

# ارزیابی عملکرد لرزه‌های سیستم ترکیبی سری میراگر جرمی و ستون مایع و ارائه روشی برای افزایش کارایی آن

سید مهدی زهرائی<sup>۱</sup>، رضا بیگلریان<sup>۲</sup>

۱- دانشیار قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساختهای عمرانی، دانشکده عمران دانشگاه تهران

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد عمران- سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

mzahrai@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۵

**چکیده-** در سال‌های اخیر به توسعه وسایل مؤثر در استهلاک انرژی لرزه‌ای در سازه‌ها اهمیت بیشتری داده شده است که پاسخ سازه اصلی را در ناحیه الاستیک نگه دارند. به این منظور، میراگرها برای کم کردن اثر نیروی زلزله به سازه‌ها استفاده می‌شوند. همچنین تکنولوژی‌هایی برای استهلاک انرژی لرزه ای با قرار دادن جرم کمکی توسعه پیدا کرده است. در این مقاله، سیستم ترکیبی سری میراگر جرمی و ستون مایع تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۰/۰۳-۰/۰۵، ۰/۰۳-۰/۰۱ و ۰/۰۲-۰/۰۲ در نظر گرفته شده است. تحلیل تاریخچه زمانی بر روی سازه‌های ۲۰ طبقه تحت زلزله‌های نرتریج، طبس و لوما پرایتا مقیاس شده به 0.4g با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی مطلب انجام شده است. عملکرد سیستم‌های ترکیبی سری با سیستم تک میراگر ستون مایع مقایسه شده و همچنین کارایی سیستم‌های ترکیبی سری با افزایش ضریب افت هد بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است که عملکرد سیستم ترکیبی سری وابسته به مشخصات زلزله‌های مختلف، فرق می‌کند و با افزایش نسبت جرمی جرم دوم و نیز با انتخاب نسبت فرکانسی بهینه بر اساس پاسخ‌ها، کارایی میراگر ترکیبی سری افزایش می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** سیستم ترکیبی سری میراگر جرمی و ستون مایع تنظیم شده، کنترل غیرفعال، نسبت فرکانسی بهینه

## ۱- مقدمه

(اعم از تغییر سختی، پیرو، میرایی یا جرم) را در هنگام تحریک انجام می‌دهد که پس از خاتمه تحریک دوباره غیرفعال می‌شود. این گونه سیستم‌ها به دلیل ثابت بودن خواص دینامیکی از جمله سختی، میرایی، جرم (و در نتیجه فرکانس طبیعی)، به فرکانس و دامنه تحریک ورودی سازه حساس بوده و ممکن است موجب کاهش بازده آنها برای تحریک‌هایی مثل زلزله که لرزش ورودی به دقت قابل پیش‌بینی نیست، بشود. روش‌هایی مانند ترکیب این

در سال‌های اخیر، تلاش‌های زیادی به منظور کاربرد سیستم‌های کنترل مدرن در سازه‌های در معرض زلزله انجام شده است. گروه مهمی از این سیستم‌ها، سیستم‌های کنترل غیرفعال‌اند که بدون نیاز به هیچ گونه منبع انرژی خارجی و فقط با استفاده از حرکت سازه، ارتعاشات لرزه‌ای را کاهش می‌دهند. در این روش‌های کنترل، با شروع تحریک (مثلاً زلزله)، سیستم کنترلی به کار افتاده و عملکرد کنترلی خود

سیستم‌ها به منظور کاهش این حساسیت ابداع و به کار گرفته شده است و هم اکنون در بسیاری از کشورها سازه‌های زیادی به روش غیرفعال کنترل ارتعاش می‌شوند [۱]. از بین سیستم‌های غیرفعال، میراگر جرمی تنظیم شده یک دستگاه جذب کننده انرژی غیرفعال متشکل از یک جرم، یک فنر و یک میراگر ویسکوز است که به سازه برای کاهش ارتعاش اضافه می‌شود. میراگرهای جرمی تنظیم شده در کاهش پاسخ سازه‌ها تحت بار هارمونیک یا تحریک باد و زلزله مؤثر است. میراگرهای جرمی بر اساس مودهای اصلی (مود اول) سازه‌ها تنظیم می‌شوند. تنظیم دقیق و صحیح میراگر جرمی متناسب با سازه و زلزله یکی از مهمترین پارامترها در طراحی است که تنظیم نادرست، کارایی میراگر جرمی را کاهش می‌دهد. Den Hartog در سال ۱۹۲۸ برای بار اول تئوری جذب کننده‌های دینامیکی ارتعاش میرا و نامیرا را با فرض عدم وجود میرایی در سازه اصلی مطالعه نمود و روشی را برای انتخاب پارامترهای بهینه میراگر جرمی ارائه کرد. دن هارتوگ با کمینه کردن پاسخ سازه‌ای یک درجه آزادی و میراگر متصل به آن تحت تحریک سینوسی فرمول های زیر را ارائه کرد:

$$f_{opt} = \frac{1}{1 + \mu}, \xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (1)$$

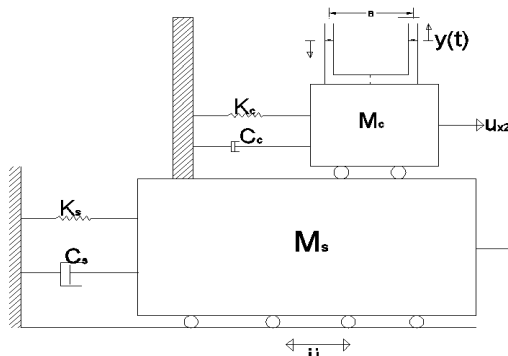
Sadek و همکاران در سال ۱۹۹۷ پارامترهای بهینه میراگرهای جرمی برای کاهش پاسخ سازه تحت بار لرزه‌ای را بررسی کردند. آنها با تعیین نسبت جرمی، نسبت تنظیم فرکانس، نسبت میرایی بهینه معادل و بیشینه میرایی مودال در دو مود ارتعاشی اول را به دست آوردند [۲]. با مقایسه روابط ارائه شده نسبت‌های فرکانسی و میرایی مشاهده می‌شود با افزایش نسبت جرمی، نسبت فرکانسی کاهش و نسبت میرایی افزایش می‌یابد. همچنین در نسبت جرمی

یکسان، با افزایش نسبت جرمی نسبت فرکانسی کاهش و نسبت میرایی افزایش می‌یابد. میراگر ستون مایع تنظیم شده شامل یک لوله U و یا V شکل با سطح مقطع ثابت است که در داخل این لوله سیال وجود دارد. انرژی ارتعاش از سازه به سیال داخل میراگر ستون مایع تنظیم شده منتقل شده و به وسیله نیروی بازگشتی ثقلی سیال و مکانیزم‌های افت هد هیدرودینامیکی مانند اصطکاک، روزنه، زانویی<sup>۱</sup> مستهلک می‌شود. فرکانس پایه این میراگر تنها به طول ستون مایع وابسته است، درحالی که میرایی از طریق جریان آب از روزنه‌ها ایجاد می‌شود. برخلاف میراگرهای جرمی، پاسخ میراگرهای ستون مایع تنظیم شده به واسطه روزنه‌ها و تأثیر میرایی غیرخطی در معادله حرکت سیال در لوله، غیرخطی است. Sakai و همکاران در سال ۱۹۸۹ اولین بار میراگرهای ستون مایع را به عنوان سیستم‌هایی که میرایی را به گونه غیرمستقیم به سازه اولیه با استفاده از نوسانگرهایی از ستون مایع در یک ظرف U- شکل منتقل می‌کنند معرفی کردند [۳]. Hartog و همکاران در سال ۱۹۹۵ میراگر ترکیبی ستون مایع با یک سیستم روزنه متغیر را ارائه کردند که در آن نیروهای میرایی ناشی از روزنه به طور فعال با استفاده از الگوریتم کنترل بهینه لحظه‌ای کنترل شد. نتایج حاکی از آن است که میراگر ترکیبی ستون مایع می‌تواند برای مدت زمان طولانی، به طور قابل توجهی مؤثرتر از میراگر ستون مایع باشد در حالی که تنها مقدار کمی از تلاش کنترلی برای تنظیم روزنه نیاز است. تحت شرایط لرزه‌ای، میراگر ستون مایع ترکیبی با کنترل روزنه می‌تواند در میرایی سریع پاسخ دوم سازه مؤثر باشد. به علاوه، اگر سیستم کنترل فشار اضافه شود، پاسخ اولیه سازه نیز می‌تواند کاهش پیدا کند [۴]. تحقیقات زیادی برای به دست آوردن پارامترهای بهینه میراگرهای ستون مایع انجام شده است. Wu و

1- Orifice  
2- Elbow

## ۲- مدل تحلیلی سیستم ترکیبی میراگر سری جرمی و ستون مایع تنظیم شده

معادله حرکت سیستم یک درجه آزادی مجهز به سیستم ترکیبی سری جرمی - ستون مایع تنظیم شده تحت تحریک زلزله با شتاب نگاشت  $\ddot{u}_g$  به شکل زیر است (شکل ۱):



شکل (۱) سیستم سازه یک درجه آزادی با سیستم ترکیبی سری میراگر جرمی و ستون مایع تنظیم شده

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{x1} \\ \ddot{u}_{x2} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s + C_c & -C_c \\ -C_c & C_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_{x1} \\ \dot{u}_{x2} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s + K_c & -K_c \\ -K_c & K_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{x1} \\ u_{x2} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} -\ddot{u}_g M_s \\ F - \ddot{u}_g M_c \end{Bmatrix} \quad (2)$$

همچنین معادله میراگر ستون مایع در این سیستم تحت شتاب زمین  $\ddot{u}_g$  به صورت زیر است:

$$\rho A L \ddot{y} + \frac{1}{2} \rho A \delta |\dot{y}| \dot{y} + 2 \rho A g y + \rho A B (\ddot{u}_{x2} + \ddot{u}_g) = 0, |y| < \frac{(L-B)}{2} \quad (3)$$

$M_s$  جرم طبقه‌ای از سازه که میراگر به آن متصل است

$M_c$ : جرم میراگر جرمی تنظیم شده

$K_s$ : سختی سازه که برای سیستم یک درجه آزادی برابر

است با  $K_s = \omega_s^2 M_s$

$K_c$ : سختی سیستم جرم دوم برابر است با

$$K_c = \omega_s^2 f^2 m_{TMD}, m_{TMD} = \mu M_c$$

$C_s$ : میرایی سازه که برای سیستم یک درجه آزادی برابر

همکاران در سال ۲۰۰۹ طراحی بهینه میراگرهای ستون مایع با مقاطع عرضی غیریکنواخت روی سازه یک درجه آزادی را تحت حرکت افقی بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که میراگر ستون مایع با سطح مقطع عرضی یکنواخت بهترین عملکرد را در کاهش پاسخ‌های سازه دارد [۵]. Chang و همکاران حرکت دینامیکی سیال را برای جابه‌جایی افقی میراگر ستون مایع تنظیم شده شبیه سازی کردند. مدل استفاده شده آنها، مدل آشفته  $k-\epsilon$  استاندارد غیردائمی وابسته به زمان بر اساس معادلات ناویه-استوکس، روش حجم آزاد سیال<sup>۱</sup> و تکنیک مش لغزان بوده و نتایج آن‌ها نشان می‌دهند که نرم افزار CFD، Fluent می‌تواند به طور چشم‌گیری سطح آزاد آب را درون ستون قائم میراگر ستونی مایع تنظیم شده پیش‌بینی کند و فرکانس میراگر را با فرکانس تحریک کالیبره کند [۶]. Banerji و Samanta در سال ۲۰۱۱ میراگر ترکیبی جرمی مایع را در کنترل ارتعاش لرزه‌ای سازه‌ها استفاده کردند. برای به دست آوردن بهترین حالت کارایی میراگر ترکیبی مایع، مقدار بهینه سختی فنر دوم مورد توجه قرار گرفت. نتایج کار نشان داد میراگر ترکیبی نسبت به سیستم تک میراگر مایع، بیشینه شتاب را بیشتر کم می‌کند و کارایی سیستم ترکیبی تحت زلزله‌های مختلف، متفاوت است [۷].

در این پژوهش، سیستم ترکیبی سری میراگر جرمی و ستون مایع تنظیم شده با نسبت‌های جرمی ۰/۰۰۵-۰/۰۳۵ و ۰/۰۱-۰/۰۳ و ۰/۰۲-۰/۰۲ پیشنهاد شده است. دو روش برای طراحی سیستم ترکیبی سری استفاده شده است. عملکرد سیستم‌های تک و ترکیبی سری تحت زلزله‌های نرتریج، طیس و لوما پرایتا با یکدیگر مقایسه شده‌اند و با ارائه روشی جدید، کارایی سیستم میراگر ترکیبی جرمی و ستون مایع افزایش پیدا کرده است.

است با  $C_s = 2\xi_s M_s \omega_s$

$C_c$ : میرایی سیستم جرم دوم برابر است با  $C_c = 2\xi_c M_c \omega_c$

$u_{x1}$ : جابه‌جایی سیستم جرم دوم تحت زلزله  $\ddot{u}_g$

$u_{x2}$ : جابه‌جایی طبقه سازه متصل به سیستم دوم تحت زلزله

$\ddot{u}_g$

$\omega_s$ : فرکانس طبیعی دایره‌ای سازه

$\omega_c$ : فرکانس طبیعی دایره‌ای سیستم جرم دوم (میراگر

جرمی تنظیم شده)

**F**: نیروی میراگر ستون مایع وارد شده بر سیستم جرم

ثانویه (میراگر جرمی تنظیم شده)

**A**: سطح مقطع عرضی لوله ستون مایع

**L**: طول کل ستون مایع

**B**: طول افقی لوله

$\alpha = B/L$  (معمولاً بین ۰/۶ تا ۰/۹)

$\gamma$ : تغییر تراز مایع در ستون مایع

$\dot{\gamma}$ : میرایی غیرخطی

$\delta$ : ضریب افت هد (نسبت ورودی روزنه به سطح مقطع

عرضی لوله)،  $[\delta = \frac{3/58\gamma}{(\frac{a}{g})}]$

$\alpha$ : شتاب کمترین زلزله،  $\gamma$ : نسبت جرمی میراگر ستون مایع

به سازه

**P**: چگالی مایع (در این تحقیق آب  $1000 \text{ kg/m}^3$ )

**g**: شتاب ثقل

نسبت جرمی میراگر ستون مایع تنظیم شده به جرم سازه.

برای طراحی میراگرهای ستون مایع ابتدا نسبت جرمی انتخاب می‌شود. سپس نسبت فرکانسی با استفاده از روابط ارائه شده در پژوهش‌های گذشته محاسبه می‌شود. با توجه به مود طراحی سازه و فرکانس مود مورد نظر، طول کل ستون مایع از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$f \cdot \omega_s = \sqrt{\frac{2g}{L}} \quad (4)$$

$f$ : نسبت فرکانسی میراگر ستون مایع تنظیم شده به سازه  
نظر به ویژگی‌های تحریک و محدودیت تعداد میراگر ستون مایع، سطح مقطع میراگر ستون مایع انتخاب می‌شود. با در نظر گرفتن  $\alpha$ ، نسبت طول ستون افقی به طول کل ستون مایع (در این پژوهش ۰/۸)، طول ستون افقی به دست می‌آید. نکته مهم در طراحی میراگر ستون مایع تنظیم شده، تنظیم دقیق فرکانس و ضریب افت هد است. هر چه ضریب افت هد بیشتر در نظر گرفته شود راندمان میراگر در کاهش پاسخ‌ها افزایش پیدا می‌کند. برای طراحی میراگرهای جرمی تنظیم شده، ابتدا نسبت جرمی انتخاب می‌شود. سپس مقادیر نسبت فرکانسی و میرایی با استفاده از روابط ارائه شده در پژوهش‌های گذشته تعیین شده سپس مقادیر سختی و میرایی میراگر جرمی تنظیم شده محاسبه می‌شود.

در روش دوم پاسخ‌های شتاب و تغییر مکان با در نظر گرفتن نسبت برای فرکانسی بهینه کاهش می‌یابد. برای مثال پاسخ‌های جذر میانگین مربع‌های شتاب در نسبت فرکانسی‌های مختلف محاسبه و مقایسه می‌شود. نسبت فرکانسی بهینه حالتی است که جذر میانگین مربع‌های شتاب کمترین مقدار خود را داشته باشد. در شکل ۲ نسبت فرکانسی بهینه شتاب ماکزیمم، مقدار ۳ به دست آمده است.

### ۳- طراحی میراگر ترکیبی جرمی و ستون

#### مایع تنظیم شده

دو روش برای طراحی سیستم ترکیبی سری در نظر گرفته شده است. در روش اول هر یک از میراگرها جداگانه براساس روابط میراگرهای تک طراحی شدند. دو نسبت جرمی  $\mu$  و  $\gamma$  تعریف می‌شود که به ترتیب عبارتند از نسبت جرمی میراگر جرمی تنظیم شده به جرم سازه و

طبقه  $i$  تا  $n$  (بالاترین طبقه است)

$\sigma_{\ddot{x}_{no}}$ : جذر میانگین مربع‌های پاسخ شتاب بالاترین طبقه بدون کنترل

$$J_2 = \frac{1}{n} \sum_i \left( \frac{\sigma_{\ddot{x}_i}}{\sigma_{\ddot{x}_{io}}} \right) \quad (6)$$

$\sigma_{\ddot{x}_i}$ : جذر میانگین مربع‌های پاسخ شتاب در طبقه  $i$ ام با کنترل  
 $\sigma_{\ddot{x}_{io}}$ : جذر میانگین مربع‌های پاسخ شتاب در طبقه  $i$ ام بدون کنترل

$$J_3 = \frac{\sigma_{\ddot{x}_n}}{\sigma_{\ddot{x}_{no}}} \quad (7)$$

$\sigma_{\ddot{x}_n}$ : جذر میانگین مربع‌های پاسخ تغییرمکان بالاترین طبقات با کنترل  
 $\sigma_{\ddot{x}_{no}}$ : جذر میانگین مربع‌های پاسخ تغییرمکان بالاترین طبقات بدون کنترل

$$J_4 = \frac{1}{n} \sum_i \left( \frac{\sigma_{\ddot{x}_i}}{\sigma_{\ddot{x}_{io}}} \right) \quad (8)$$

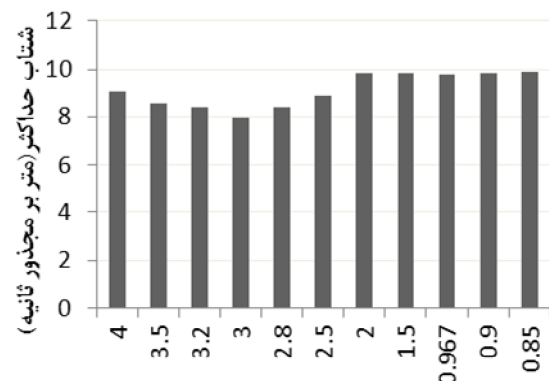
$\sigma_{\ddot{x}_i}$ : جذر میانگین مربع‌های پاسخ تغییرمکان در طبقه  $i$ ام با کنترل  
 $\sigma_{\ddot{x}_{io}}$ : جذر میانگین مربع‌های پاسخ تغییرمکان در طبقه  $i$ ام بدون کنترل  
 چهار شاخص بعدی برحسب پاسخ‌های پیشنهاد شده است:

$$J_7 = \frac{\max(\ddot{x}_{pi}, \dots, \ddot{x}_{pn})}{\ddot{x}_{pn}} \quad (9)$$

$(\ddot{x}_{pi}, \dots, \ddot{x}_{pn})$ : شتاب بیشترین طبقه  $i$  تا  $n$  با کنترل  
 $\ddot{x}_{pno}$ : شتاب بیشترین طبقه  $n$  بدون کنترل

$$J_8 = \frac{1}{n} \sum_i \left( \frac{\ddot{x}_{pi}}{\ddot{x}_{pio}} \right) \quad (10)$$

$\ddot{x}_{pi}$ : شتاب بیشترین طبقه  $i$ ام با کنترل  
 $\ddot{x}_{pio}$ : شتاب بیشترین طبقه  $i$ ام بدون کنترل



نسبت فرکانسی جرم ثانویه در میراگر ترکیبی

شکل (۲) مقایسه شتاب پیشنهاد شده در سازه ۲۰ طبقه مجهز به سیستم ترکیبی سری با نسبت جرمی ۰/۰۳-۰/۰۱ تحت زلزله نرتریج

این روش بر اساس هدف طراحی از سازه است که برای کارایی میراگرها در زلزله‌ها پاسخ‌های پیشنهاد شده و برای بررسی پدیده خستگی از جذر میانگین مربع‌های پاسخ‌ها استفاده می‌شود.

#### ۴- شاخص‌های عملکرد

از ۱۲ شاخص عملکرد که با علامت  $J_1 - J_{12}$  نشان داده می‌شوند، ۸ مورد به وسیله‌ی یانگ پیشنهاد شده است که برای ارزیابی سیستم‌های کنترل استفاده می‌شوند. برای هر شاخص، کوچکترین عدد نشان دهنده بیشترین کارایی عملکرد کنترل پاسخ است. شش شاخص اندازه‌گیری عملکرد اول ( $J_1 - J_6$ )، جذر میانگین مربع‌های پاسخ‌ها (RMS) از طبقات انتخاب شده سازه و محرک است. شش شاخص بعدی ( $J_7 - J_{12}$ ) پاسخ‌های بیشترین طبقات انتخاب شده سازه و محرک است. چهار شاخص اول برحسب پاسخ‌های جذر میانگین مربع‌ها (RMS) به صورت زیر است:

$$J_1 = \frac{\max(\sigma_{\ddot{x}_1}, \dots, \sigma_{\ddot{x}_n})}{\sigma_{\ddot{x}_{no}}} \quad (5)$$

$(\sigma_{\ddot{x}_1}, \dots, \sigma_{\ddot{x}_n})$ : بیشترین جذر میانگین مربع‌های پاسخ شتاب

فرکانس مود اول ۴/۱۹ رادیان بر ثانیه است. جرم مؤثر مود اول هر دو سازه ۳۳۲۰ تن است. ویژگی‌های میراگرهای جرمی و ستون مایع تنظیم شده بر اساس مود اول سازه ۲۰ طبقه با دوره ۱/۵ ثانیه در جدول (۱) آمده است.

با در نظر گرفتن سطح مقطع عرضی ۰/۰۳ متر مربع، تعداد میراگرهای ستون مایع برای سیستم‌های فوق به ترتیب ۴۵۳، ۹۰۷ و ۱۸۱۴ است و با افزایش سطح مقطع تعداد میراگر کاهش می‌یابد. البته انتخاب سطح مقطع میراگر ستون مایع به بیشترین تغییر مکان مایع در میراگر بستگی دارد به عبارت دیگر باید یک شرط در طراحی در نظر گرفته شود که مایع از ظرف خارج نشود (مایع ستون قائم وارد ستون افقی نمی‌شود). مقادیر نسبت فرکانسی بهینه بر اساس پاسخ‌های سازه ۲۰ طبقه با پریود ۱/۵ ثانیه، در جدول (۲) تحت زلزله نرتریج ارائه شده است.

## ۶- مدلسازی سیستم ترکیبی سری

برای مدلسازی با دقت بیشتر، صحت‌سنجی مدل‌های انجام شده میراگر جرمی و ستون مایع تنظیم شده مقالات سادک انجام شد و نتایج قابل قبولی به دست آمد. سازه‌ها در بلوک مجزا در سیمولینک مطلب [۱۰] به صورت ماتریسی مدل شده و هر میراگر در بلوک جداگانه مدلسازی می‌شود (اشکال ۳ تا ۵).

$$J_0 = \frac{X_{pn}}{X_{pno}} \quad (11)$$

$X_{pn}$ : تغییر مکان بیشترین طبقه  $n$  با کنترل  
 $X_{pno}$ : تغییر مکان بیشترین طبقه  $n$  بدون کنترل

$$J_{10} = \frac{1}{n} \sum_i \left( \frac{X_{pi}}{X_{pio}} \right) \quad (12)$$

$X_{pi}$ : تغییر مکان بیشترین طبقه  $i$  با کنترل  
 $X_{pio}$ : تغییر مکان بیشترین طبقه  $i$  بدون کنترل  
 $n$ : تعداد طبقات [۹].

هر چه مقادیر شاخص‌های عملکرد کمتر باشد بازده سیستم‌های کنترل در کاهش پاسخ‌های شتاب و تغییر مکان بیشتر است.

## ۵- مقادیر پارامترهای میراگر ترکیبی

طراحی میراگرهای جرمی و ستون مایع تنظیم شده بر اساس مود اول سازه‌ها انجام می‌شود و یکی از مهم‌ترین پارامترها تنظیم دقیق فرکانس متناسب با سازه و زلزله است. دو سازه برشی ۲۰ طبقه با مشخصات جرم هر طبقه ۲۰۰ تن و سختی سازه اول ۲۲۶/۶ مگا نیوتن بر متر (پریود ۲/۴۴ ثانیه)، فرکانس مود اول سازه ۲/۵۷ رادیان بر ثانیه ولی سختی سازه دوم ۶۰۰ مگا نیوتن بر متر (پریود ۱/۵ ثانیه) و

جدول (۱) ویژگی‌های پارامترهای سیستم‌های ترکیبی سری

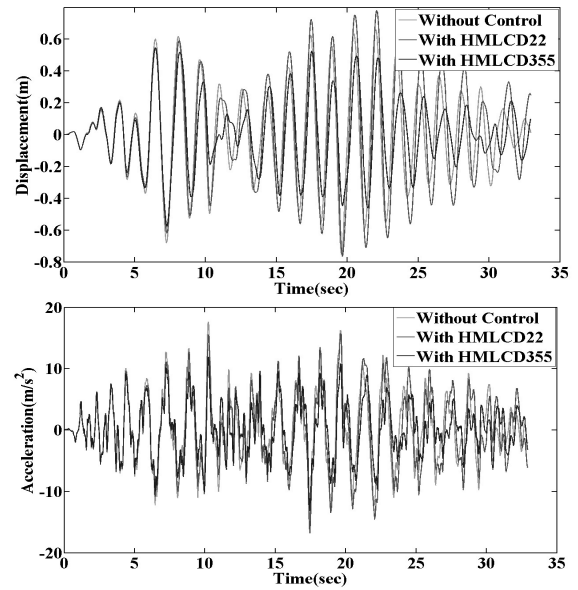
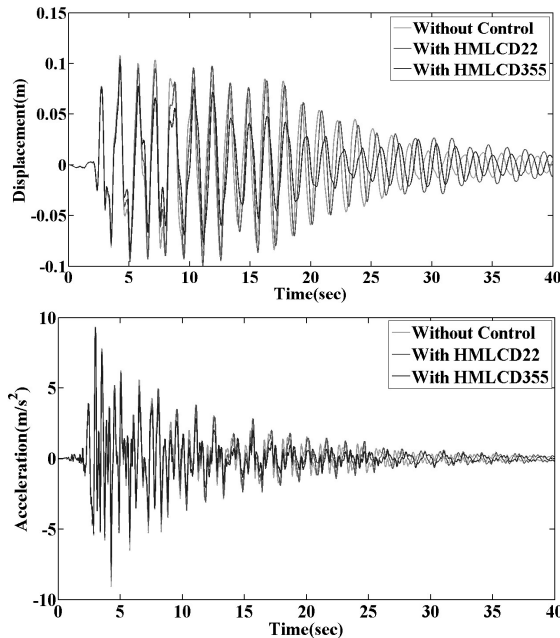
سازه (۲۰ طبقه)	$\omega$	$f$	$\xi$	$M_{TMD}(kgf)$	$K_{TMD}(kN/m)$	$C_{TMD}$	$L(m)$	$\delta$
HMLCD(0/035-0/005)	۴/۱۹	۰/۹۹۳	۰/۲	۱۱۶۲۰۰	۲۰۱۱۵۵۸/۵	۱۹۴۷۵۱	۱/۲۲	۰/۲۸۶۴
HMLCD(0/03-0/01)	۴/۱۹	۰/۹۶۷	۰/۱۹	۹۹۶۰۰	۱۶۳۵۰۸۵	۱۵۸۵۸۳/۱	۱/۲۲	۰/۲۸۶۴
HMLCD(0/02-0/02)	۴/۱۹	۰/۹۷۷	۰/۱۵۹۶	۶۶۴۰۰	۱۱۱۴۰۸۶	۸۸۸۰۶	۱/۲۲	۰/۲۸۶۴

جدول (۲) نسبت فرکانسی بهینه سیستم‌های ترکیبی سری تحت زلزله نرتریج

میراگر ترکیبی	RMS-Displacement	RMS-Acceleration	x-max	a-max
HMLCD(0.02-0.02)	۰/۰۵	۳/۵	۱	۴/۲
HMLCD(0.03-0.01)	۰/۸۵	۰/۹۶۷	۰/۹۶۷	۳
HMLCD(0.035-0.005)	۰/۹	۰/۹۹۳	۱/۱	۲/۹



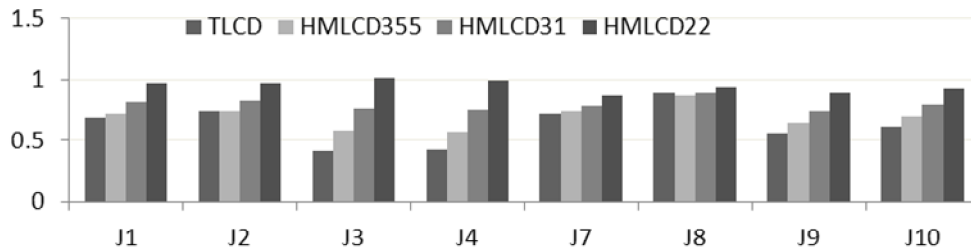
۰/۰۳۵-۰/۰۳ و ۰/۰۱-۰/۰۳ در کاهش تغییرمکان ماکزیمم طبقه بام و طبقات سازه عملکرد بهتری داشته‌اند و تغییرمکان طبقه بام را ۲۶ درصد کاهش می‌دهد.



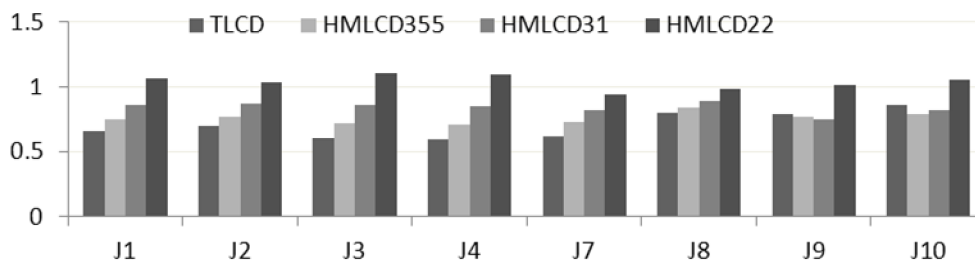
شکل (۷) نمودار تاریخچه زمانی تغییرمکان و شتاب بام سازه ۲۰ طبقه دوم با میراگر ترکیبی سری با نسبت‌های جرمی ۰/۰۰۵-۰/۰۳۵ و ۰/۰۲-۰/۰۲ تحت زلزله طبس

و مشابه نتایج تحلیل تاریخچه زمانی با افزایش نسبت جرمی میراگر ستون مایع در سیستم میراگر ترکیبی سری، بازده میراگر در کاهش پاسخ‌ها کاهش می‌یابد. تحت زلزله طبس، میراگرهای ترکیبی سری با نسبت‌های جرمی

شکل (۸) نمودار تاریخچه زمانی تغییرمکان و شتاب بام سازه ۲۰ طبقه دوم با میراگر ترکیبی سری با نسبت جرمی ۰/۰۰۵-۰/۰۳۵ و ۰/۰۲-۰/۰۲ تحت زلزله لوما پرایتا

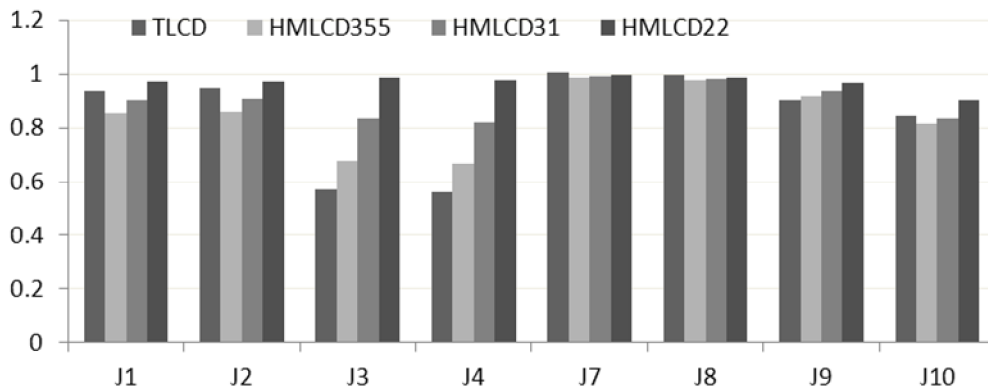


شکل (۹) عملکرد سیستم‌های تک و ترکیبی سری سازه ۲۰ طبقه اول تحت زلزله نرتریج



شکل (۱۰) عملکرد سیستم‌های تک و ترکیبی سری سازه ۲۰ طبقه اول تحت زلزله طبس





شکل (۱۱) عملکرد سیستم‌های تک و ترکیبی سری سازه ۲۰ طبقه اول تحت زلزله لوما پرایتا

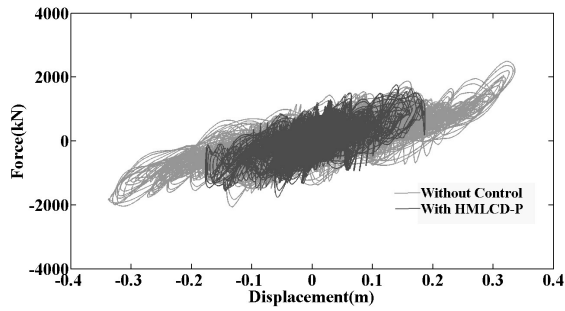
تحت زلزله لوما پرایتا، میراگر ترکیبی سری با نسبت‌های جرمی  $۰/۰۰۵-۰/۰۳۵$  در نسبت فرکانسی  $۲/۹$  کمترین مقدار را دارد. بنابراین، همان‌گونه که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود شتاب طبقات سازه ۲۰ طبقه تحت زلزله نرتریج نسبت به نسبت فرکانسی به دست آمده از روابط گذشته، کاهش بیشتری داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که در نسبت جرمی‌های مختلف مقادیر نسبت فرکانسی بهینه برای کاهش شتاب بیشترین هم متفاوت است.

با بررسی آثار میراگر ترکیبی با نسبت‌های جرمی مختلف بر روی دو سازه با دوره تناوب  $۱/۵$  و  $۲/۴۴$  ثانیه مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت جرمی میراگر جرمی در میراگر ترکیبی سری، عملکرد میراگر ترکیبی سری در کاهش پاسخ‌های سازه افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سختی سازه (کاهش دوره تناوب) عملکرد میراگر ترکیبی سری در کاهش پاسخ‌های شتاب افزایش و در کاهش پاسخ‌های تغییر مکان بیشترین کاهش می‌یابد. برای مثال شاخص جذر میانگین مربع‌های شتاب طبقه بام در سازه ۲۰ طبقه با دوره تناوب  $۱/۵$  ثانیه  $۰/۷۱$  است در حالی که در سازه ۲۰ طبقه با دوره تناوب  $۲/۴۴$ ، شاخص جذر میانگین مربع‌ها شتاب طبقه بام  $۰/۷۹$  است که نشان می‌دهد سیستم ترکیبی سری عملکرد بهتری در کاهش پاسخ‌های سازه با دوره تناوب  $۱/۵$  داشته است.

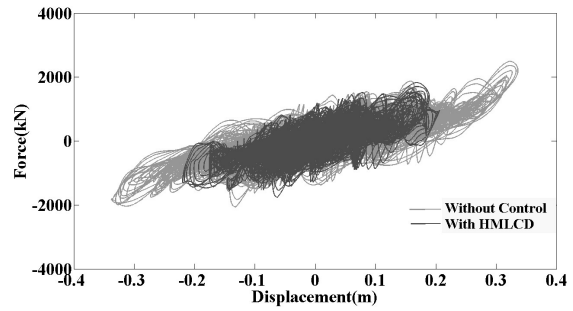
تحت زلزله لوما پرایتا، میراگر ترکیبی سری با نسبت‌های جرمی  $۰/۰۰۵-۰/۰۳۵$  و  $۰/۰۱-۰/۰۳$  عملکرد بهتری در کاهش پاسخ‌های شتاب داشته‌اند و میراگر ستون مایع تنظیم شده عملکرد بهتری در کاهش پاسخ‌های جذر میانگین مربع‌های تغییر مکان داشته است و سیستم میراگر ترکیبی با نسبت جرمی  $۰/۰۳۵-۰/۰۰۵$  بهترین عملکرد را در کاهش پاسخ‌های جذر میانگین مربع‌های تغییر مکان طبقات با کاهش  $۳۴/۱$  داشته است.

منحنی‌های هیستریزس سیستم ترکیبی سری جرمی ستون مایع تنظیم شده با نسبت جرمی‌های مختلف تحت ۳ زلزله نرتریج، طبس و لوما پرایتا در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت جرمی میراگر جرمی، کارایی میراگر ترکیبی سری در کاهش پاسخ‌های سازه افزایش می‌یابد. همچنین کارایی سیستم ترکیبی سری تحت زلزله‌های مختلف متفاوت است. به نظر می‌رسد ویژگی‌های زلزله از جمله محتوای فرکانسی مهمترین دلیل در کارایی میراگر ترکیبی باشد.

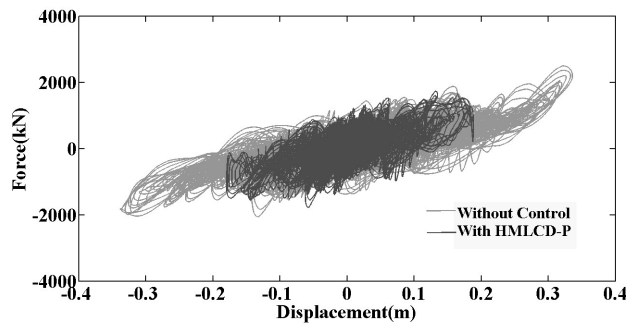
کارایی سیستم ترکیبی سری در سازه‌های ۲۰ طبقه با دوره‌های تناوب  $۱/۵$  و  $۲/۴۴$  ثانیه در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. نمودارهای هیستریزس سازه‌ها با دوره‌های تناوب مختلف در حالات با و بدون کنترل متفاوت است. شتاب بیشینه میراگر ترکیبی سری با نسبت جرمی



ب) نسبت جرمی ۰/۰۱-۰/۰۳

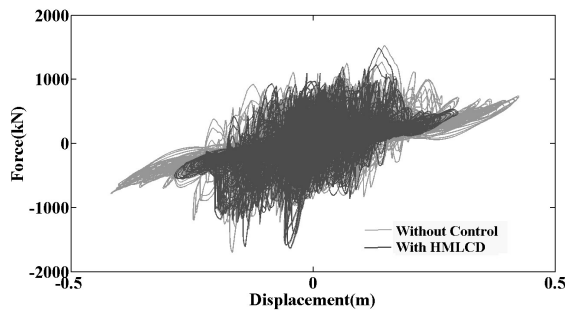


الف) نسبت جرمی ۰/۰۰۵-۰/۰۳۵

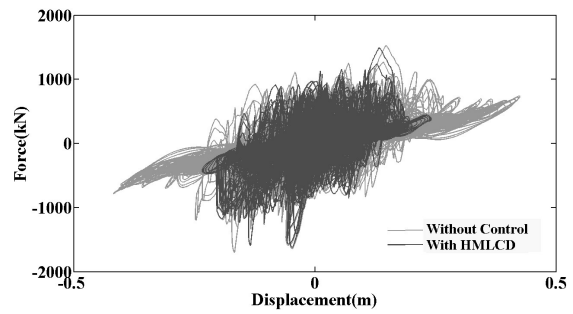


ج) نسبت جرمی ۰/۰۲-۰/۰۲

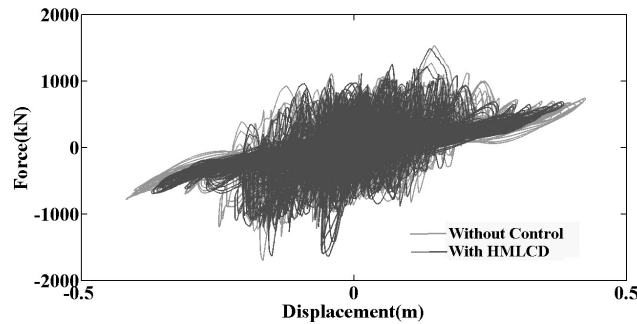
شکل (۱۲) نمودارهای هیستریزس سازه ۲۰ طبقه با دوره تناوب ۱/۵ ثانیه تحت زلزله نرتریج ۰/۴g



ب) نسبت جرمی ۰/۰۱-۰/۰۳

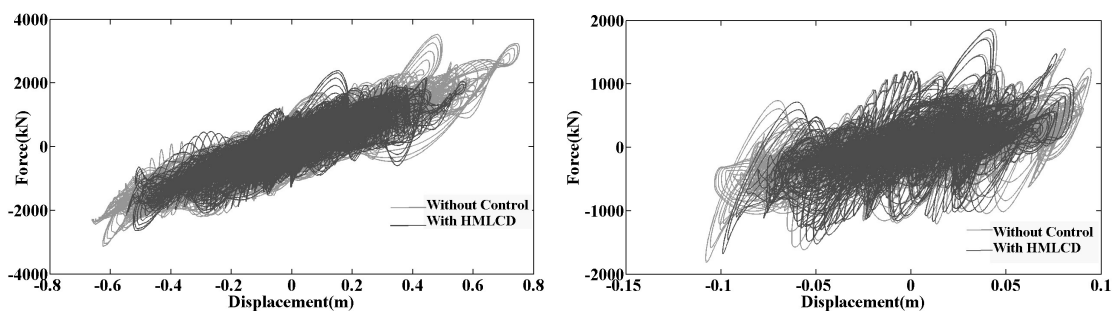


الف) نسبت جرمی ۰/۰۰۵-۰/۰۳۵

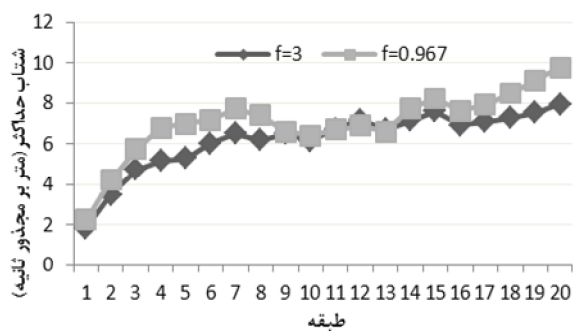


ج) نسبت جرمی ۰/۰۲-۰/۰۲

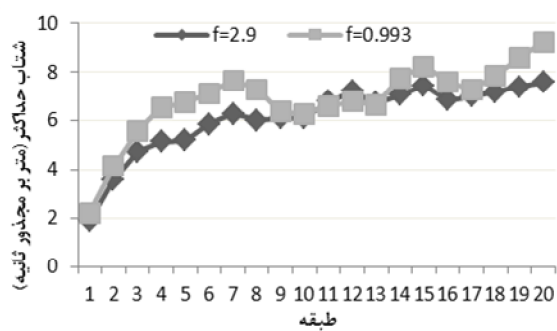
شکل (۱۳) نمودارهای هیستریزس سازه ۲۰ طبقه با پرورد ۲/۴۴ ثانیه تحت زلزله نرتریج ۰/۴g



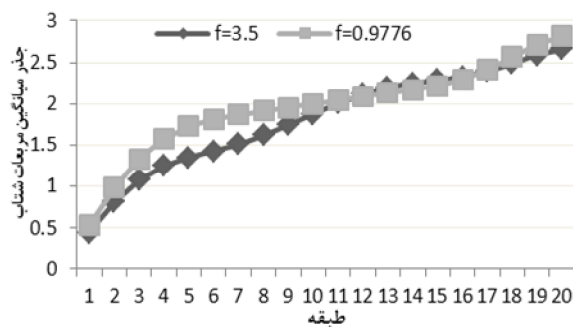
شکل (۱۴) نمودارهای هیستریزیس سازه ۲۰ طبقه با دوره تناوب ۱/۵ ثانیه تحت زلزله های طیس و لوما پرایتا



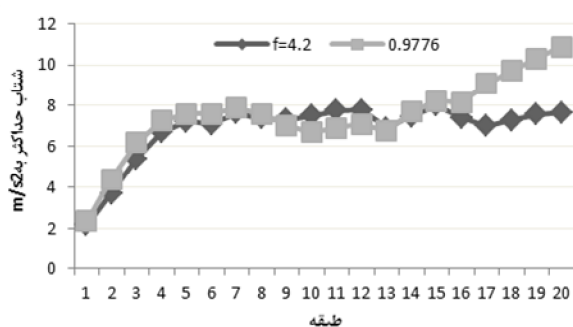
ب- نسبت جرمی ۰/۰۳-۰/۰۱



الف- نسبت جرمی ۰/۰۳۵-۰/۰۰۵

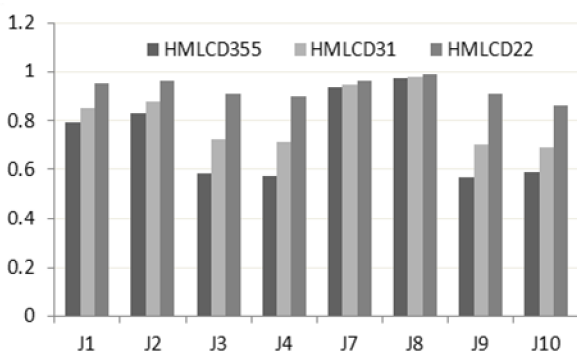
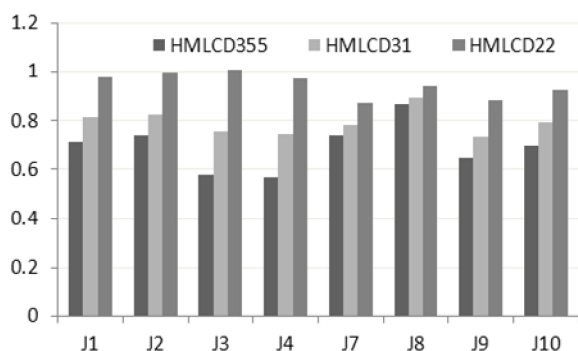


د- نسبت جرمی ۰/۰۲-۰/۰۲

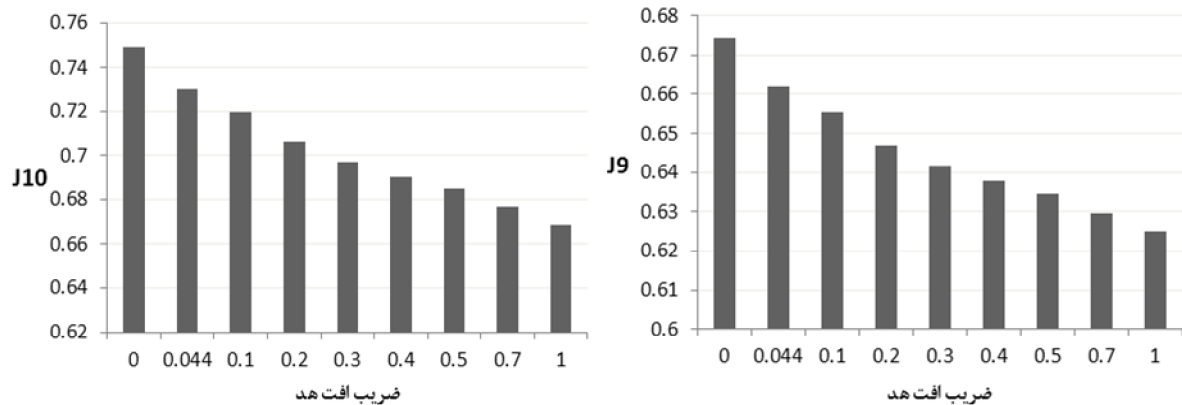


ج- نسبت جرمی ۰/۰۲-۰/۰۲

شکل (۱۵) مقایسه شتاب بیشترین و جذر میانگین مربع‌های شتاب سازه مجهز به سیستم ترکیبی سری تحت زلزله نرتیج



شکل (۱۶) عملکرد میراگرهای ترکیبی سری با نسبت‌های جرمی مختلف در سازه‌های ۲۰ طبقه اول و دوم



شکل (۱۷) مقایسه شاخص های تغییرمکان ماکزیمم سازه مجهز به میراگر ترکیبی سری با نسبت جرمی ۰/۰۳۵-۰/۰۰۵ با افزایش ضریب افت هد

سازه‌های ۲۰ طبقه تحت زلزله‌های نرتریج، طیس و لوما پرایتا انجام و نتیجه شد که عملکرد سیستم میراگر ترکیبی جرمی ستون مایع سری تحت زلزله های مختلف، متفاوت است و با افزایش نسبت جرمی جرم ثانویه در میراگر جرمی، عملکرد آن افزایش می‌یابد و میراگر ترکیبی سری با نسبت جرمی ۰/۰۳۵-۰/۰۰۵ بهترین عملکرد را در کاهش پاسخ‌ها در سازه‌ها داشته است. با انتخاب نسبت فرکانسی مناسب برای کاهش پاسخ‌های سازه می‌توان عملکرد سیستم‌های ترکیبی سری را افزایش داد. همچنین نسبت فرکانسی میراگرهای ترکیبی سری با نسبت‌های جرمی مختلف، متفاوت است. برای کاهش شتاب بیشترین سازه ۲۰ طبقه، نسبت فرکانسی بهینه میراگر ترکیبی سری با نسبت جرمی ۰/۰۳۵-۰/۰۰۵ تا ۰/۰۰۵ و با نسبت جرمی ۰/۰۳-۰/۰۱ تا ۰/۰۱، ۳ و با نسبت جرمی ۰/۰۲-۰/۰۲ تا ۰/۰۲ است که در هر ۳ حالت کارایی میراگر ترکیبی در کاهش شتاب بیشترین طبقات فوقانی و پایینی سازه ۲۰ طبقه افزایش یافته است. با افزایش سختی در دو سازه با جرم طبقات یکسان، عملکرد سیستم ترکیبی سری در کاهش پاسخ‌های شتاب افزایش و در کاهش پاسخ‌های تغییرمکان کاهش می‌یابد. با افزایش ضریب افت هد، عملکرد میراگر ترکیبی سری در کاهش تغییرمکان بیشترین افزایش می‌یابد.

همچنین سیستم ترکیبی سری با نسبت جرمی ۰/۰۳۵-۰/۰۰۵ بهترین عملکرد را در کاهش پاسخ‌های تغییرمکان سازه ۲۰ طبقه با دوره تناوب ۱/۵ ثانیه داشته است به گونه‌ای که شاخص‌های جذر میانگین مربعات تغییرمکان طبقات ۰/۵۶ است. در سازه با دوره تناوب ۲/۴۴ ثانیه، میراگر ترکیبی سری بهترین عملکرد را در کاهش تغییرمکان طبقه بام داشته است که شاخص آن ۰/۵۶ است. همان گونه که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود در میراگر ترکیبی سری با انتخاب نسبت فرکانسی بهینه جذر میانگین مربع‌های شتاب طبقات پایین و بالایی کاهش بیشتری می‌یابد. در ۲ نسبت جرمی دیگر نتایج مشابه روابط سادک است.

پس با افزایش ضریب افت هد، کارایی میراگر ترکیبی سری در کاهش تغییرمکان بیشترین طبقات افزایش می‌یابد.

## ۸- نتیجه گیری

بر اساس نتایج به دست آمده در این مقاله، سیستم ترکیبی سری میراگر جرمی ستون مایع تنظیم شده در کاهش پاسخ‌های سازه مؤثرند. مهم‌ترین پارامترها در طراحی میراگرهای جرمی و ستون مایع، تنظیم دقیق فرکانس متناسب با سازه و زلزله است. کارایی میراگر با تنظیم نامناسب یا غیر بهینه کاهش می‌یابد. تحلیل تاریخچه زمانی

## ۹- مراجع

- [6] Chang, C.H., Wu, J.C., Cheng, C.M., Lin, Y.Y., "Computational fluid dynamics simulation for horizontal movement tuned liquid column damper", The 5<sup>th</sup> International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), 2010, Chapel Hill, North Carolina, USA.
- [7] Banerji, P., and Samanta, A., "Earthquake Vibration Control of Structure Using Hybrid Mass Liquid Damper", Engineering Structure, 2011, pp.1291-1301.
- [8] Sadek, F., Mohraz, B., LEW H. S., "Single-And Multiple-Tuned Liquid Column Dampers For Seismic Applications", Earthquake Engineering And Structural Dynamics, 1998, pp.439-463.
- [9] Yang, J., Agrawal, A., Samali, B., Wu, J., "A Benchmark Problem for Response Control of Wind-Excited Tall Buildings", Proceedings of Second World Conference on Structural Control, Vol. 2, 1998, pp.229-231.
- [10] MATLAB, User Guide, Curve Fitting Toolbox, MathWorks Inc., Version 7.6.0, 2011.
- [11] PEER Strong ground motion database. <http://peer.berkeley.edu/smcat> [Accessed on April2012].
- [1] اخوت هائیه، امیرخانی آرین، زرکش افسانه، پورجعفر محمدرضا، "معرفی روش‌های نوین در کنترل ارتعاشات ساختمان‌های بلند"، فصلنامه معماری و ساختمان، شماره ۱۶، ۱۳۸۷، صفحه ۱۳۶-۱۴۱.
- [2] Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A. W., Chung, R. M., "A Method of Estimating The Parameters of Tuned Mass Dampers For Seismic Applications", Earthquake Engineering And Structural Dynamics, Vol. 26, 1997, pp.617-635.
- [3] Sakai, F., Takaeda, S., Lew H. S., "Tuned Liquid Column Damper-New Type Device For Suppression of Building Vibration", Conference on High Rise Build, Nanjing, China, 1989, pp.926-931.
- [4] Haroun, M.A., Pires, J.A., Won, A.Y.J., "Effectiveness of Hybrid Liquid Column Dampers for Suppressing Structural Vibrations", Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference, Vol. 2460, 1995, p.525-531.
- [5] Wu, J.C., Chang, C.H., Lin, Y.Y., "Optimal Design For Non-Uniform Tuned Liquid Column Dampers in Horizontal Motion", Journal of Sound Vibration, 2009, pp.104-122.

## Seismic performance assessment for hybrid system of tuned mass & liquid column damper in series and a method to increase efficiency

S.M. Zahrai<sup>1</sup>, R. Biglarian<sup>2</sup>

1- Associate Professor, Center of Excellence for Engineering and Management of Civil Infrastructures, School of Civil Engineering, the University of Tehran

2- Structural Engineering graduate, Tehran Central branch of Azad University

mzahrai@ut.ac.ir

### Abstract:

In recent years, development of effective devices for seismic energy dissipation in structures has become more important to keep response of structure in elastic range. Dampers are used in structures to reduce response and effect of seismic forces. Also, using secondary mass technology can help seismic energy dissipation. Among these systems one can mention tuned mass damper and tuned liquid column damper, working base on secondary inertia in structures.

In this paper, hybrid system of tuned mass & liquid column dampers in series was considered with mass ratios 0.035-0.005, 0.03-0.01 and 0.02-0.02. Time history analysis using the Northridge, Tabas and Loma Prieta earthquakes for 20 story structures were modeled in Simulink Matlab software considering shearing structure and damper modeling in every blocks separately. Effect of damper to structure is determined as forces applying on corresponding story. Performance indices using software outputs such as root mean square and Maximum of displacement and acceleration of stories were calculated. Performance of single and hybrid systems has been compared due to different earthquakes. Also effect of hybrid systems in series was studied by increasing head loss coefficient.

Results show that performance of hybrid systems is dependent on earthquake characteristics that improves with increasing secondary mass ratio. For example under the Northridge earthquake, hybrid system in series tuned mass & liquid column damper with mass ratios 0.035-0.005, 0.03-0.01 and 0.02-0.02 decrease root mean square of displacement of stories 45, 27 and 2 percent respectively and also by selecting optimum frequency ratio based on responses of structure. For example maximum acceleration of hybrid system of tuned mass & liquid column damper in series with mass ratio 0.035-0.005 is optimum frequency ratio in 2.9 and also by selecting this frequency ratio decrease maximum acceleration of up and down stories in 20 story structure. By comparing effects of hybrid system Tuned Mass & Liquid Column Damper in series with different mass ratios on two structures with periods of 1.5 and 2.44 second are considering where by increasing stiffness of structure, performance of hybrid system was improved leading to decrease of acceleration responses and reduction of displacement responses. For example, J1 in 20 story structure with period 1.5 second is 0.71 whereas in other structure is 0.79 that show hybrid system has better

performance in structure with period 1.5 second. Hybrid system in series damper with mass ratio 0.035-0.005 have best performance to reduce displacement stories of 20 story structure with period 1.5 second as  $J_3=0.56$  means decrease 44%. Also in other structure, hybrid system with mass ratio 0.035-0.005 has best performance to reduce displacement at top floor with  $J_4=0.56$ . Also performance of hybrid system to reduce maximum displacement of stories was improved by increasing head loss coefficient in tuned liquid column damper.

**Keywords:** Hybrid system in series Tuned Mass & Liquid Column Damper, Passive Control, Optimum Frequency Ratio.