملکرد آن تحت تأثیر قرار بگیرد. توجه به این نکته لازم است که در مواردی ممکن است  $\frac{I_w}{r_g^2}$  مقدار بزرگی داشته باشد. با توجه به معادلات مشاهده شد که TMD، در یک سازه یک درجه آزاد می تواند به راحتی تنظیم شود. به همین صورت می توان جرم مؤثر میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی را نیز محاسبه و بر حسب شکل آن مقدار  $I_w$  و  $m_w$  را تعیین نمود. نکته حائز اهمیت این است که در سازه های چند درجه آزاد که دارای چند مود متفاوت هستند با همین روش می توان بر روی یک مود تمرکز و با تنظیم میراگر جرمی تنظیم شده با فرکانس آن مود، اثر آن مود را کاهش داد. در سازه های نامنظم می توان با تنظیم میراگر جرمی تنظیم شده با فرکانس مود پیچشی، اثر آن را کاهش داد و در نتیجه از خسارت های ساختمان در زلزله جلوگیری نمود.

#### ۴- مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شده و میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی

برای شناخت دقیق عملکرد میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی، مدل سه بعدی قاب خمشی با رفتار پیچشی در نرم افزار ETABS [۱۲] طراحی و سپس در نرم افزار SAP2000 [۱۳] در سه حالت ساده، کنترل شده با میراگر جرمی تنظیم شده و کنترل شده با میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شده است. برای این منظور یک ساختمان فولادی سه دهانه ای ۵ طبقه مطابق آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۱۴] و مبحث دهم ویرایش ۹۲ [۱۵] مدل سازی و طراحی شده است. مدل سازی سازه های نامنظمی که دارای مود پیچشی قابل توجه هستند، مطابق آنچه در برخی تحقیقات [۱۶] پیشنهاد شدند، انجام شده است. برای اعمال رفتار پیچشی به سازه، یک لبه سخت و یک لبه ی نرم در سازه ایجاد شد. طراحی سازه به روش حالت حدی انجام شده و تمامی اعضا به حالت بهینه طراحی شده اند. همچنین در طراحی سازه فرض شده که مدل ساختمان در منطقه ای با خطر نسبی زیاد و خاک نوع سه واقع شده است.

معادلات تعادل دینامیکی یک سازه یک درجه آزادی دارای میراگر جرمی تنظیم شده به شرح زیر است [۷]:

(الف) سازه کنترل شده با TMD

(ب) سازه کنترل شده با Whirling\_TMD

در حالت (الف)، معادلات حرکت سازه ی کنترل شده با TMD و خود میراگر به ترتیب به صورت زیر است:

$$m_s \ddot{x}_{s-d} = -(k_s + k_d) x_{s-d} - (c_s + c_d) \dot{x}_{s-d} + k_d x_d + c_d \dot{x}_d + m_s \ddot{x}_e + f_{es} + f_1 \text{sign}(\dot{x}_d - \dot{x}_{s-d}) \quad (19)$$

$$m_d \ddot{x}_d = k_d x_{s-d} + c_d \dot{x}_{s-d} - k_d x_d - c_d \dot{x}_d + m_d \ddot{x}_e + f_{ea} - f_1 \text{sign}(\dot{x}_d - \dot{x}_{s-d}) \quad (20)$$

و در حالت (ب)، معادله حرکتی Whirling\_TMD به طور مشابه به صورت زیر به دست می آید:

$$\left( m_w + \frac{I_w}{r_g^2} \right) \ddot{x}_d = k_d x_{s-d} + c_d \dot{x}_{s-d} - k_d x_d - c_d \dot{x}_d + m_d \ddot{x}_e + f_{ea} - f_2 \text{sign}(\dot{x}_d - \dot{x}_{s-d}) \quad (21)$$

که در معادلات فوق، پارامترهای  $m_s$ ،  $c_s$  و  $k_s$  به ترتیب مربوط به جرم، میرایی و سختی سازه و  $m_d$ ،  $c_d$  و  $k_d$  به ترتیب جرم، میرایی و سختی میراگر TMD می باشد.  $f_{es}$  نیروی خارجی وارد بر سازه و  $f_{ea}$  نیروی وارد بر تجهیز جاذب انرژی می باشد.  $\ddot{x}_e$  مربوط به شتاب خارجی وارد بر کل سیستم و  $f_1$  اصطکاک در برابر حرکت TMD می باشد. همچنین در معادله (۲۱)،  $m_w$  و  $I_w$  به ترتیب جرم و ممان اینرسی جرمی Whirling\_TMD و  $f_2$  حاصل جمع اصطکاک ناشی از حرکت چرخ دنده دایره ای بر روی چرخ دنده شانهای و  $r_g$  شعاع مقطع دوار میراگر می باشد. با مقایسه معادلات (۲۰) و (۲۱) به راحتی می توان دریافت که جزئیات به کار رفته در میراگر جرمی چرخشی باعث شده است که ممان اینرسی تجهیز در معادلات حرکتی آن وارد شود. بنابراین مقایسه معادلات (۲۰) و (۲۱) نشان می دهد که عملکرد یک Whirling\_TMD با جرم  $m_w$  مشابه عملکرد یک TMD متعارف با جرم  $m_w + \frac{I_w}{r_g^2}$  است که این مقدار جرم مؤثر Whirling\_TMD نامیده و آن را با  $m_{\text{eff-w}}$  نشان می دهند. به عبارت دیگر می توان گفت که در صورت

عملکرد در کاهش پیچش، در شکل (۳) نشان داده شده است. اما از آنجایی که رفتار مدل در این پژوهش در راستای طولی پیچشی می باشد، برای کنترل جابه جایی لبه ی نرم سازه، میراگر روی لبه ی نرم قرار گرفته است و تنها در راستای طولی کار می کند. بنابراین برای کنترل رفتار پیچشی سازه، میراگر را در بالاترین نقطه سازه و روی لبه نرم مدل شده است. برای تنظیم کردن میراگر جرمی جهت بهینه شدن عملکرد آن متناسب با سازه، از فرکانس مود پیچشی مدل و ۵ درصد جرم مؤثر مودی آن استفاده شده است [۱۸]. با توجه به روابط (۱۴) الی (۱۸)، نحوه تنظیمات میراگر جرمی محاسبه و در جدول (۱) نشان داده شده است.

جهت تنظیم میراگر جرمی چرخشی، با توجه به رابطه (۲۱) و روابط ممان اینرسی جرمی [۱۹]، با فرض اینکه شکل هندسی میراگر به صورت استوانه می باشد و با توجه به شکل (۴) داریم:

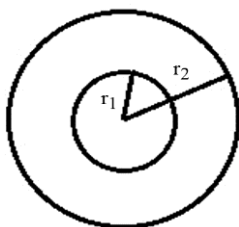
$$I_{Disk} = \frac{1}{2} mr^2 \quad (22)$$

$$I_{Disk} = \frac{\pi}{2} tpr_2^4 - \frac{\pi}{2} tpr_1^4 = \frac{\pi}{2} tp(r_2^4 - r_1^4) \quad (23)$$

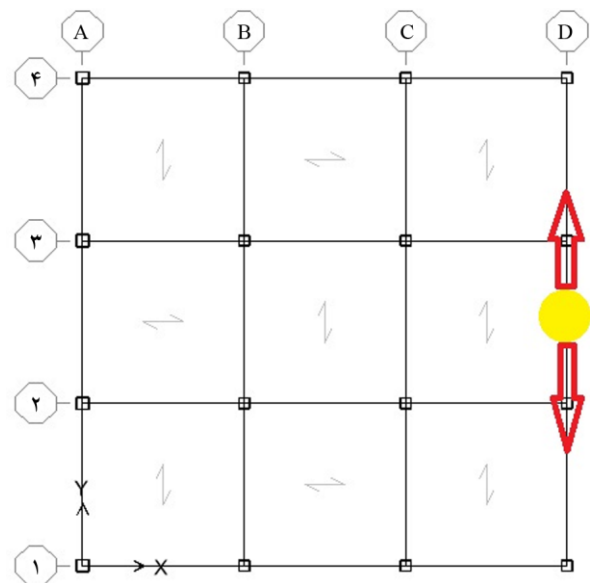
$$M_{Disk} = \pi tp(r_2^2 - r_1^2) \quad (24)$$

$$M_{eff-w} = \left( M_{Disk} + \frac{I}{r_2^2} \right) = \pi tp(r_2^2 - r_1^2) + \frac{\pi}{2} tp \frac{(r_2^4 - r_1^4)}{r_2^2} \quad (25)$$

$$M_{eff-w} = M_{disk} \left[ \frac{3}{2} + 0.5 \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right] = M_{TMD}$$



شکل (۴): مقطع استوانه.



شکل (۳): پلان سازه.

لازم به ذکر است که برای ایجاد یک سازه نامنظم پیچشی دو روش کلی وجود دارد. روش اول با تغییر دادن مرکز جرم سازه و روش دوم با ایجاد یک لبه ی نرم و یک لبه ی سخت ایجاد رفتار نامنظمی پیچشی می کنند [۱۶]. با توجه به شکل (۳)، راستای A با مدل کردن مقاطع بزرگ تر نسبت به راستای D، سخت تر شده و باعث ایجاد نامنظمی پیچشی در سازه شده است. خروجی های مدل نسبت های نامنظمی پیچشی طبقات را به طور متوسط بین ۱/۳ تا ۱/۵ نشان می دهد، این موضوع با بند ۱-۷-۱ آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۱۴] بررسی شده است. به همین دلیل می توان گفت سازه در راستای طولی (جهت y) رفتار نامنظمی زیاد و شدید پیچشی دارد.

برای مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شده در نرم افزار SAP2000 [۱۳] از المان Link استفاده شده و جرم میراگر به صورت متمرکز به آن اختصاص داده شده است. بهینه ترین حالت مدل کردن میراگر جرمی تنظیم شده در بالاترین نقطه مدل و مرکز سازه می باشد [۱۷]. موقعیت میراگر برای داشتن بهترین

جدول (۱): مشخصات میراگر جرمی تنظیم شده.

میرایی میراگر جرمی (نیوتن در ثانیه بر متر)	سختی میراگر جرمی (نیوتن بر متر)	فرکانس میراگر جرمی (رادیان بر ثانیه)	جرم میراگر جرمی (کیلوگرم)	نسبت جرمی (H)	فرکانس مود پیچشی (رادیان بر ثانیه)
۱۴۶۵۳۳	۱۸۰۸۸۱۲	۶/۵۶	۴۱۹۴۳	۰/۰۵	۶/۹۸

## ۶- شاخص های خرابی

در این پژوهش بعد از اعمال پنج رکورد زلزله و انجام تحلیل های مورد نیاز، سه نوع شاخص خرابی برای مقایسه ساختمان های مورد مطالعه استفاده شد که عبارتند از:

- شاخص خرابی شماره (۱): تغییر مکان جانبی نسبی طبقات: منظور تغییر مکان جانبی لبه نرم هر طبقه نسبت به طبقه زیرین است.
- شاخص خرابی شماره (۲): دوران<sup>۴</sup> پیچشی طبقه: بدین منظور برای محاسبه مقدار پیچش هر سه مدل، تغییر مکان گره گوشه نرم و گره گوشه سخت استخراج و مقدار پیچش طبقه در طول زمان محاسبه شده است.

- شاخص خرابی شماره (۳): نامنظمی رفتاری طبقه با استفاده از بند ۱-۷-۱ استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، قسمت ب، در مواردی که حداکثر تغییر مکان نسبی در یک انتهای ساختمان در هر طبقه بیشتر از ۲۰ درصد متوسط تغییر مکان نسبی در دو انتهای ساختمان در آن طبقه باشد، در این موارد نامنظمی زیاد و در مواردی که این اختلاف بیشتر از ۴۰ درصد باشد، نامنظمی شدید پیچشی توصیف می شود [۱۴]. بدین منظور با توجه به توضیح ارائه شده، نسبت حداکثر جابه جایی به متوسط جابه جایی راستای ۴، تحت رکورد زلزله های اعمال شده به هر یک از سه مدل، در هر طبقه، طی گام های مختلف زمانی محاسبه و نامنظمی رفتاری نامیده شد.

## ۷- بررسی شاخص های خرابی

برای بررسی هر یک از سه شاخص خرابی، به طور نمونه نمودارهای میزان جابه جایی نسبی طبقه پنجم و میزان دوران طبقه پنجم تحت زلزله ی نورث ریچ و همچنین مقایسه نامنظمی رفتاری در طبقه پنجم بین پنج رکورد زلزله به ترتیب در شکل های (۵) الی (۷) قابل مشاهده می باشد.

با توجه به شکل (۵)، در ثانیه ی ۹/۵ بیشترین جابه جایی نسبی طبقه رخ داده است. در این زمان میزان جابه جایی نسبی طبقه پنجم در مدل سازه ای بدون میراگر جرمی ۱/۵- درصد و در حالت مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده ۰/۵۸- درصد و در

با توجه به رابطه (۲۵)، اگر نسبت  $\frac{r_1}{r_2}$  به ترتیب برابر، ۰، ۰/۹ و یا حتی ۰/۹۹ باشد، مقدار نسبت جرم میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی به جرم میراگر جرمی تنظیم شده به ترتیب برابر ۶۶، ۵۲ و ۵۰ درصد به دست خواهد آمد. به عبارتی جرم میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی را حداکثر می توان تا ۵۰ درصد جرم میراگر جرمی تنظیم شده کاهش داد. حال با توجه به فرض هندسی میراگر جرمی چرخشی به صورت دیسک تو پر داریم:

$$\begin{aligned} r_1 &= 0 \\ M_{\text{disk}} &= 0.66 M_{\text{TMD}} \\ M_{W\_TMD} &= 27962 \text{ kg} \end{aligned} \quad (26)$$

به جز جرم، سایر تنظیمات میراگر جرمی چرخشی عیناً مطابق تنظیمات میراگر جرمی که در جدول (۱) ذکر شده، تعیین می گردد.

## ۵- ارزیابی رفتار مدل ها

در این تحقیق برای ارزیابی رفتار واقعی لرزه ای ساختمان های مورد مطالعه، از روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شد. برای این منظور، مفاصل پلاستیک با خصوصیات منطبق با نشریه ۳۶۰ [۲۰]، به ابتدا و انتهای تیر و ستون ها اختصاص داده شد. جهت انجام تحلیل، با توجه به نوع خاک و توصیه های استاندارد ۲۸۰۰ [۱۴]، پنج زوج شتاب نگاشت از نشریه FEMA\_P695 [۲۱]، انتخاب و داده های آن از PEER [۲۲] گرفته شد. مشخصات شتاب نگاشت های مورد استفاده در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): شتاب نگاشت های مورد استفاده در تحلیل.

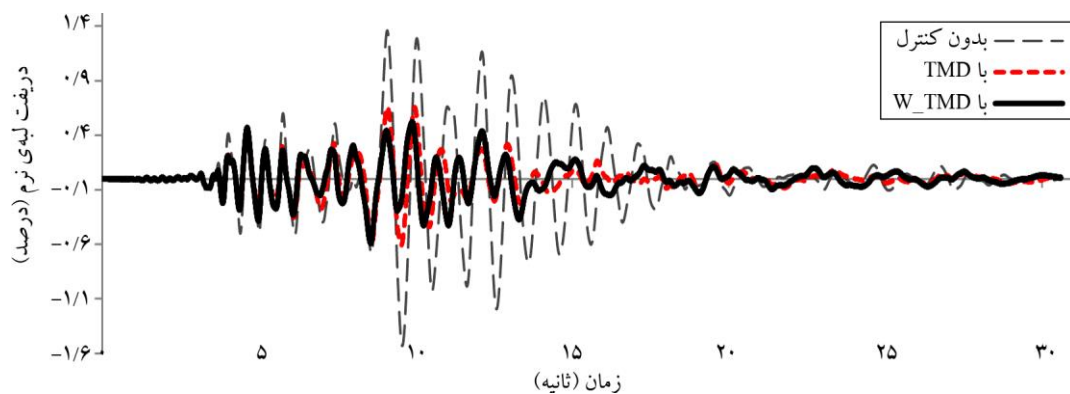
نام زلزله	ایستگاه	تاریخ وقوع	بزرگای در مقیاس ریشر	PGA (g)
نورث ریچ	Beverly Hills	۱۹۹۴	۶/۷	۰/۵۲
لوماپریتا	Gilroy Array	۱۹۸۹	۶/۹	۰/۵۶
کوبه	Shin Osaka	۱۹۹۵	۶/۹	۰/۲۴
امپریال ولی	El Centro Array	۱۹۷۹	۶/۵	۰/۳۸
چی-چی	CHY101	۱۹۹۹	۷/۶	۰/۴۴

طبقه پنجم مدل مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده  $0/48$ - درجه و در مدل مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی  $0/24$ - درجه می‌باشد. با توجه به شکل (۶)، میزان دوران پیچشی طبقه پنجم در مدل مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی  $73$  درصد نسبت به مدل بدون میراگر جرمی کاهش پیدا کرده است.

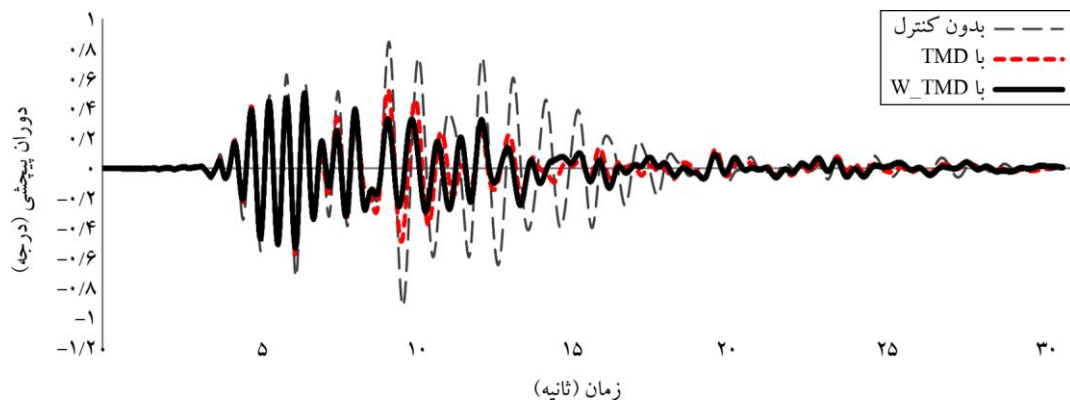
با توجه به شکل (۷)، مقدار نامنظمی رفتاری طبقه پنجم تحت زلزله‌ی نورتریج در مدل مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده  $2/3$  درصد نسبت به مدل بدون میراگر جرمی کاهش یافته است.

حالت مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی  $0/25$ - درصد به دست آمده است. با توجه به این شکل، میزان حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقه پنجم، در حالت مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی به میزان  $83$  درصد نسبت به مدل بدون میراگر جرمی کاهش یافته است.

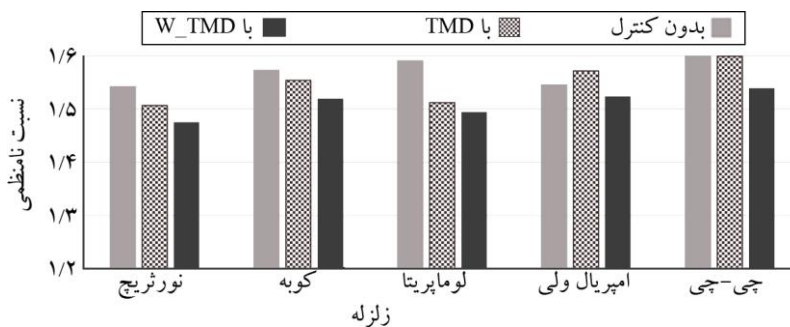
با توجه به شکل (۶)، در ثانیه‌ی  $9/5$ ، بیشترین میزان دوران طبقه پنجم رخ داده است. در این زمان مقدار دوران مدل بدون میراگر جرمی  $0/92$ - درجه می‌باشد. در همین زمان میزان دوران پیچشی



شکل (۵): جابه‌جایی نسبی لبه نرم در راستای طولی طبقه پنجم تحت زلزله‌ی نورتریج.



شکل (۶): دوران پیچشی طبقه پنجم تحت زلزله نورتریج.



شکل (۷): نامنظمی رفتاری در طبقه پنجم.



اگر میراگر تنظیم شده چرخشی با مقطع دیسک توپر باشد، جرمی برابر ۶۶ درصد جرم میراگر جرمی تنظیم شده دارد. حال در این قسمت مقطع میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی به صورت حلقه<sup>۶</sup> فرض و بر اساس این فرض، میراگر، تنظیم و اثر آن بر سازه در مقایسه با حالات قبل ارائه می‌گردد.

$$\frac{I_1}{I_2} = 0.9$$

$$M_{ring} = 0.52 M_{TMD}$$

$$M_{W\_TMD\_Ring} = 21810 \text{ kg}$$

(۲۷)

تحت همین زلزله، مقدار کاهش نامنظمی رفتاری در مدل مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی نسبت به مدل بدون میراگر برابر ۴/۴ درصد می‌باشد. نسبت حداکثر شاخص‌های خرابی مورد مطالعه برای تمامی طبقات و تمامی رکوردهای زلزله، در جدول‌های (۳) تا (۵) بیان شده است.

### ۸- تحلیل حساسیت<sup>۵</sup> تغییر مشخصات میراگر جرمی

#### تنظیم شده چرخشی

با استفاده از رابطه (۲۵) و توضیحات ارائه‌شده در آن بخش، با توجه به رابطه (۲۶) و جرم میراگر جرمی تنظیم شده

جدول (۳): بررسی مقادیر ماکزیمم شاخص‌های خرابی شماره (۱).

نسبت دررفت سازهی کنترل شده به سازهی اصلی										
طبقه پنجم		طبقه چهارم		طبقه سوم		طبقه دوم		طبقه اول		زلزله
W_TMD	TMD	W_TMD	TMD	W_TMD	TMD	W_TMD	TMD	W_TMD	TMD	
۰/۱۶	۰/۳۸	۰/۲۷	۰/۴۸	۰/۳۴	۰/۶۱	۰/۳۸	۰/۶۳	۰/۳۹	۰/۶۴	نورثریج
۰/۳۳	۰/۳۷	۰/۴۳	۰/۵۷	۰/۴	۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۶۲	۰/۰۶	۰/۲۶	لوماپریتا
۰/۱۱	۰/۳۸	۰/۱۵	۰/۳۱	۰/۱۴	۰/۳۷	۰/۱۴	۰/۳۷	۰/۱۳	۰/۳۶	کوبه
۰/۷۱	۱/۰۷	۰/۷۱	۱/۱	۰/۸۵	۱/۲۲	۰/۸۴	۱/۱۳	۰/۹۶	۱/۲۱	امپریال ولی
۰/۲۲	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۵۸	۰/۳۵	۰/۵۵	۰/۳۶	۰/۴۶	چی-چی

جدول (۴): بررسی مقادیر ماکزیمم شاخص‌های خرابی شماره (۲).

نسبت دوران پیچشی سازهی کنترل شده به سازهی اصلی										
طبقه پنجم		طبقه چهارم		طبقه سوم		طبقه دوم		طبقه اول		زلزله
W_TMD	TMD	W_TMD	TMD	W_TMD	TMD	W_TMD	TMD	W_TMD	TMD	
۰/۲۷	۰/۵۲	۰/۲۸	۰/۵۵	۰/۳۲	۰/۵۸	۰/۳۴	۰/۵۸	۰/۳۷	۰/۶۲	نورثریج
۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۴۶	۰/۶۹	۰/۳۹	۰/۵۵	۰/۲	۰/۸	لوماپریتا
۰/۰۷	۰/۲	۰/۱	۰/۳۶	۰/۱۷	۰/۲۶	۰/۰۸	۰/۲۳	۰/۱۶	۰/۲۷	کوبه
۰/۲۶	۰/۳۷	۰/۳	۰/۴۲	۰/۳۲	۰/۴۴	۰/۳۳	۰/۴۶	۰/۲	۰/۴	امپریال ولی
۰/۲۷	۰/۴۹	۰/۲۷	۰/۵	۰/۲۹	۰/۵	۰/۳۲	۰/۵۹	۰/۲۵	۰/۵	چی-چی

جدول (۵): بررسی مقادیر ماکزیمم شاخص‌های خرابی شماره (۳).

نسبت نامنظمی رفتاری سازهی کنترل شده به سازهی اصلی										
طبقه پنجم		طبقه چهارم		طبقه سوم		طبقه دوم		طبقه اول		زلزله
W_TMD	TMD	W_TMD	TMD	W_TMD	TMD	W_TMD	TMD	W_TMD	TMD	
۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۸	نورثریج
۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۷	لوماپریتا
۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۸	کوبه
۰/۹۹	۱/۰۲	۰/۹۷	۱/۰۳	۰/۹۸	۱/۰۳	۰/۹۸	۱/۰۲	۰/۹۸	۱/۰۱	امپریال ولی
۰/۹۵	۰/۹۹	۰/۹۵	۰/۹۹	۰/۹۴	۱	۰/۹۵	۰/۹۹	۰/۹۵	۰/۹۸	چی-چی

نامنظمی رفتاری طبقات و در نتیجه کاهش خسارت زلزله داشته است.

- از آنجایی که میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی جرم به مراتب کمتری به سازه اعمال می کند، می تواند جایگزین مناسبی برای میراگر جرمی تنظیم شده باشد.

- با انجام تحلیل حساسیت در تنظیم میراگر جرمی چرخشی، و تحلیل و مقایسه این نوع میراگر در دو حالت مختلف با مقاطع دیسک توپر و حلقه، نتیجه می گیریم که زمانی که میراگر جرمی چرخشی به صورت استوانه با مقطع حلقه مدل می شود، هرچه نسبت شعاع دایره داخلی به دایره خارجی بیشتر شود، در حقیقت هرچه حلقه باریک تر شود، اثر لختی آن بیشتر و در نتیجه به جرم کمتری نیاز دارد تا تنظیمات آن مانند میراگر جرمی تنظیم شده معمولی باشد.

- نتایج تحلیل حساسیت نشان داد میراگر جرمی چرخشی تنظیم شده با مقطع حلقه علاوه بر کمتر کردن جرم میراگر، نامنظمی رفتاری سازه را به خوبی کاهش داده و از طرفی مشابه میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی با مقطع دیسک توپر عمل کرده است. بنابراین می توان میراگر جرمی را به نحوی تنظیم کرد که با شعاع بزرگ تر و ایجاد اثر چرخشی، پیچش سازه نامنظم را مانند میراگر جرمی معمولی کاهش دهد و درعین حال جرمی به مراتب کمتر از آن به سازه تحمیل نماید.

### مراجع

- Mansouri, M. and Moghadam, A.S. (2011) Laboratory and analytical study of the effect of viscous damper distribution on asymmetric structure behavior. *Civil Engineering and Surveying Journal*, **45**(2), 233-245 (in Persian).
- Yoshida, O. and Dyke, S.J. (2005) Response Control of Full-Scale Irregular Buildings Using Magnetorheological Dampers. *Structural Engineer*, **131**(5).
- Hartog, J.P.D. (2007) *Mechanical Vibrations*. Read Books.
- Midha, A., Erdman, A., and Frohrib, D. (2010) *An Approximate Method for the Dynamic Analysis of*

چرخشی در حالت دیسک توپر و مقایسه آن با جرم میراگر در حالت حلقه، می توان دریافت که با این اقدام جرم میراگر در حدود ۲۳ درصد کاهش پیدا می کند. هر یک از سه شاخص خرابی بررسی شده را تحت هر پنج رکورد زلزله، این بار میان مدل های مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی با مقطع دیسک توپر و حلقه بررسی شده است. نتایج شاخص خرابی سوم، نامنظمی رفتاری در جدول (۶) بیان شده است.

جدول (۶): نسبت نامنظمی رفتاری سازه ی کنترل شده در دو حالت میراگر با مقطع حلقه و دیسک به سازه اصلی.

نسبت شاخص های خرابی سازه ی مجهز به میراگر جرمی چرخشی به سازه ی اصلی در طبقه پنجم						
زلزله	نسبت جابه جایی نسبی		نسبت دوران پیچشی		نسبت نامنظمی رفتاری	
	حلقه	دیسک	حلقه	دیسک	حلقه	دیسک
نورث ریج	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۹۵	۰/۹۶
لوما پرتا	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۹۴	۰/۹۴
کوبه	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۰۷	۰/۱	۰/۹۶	۰/۹۵
امپریال ولی	۰/۷۱	۰/۷۲	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۹۹	۰/۹۹
چی - چی	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۹۶	۰/۹۶

### ۹- نتیجه گیری

یکی از راه های کاهش اثر نامنظمی و خرابی های لرزه ای ناشی از آن در ساختمان ها، استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده می باشد که معمولاً جرم این گونه میراگرها زیاد است. اخیراً نوع جدیدی از این گونه میراگر، با عنوان میراگرهای جرمی تنظیم شده چرخشی پیشنهاد شده که جرم آن بسیار کمتر از انواع معمولی آن است. در این پژوهش رفتار ساختمان های ۵ طبقه نامنظم در سه حالت بدون میراگر، دارای میراگر جرمی تنظیم شده معمولی و میراگر تنظیم شده چرخشی در پنج زلزله مختلف با یکدیگر مقایسه شوند. با بررسی دقیق شاخص های خرابی و مقایسه عملکرد این ساختمان ها، می توان نتیجه گرفت که:

- مدل مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی عملکرد به مراتب بهتری در کاهش جابه جایی نسبی طبقات، کاهش میزان دوران ایجاد شده در طبقات و همچنین کاهش ضریب

- of asymmetric structures using friction dampers. *5<sup>th</sup> National Congress on Civil Engineering* (in Persian).
17. Pourakbar Sharifi, N. and Rahimzade, F. (2011) *Evaluation of a Proposed Torsional TMD in Controlling the Seismic Response of Asymmetric 3-D Steel Structural Models*. M.Sc. Thesis, Sharif University (in Persian).
  18. Mahdzade, M. and Ghahramanzade, F. (2012) *Effect of Position and Mass Percentage of TMD Damper on Plan of Seismic Performance of Reinforced Concrete Structures*. M.Sc. Thesis, Islamic Azad University, Abhar Branch (in Persian).
  19. Beer, F.J., Johnston, E.R., and Mazurek, D. (2015) *Vector Mechanics for Engineers: Statics*, 11<sup>th</sup> Edition.
  20. Office of Deputy for Strategic Supervision Department of Technical Affairs (2014) *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, No. 360 (First Revision) (in Persian).
  21. ATC (2009) *Quantification of Building Seismic Performance Factors, FEMA P695*. Applied Technology Council, California.
  22. PEER Ground Motion Database, University of California, Berkeley, [Online]. Available: <http://ngawest2.berkeley.edu/>.
- Elastic Linkages*.
5. Zahrai, S. and Ghannadi-Asl, A. (2008) Seismic performance of TMDs in improving the response of MRF buildings. *Scientia Iranica*, **15**, 21-33.
  6. Dehghan-Niri, E., Zahrai, S.M., and Mohtat, A. (2010) Effectiveness-robustness objectives in MTMD system design: an evolutionary optimal design methodology. *Structural Control and Health Monitoring*, **17**(2), 218-236.
  7. Mohammadi Ghazi, M., Rahimian, M., and Ghorbani, S.A. (2011) *Provide A Rotating Massive Dampener with Adaptive Configuration*. M.Sc. Theses, Tehran University (in Persian).
  8. Rezaei, E. and Sahab, M. (2010) Laboratory study paper effective parameters of a mass detector adjusted for a class one building model. *5<sup>th</sup> National Civil Engineering Conference*, by the Ferdowsi University of Mashhad (in Persian).
  9. Warburton, G. (1982) Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **10**(3), 381-401.
  10. Hoang, N. and Warnitchai, P. (2005) Design of multiple tuned mass dampers by using a numerical optimizer. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, **34**, 125-144.
  11. Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W. and Chung, R.M. (1997) A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, **26**, 617-635.
  12. ETABS Nonlinear Version 9.7.4. [Performance]. Computers and Structures, Inc., 1995.
  13. SAP2000 ADVANCED 16.0.0. [Performance]. Computers and Structures, Inc., 1976-2013.
  14. Road, Housing and Urban Development Reserch Center (April 2013) *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800* (4<sup>th</sup> Edition) (in Persian).
  15. National Building Regulations-Top Ten (Designing and Implementing Steel Buildings), National Bureau of Building Regulations, 2012 (in Persian).
  16. Barzouei, J. and Moghadam, A.S. (2010) Torsion

### واژه‌نامه

- ۱- میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) Tuned Mass Damper
- ۲- میراگر جرمی تنظیم شده چرخشی Whirling TMD
- ۳- تغییر مکان جانبی نسبی طبقات Story Drift
- ۴- دوران Rotation
- ۵- تحلیل حساسیت Sensitivity Analysis
- ۶- حلقه Ring

## Improving Seismic Behavior of Irregular Buildings by Whirling Tuned Mass Dampers

Mohammad Ali Shahrokhi Nejad<sup>1</sup> and Majid Mohammadi<sup>2\*</sup>

1. M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, \*Corresponding Author, email: m.mohammadigh@iiees.ac.ir

Buildings should be designed to resist earthquake-induced deflections and internal forces. The experience of recent earthquakes illustrates that the amount and extent of damage in irregular buildings are far more significant than the others. Irregularities in the structural system may amplify structural response leading to significantly more severe damage compared to regular structures. In fact, when irregular structures are subjected to lateral seismic loads, they will experience lateral motion accompanied by torsional rotations, which is due to an eccentricity between the center of mass and the center of stiffness. In other words, structural irregularities decrease the seismic performance of buildings significantly, and they will be heavily damaged as a result of torsional effects on structural elements. Many studies have been conducted on reducing torsional effects on structures. One of the approaches is to apply control systems. In this study, efficiencies of some passive damping controls are investigated to reduce the torsional irregularities in building structures. One type of passive control system is tuned mass dampers (TMD), which usually have a significant mass. Having a great mass can be a drawback for these types of systems and limits their application in practice. Therefore, to eliminate this issue, a new type of tuned mass damper called Whirling Tuned Mass Damper (W-TMD) has been recently introduced in the literature. This type of tuned mass dampers has a smaller mass compared with ordinary TMDs. In the present study, the seismic performance and behavior of ordinary TMD and W-TMD have been investigated and compared. For this purpose, the seismic behavior of three similar buildings, with different controlling systems, having five story steel moment resisting steel structures are compared. The first building does not have any controlling system; however, the last two ones are equipped with TMD or W-TMD. Nonlinear time history analysis results of these buildings under five earthquake records are compared. The applied records are for Northridge, Loma Prieta, Kobe, Imperial Valley, and Chi-Chi earthquakes. The obtained results show that buildings with controlling systems are much better; however, W-TMD has a better performance in reducing the story drift and structural torsional modes, compared to TMD.

Moreover, a sensitivity analysis is carried out on the properties of a W-TMD by changing the method of supplying the required inertia. Two different methods are chosen: the first one has a solid disk but the second has a ring section. The results showed that when W-TMD is fitted with the ring cross-section, not only it has a smaller mass, but also it has a better performance in decreasing the irregularity response of the structure. To be exact, the higher the ratio of the radius of the inner circle to the outer circle of the ring, the greater the amount of inertia will be, and therefore W-TMD requires less mass. Since a W-TMD applies less mass to the structure, it can be an excellent alternative for TMD. If the W-TMD is equipped with a disk section, it has 66% the mass of TMD, while using ring section, it can have 42% of the TMD mass. The obtained results of the sensitivity analysis of W-TMD confirm that the damper mass can be reduced up to 50% without significantly reducing its efficiency. Some damage indices, including drift story, torsional rotation of floor and torsional irregularities coefficient, are considered for evaluating the performance of each model equipped with TMD and W-TMD. It can be concluded that the model equipped with a W-TMD has a much better performance in reducing all damage indices.

**Keywords:** Irregular Building, Passive Control, Whirling TMD, Steel Structure, Nonlinear Time History Analysis, Sensitivity Analysis.