

# بررسی آزمایشگاهی عملکرد میراگر جدید هیبرید اینرسی دورانی اصطکاکی و مقایسه با میراگر اینرسی دورانی ویسکوز

رضا عزتی<sup>۱\*</sup>، حبیب سعید منیر<sup>۲</sup>، غلامرضا قدرتی امیری<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۲- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۳- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران

\* آرومیه، صندوق پستی ۵۷۵۷۱۵۱۸۱۸، reza\_ezzati2016@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۰۶)

## چکیده

در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها به منظور استهلاک انرژی اعمالی به سازه هنگام وقوع زلزله راهکارهای مختلفی ارائه شده است که میراگرها نیز در این دسته‌بندی قرار می‌گیرند. میراگرها به سبب طراحی نسبتاً ساده و نیز اقتصادی‌تر بودن نسبت به سایر روش‌های استهلاک انرژی، بیشتر مورد توجه محقق قرار گرفته‌اند. در این تحقیق، به منظور بهبود کارایی میراگر اینرسی دورانی، مکانیزم‌های اصطکاکی و ویسکوز به این نوع میراگر افزوده می‌شود. نمونه آزمایشگاهی میراگر اینرسی دورانی اصطکاکی در آزمایشگاه زلزله دانشگاه ارومیه ساخته شده و در یک قاب ساده مورد مطالعه قرار گرفته است، سپس سازه ۸ طبقه‌ای تحت زلزله‌های کوبه و طیس به منظور بررسی اثرات میراگر ترکیبی ساخته شده در مقایسه با میراگر اینرسی دورانی ویسکوز، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. میراگرهای مورد نظر را می‌توان همراه انواع مختلفی از بادبندها از جمله چورن و قطری در سازه تعبیه نمود. در مدل مورد مطالعه، ابتدا سازه ۸ طبقه متقارن را در نرم‌افزار SAP 2000 مدل شده، سپس مقاطع حاصله به منظور بررسی اثرات میراگرهای مختلف در نرم‌افزار ABAQUS 2016 مدل می‌گردد. نتایج بررسی آزمایشگاهی، نشان از بهبود رفتار میراگر اینرسی دورانی اصطکاکی نسبت به سایر میراگرهای اصطکاکی و از بین رفتن ترمزهای ناگهانی آن‌ها دارد. همچنین پاسخ‌های دینامیکی سازه، کاهش جابه‌جایی حداکثر نظیر طبقه بام و نیز برش پایه سازه را نشان می‌دهد. نتایج تحلیلی نشانگر آن است که میراگرهای اینرسی دورانی ویسکوز نسبت به میراگرهای اینرسی دورانی اصطکاکی سریع‌تر عمل کرده و اقدام به استهلاک انرژی وارده به سازه می‌نماید. اما در نهایت میراگرهای دورانی اینرسی اصطکاکی بهتر از نمونه مشابه ویسکوز عمل خواهد کرد.

## واژگان کلیدی

طراحی لرزه‌ای، میراگر هیبرید اینرسی-دورانی، میرایی اصطکاکی، میرایی ویسکوز

## Experimental Studies of New Hybrid Inertia Rotational Friction Damper and the Compare of It's Performance with Inertia Rotational Viscous Damper

R. Ezzati, H.S. Monir, Gh.R. Amiri

### Abstract

In the Seismic design of Structures, in order to energy damping applied to Structure, when an earthquake occurs, various solutions have been proposed that dampers are also in this category. Due to the relatively simple design and also more economical than other methods of energy dissipations, dampers have been more attention of researchers. In this study, in order to performance improvement of rotational inertia damper, friction and viscous mechanisms added to this type of damper. The experimental sample of rotational friction damper was made in the Urmia university earthquake laboratory and studied in a simple frame. The 8-story structure under Kobe and Tabas will be analyzed to study the effects of made hybrid damper compared with the rotational inertia damper. These intended dampers can be used with different type of braces that embedded in the structure such as Chevron and diameter. At the first in the model studied the 8-story symmetrical structure are modeled in Sap2000. Subsequently the resulting section is modeled in Abaqus2016 to study the effects of different dampers. Experimental laboratory result, is significantly improved Rotational inertia friction damper compared to other friction damper and the loss of their sudden brakes. Also the dynamic responses of structure indicate the reduction of maximum roof displacement and also the base shear of structure. Analytical results indicate that Rotational inertia viscous damper act quickly compared with Rotational inertia friction damper and dissipate the energy applied to structure. But finally Rotational inertia friction damper will behavior better than similar viscous damper.

### Keywords

Seismic design, Inertia-Rotational Damper, Friction damping, Viscous damping

نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد / ۳۳

تحت تحریک زلزله، سازه‌ها متحمل خرابی‌های زیادی می‌گردند و حتی ممکن است تا مرز فروریزش پیش بروند. به منظور تأمین پاسخ لرزه‌ای مناسب سازه، سه روش شناخته شده و مؤثر وجود دارد که عبارتند از: جداسازی لرزه‌ای، اتلاف انرژی در مفاصل پلاستیک و استفاده از وسایل کنترلی در سازه.

در میان این روش‌ها، روش جداسازی لرزه‌ای یک روش مناسب اما پرهزینه و پیچیده می‌باشد اساس کار این روش تغییر دادن پریود طبیعی سازه می‌باشد که باعث جداسازی سازه از تحریک زمین گردیده و در نتیجه منجر به کاهش نیروی جانبی که سازه باید تحمل کند می‌شود. در سازه‌های معمولی که تحت بارهای تصادفی و غیرقابل پیش‌بینی نظیر زلزله قرار می‌گیرند مفاصل پلاستیک وظیفه جذب انرژی ورودی را بر عهده دارند. این مفاصل در نزدیکی اتصال تیر به ستون تعبیه شده و متحمل تغییر شکل‌های غیرالاستیک زیادی شده و از این طریق انرژی زلزله را جذب می‌نمایند.

اما در سال‌های اخیر ایده استفاده از وسایل جاذب انرژی مکانیکی در سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. این وسایل جاذب انرژی، انرژی زلزله را جذب نموده و باعث کاهش اثرات منفی آن روی اعضا بحرانی سازه که نیازمند عملکرد آنها پس از زلزله هستیم می‌گردد. مزیت این دسته از مستهلک‌کننده‌ها در این است که، بعد از وقوع زلزله می‌توان تنها این وسایل کنترلی را که در باربری ثقیلی سازه مؤثر نیستند را به راحتی و بدون ایجاد خلل در باربری سازه تعمیر و یا تعویض نمود [۱].

مستهلک‌کننده‌های انرژی را می‌توان به سه دسته فعال، نیمه فعال و غیر فعال تقسیم‌بندی کرد. سیستم‌های غیر فعال نیز خود عموماً به دو دسته تقسیم بندی می‌شوند:

۱- مستهلک‌کننده‌های وابسته به سرعت حرکت همانند میراگرهای ویسکوز

۲- مستهلک‌کننده‌های وابسته به تغییر مکان مانند میراگرهای اصطکاکی و فلزی (FEMA 273, 1997) [۲].

میراگر مورد بحث در این مقاله از نوع غیر فعال بوده و در حالت ترکیبی با خاصیت ویسکوز از نوع وابسته به سرعت و در حالت اصطکاکی از نوع میراگرهای وابسته به تغییر مکان خواهد بود.

در سال ۲۰۱۴ Enomoto و همکارانش [۳] در بررسی‌های خود میراگر هیبرید اینرسی دورانی ویسکوز و اصطکاکی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با استفاده از تحلیل تاریخیچه زمانی

جابه‌جایی، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند که نتیجه آن بهبود عملکرد میراگر هیبرید، نسبت به میراگرهای ویسکوز و اصطکاکی و همچنین اینرسی دورانی به صورت مجزا بوده است. همچنین بیان داشتند که میراگر هیبرید به خوبی در حرکات لرزه‌ای در پریودهای طولانی و کوتاه عمل خواهد کرد.

Soong و Dragush [۴] به منظور ساخت ساختمان‌های مقاوم در برابر نیروهای زلزله، یکی از روش‌های اقتصادی، استفاده از میراگر یا وسایل اتلاف انرژی است. در این میان میراگرهای اصطکاکی یکی از انواع وسایل اتلاف انرژی است که عملکرد خوبی در کاهش نیروهای دینامیکی وارده به سازه داشته همچنین می‌توان بیان کرد که از جمله اقتصادی‌ترین آنها نیز به شمار می‌آیند.

با بکارگیری از لنت ترمز به عنوان یک عنصر مقاوم در برابر رفتار سایشی در میراگر جدید اصطکاکی به همراه لنت ترمز (FBP) و بررسی نمونه‌های آزمایشگاهی می‌توان دریافت که افزودن خاصیت اصطکاکی، موجب پایداری سازه در مقابل تغییر شکل‌ها می‌گردد. از دیگر ویژگی‌های میراگر مذکور می‌توان به پایداری در سیکل‌های زیاد، وابستگی خطی انرژی اتلافی با تغییر مکان، ایجاد محدوده وسیعی از بار لغزش در میراگر و تعدادی مورد دیگر بیان نمود. با توجه به موارد ذکر شده برای میراگر فوق، می‌توان دریافت که میراگر FBP جهت مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در برابر نیروهای دینامیکی، بسیار مفید و مؤثر است [۵].

## ۲- میراگرهای ترکیبی

همان‌طور که پیش از این بیان گردید به منظور بهبود رفتار سازه‌ها در مقابل انرژی وارده می‌توان از انواع میراگرها استفاده نمود. اما خود این میراگرها گاهی به دلیل عملکرد تک کاره، دارای معایبی هستند. استفاده از سیستم ترکیبی استهلاکی انواع میراگرها با یکدیگر، می‌تواند معایبی که ناشی از تک کاره بودن مستهلک‌کننده‌هاست را بر طرف نماید.

### ۲-۱- میراگر اینرسی دورانی

در میراگر اینرسی دورانی دریافت داخل طبقه‌ای توسط یک پیچ ساچمه‌ای<sup>۱</sup> -وسیله‌ای مکانیکی است برای تبدیل حرکت چرخشی به حرکت خطی و برعکس با کمترین اصطکاک ممکن- به حرکات دورانی در میراگر تبدیل می‌شود و با این چرخش جسم دوار، انرژی جنبشی تولید می‌گردد. این انرژی ورودی می‌تواند از طریق سیال ویسکوز داخل دمپر، که می‌تواند



روغن سیلیکونی<sup>۲</sup> باشد که در دمپره‌های ویسکوز اینرسی - دورانی<sup>۳</sup> تعبیه شده است و یا از طریق اصطکاک بین جسم در حال چرخش و لوله‌های خارجی در میراگر اینرسی اصطکاکی دورانی<sup>۴</sup> اتلاف گردد.

در سال ۲۰۱۶ Makris و همکارانش در تحقیقاتی بر روی اثرات میرایی اینرسی دورانی بر مستهلک نمودن انرژی وارده بر سازه‌ها دریافتند که این دسته از سیستم‌های میرایی دارای مزیت‌های منحصر به فردی به خصوص در میرایی جابه‌جایی طیفی سازه‌های با پریود طولانی هستند. بکارگیری این نوع میراگر می‌تواند در سازهایی همچون پل‌ها که دارای پریودهای طولانی می‌باشند بسیار مؤثر باشد [۶].

## ۲-۲- میراگر دورانی اینرسی - ویسکوز

در معادلات حرکتی یک سیستم، یک درجه آزادی دارای میراگر RIVD فرض شده است که نیروی میرایی، متناسب با سرعت جرم در حال چرخش می‌باشد. با توجه به فرض فوق‌الذکر انرژی جنبشی ( $T$ )، انرژی پتانسیل ( $V$ ) و انرژی اتلاف شده توسط میراگر به ترتیب در روابط (۱) تا (۳) آورده شده است.

$$T = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (۱)$$

$$V = \frac{1}{2} K x^2 \quad (۲)$$

$$\delta W = -F_d \delta \omega = -D \dot{\omega} \delta \omega \quad (۳)$$

در روابط بالا مقادیر  $x$  و  $\omega$  به شرح زیر مرتبند:

$$\omega = \frac{2\pi}{\rho} x \quad (۴)$$

در این رابطه،  $\rho$  گام پیچ ساچمه‌ای،  $M$  و  $K$  به ترتیب جرم و ماتریس سختی سیستم یک درجه آزادی،  $x$  جابه‌جایی سیستم،  $\omega$  و  $I$  به ترتیب ممان دورانی و ممان اینرسی جرم داخل دمپر هستند و  $\delta$  نشان دهنده تغییرات است.  $D$  ضریب میرایی است که به عوامل مختلفی همچون گام‌های پیچ ساچمه‌ای، اندازه جرم چرخشی، ویسکوزیته سیال ویسکوز، فاصله بین جسم در حال چرخش و دیواره خارجی وابسته است.

## ۳-۲- میراگر دورانی اینرسی اصطکاکی

معادله حرکت سیستم یک درجه آزادی همراه با میراگر RIVD با استفاده از روش لاگرانژ مطابق رابطه (۵) محاسبه خواهد شد.

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = -I \frac{4\pi^2}{\rho^2} \dot{x} - D \frac{4\pi^2}{\rho^2} + F(t) \quad (۵)$$

که  $C$  ضریب میرایی اصلی و  $F(t)$  بار خارجی می‌باشد. با حل معادله سمت راست رابطه (۴)، نیروی کنترل میراگر اینرسی دورانی به صورت رابطه (۶) محاسبه خواهد شد [۷].

$$U_d = -I \frac{4\pi^2}{\rho^2} \dot{x} - D \frac{4\pi^2}{\rho^2} \quad (۶)$$

با بازنویسی معادله (۵) به صورت زیر می‌توان اقدام به حل معادله نمود:

$$(M + \frac{4\pi^2}{\rho^2}) \ddot{x} + (C + D \frac{4\pi^2}{\rho^2}) \dot{x} + Kx = F(t) \quad (۷)$$

حال با تقسیم طرفین معادله فوق بر جرم سازه  $M$  معادله زیر را خواهیم داشت:

$$(1 + \frac{I}{M} \frac{4\pi^2}{\rho^2}) \ddot{x} + (2\xi_0 \omega_0 + \frac{D}{M} \frac{4\pi^2}{\rho^2}) \dot{x} + \omega_0^2 x = \bar{f}(t) \quad (۸)$$

که در این رابطه  $\bar{f}(t) = F(t)/M$  برابر شتاب ثقلی زمین حین رخداد زلزله می‌باشد. در رابطه ۸،  $x$  جابه‌جایی نسبی سازه می‌باشد. در نهایت به منظور محاسبه  $\mu$  و  $\xi_d$  می‌توان معادله (۸) را به صورت نهایی ذیل ساده‌سازی نمود:

$$(1 + \mu) \ddot{x} + 2(\xi_0 + \xi_d) \omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = \bar{f}(t) \quad (۹)$$

که نسبت جرم معادل  $\mu$  و میرایی معادل  $\xi_d$  به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\mu = \frac{I}{M} \frac{4\pi^2}{\rho^2} ; \quad (۱۰)$$

$$\xi_d = \frac{D}{M} \frac{2\pi^2}{\rho^2} \frac{1}{\omega_0}$$

## ۳- مطالعات آزمایشگاهی میراگر اینرسی دورانی

### اصطکاکی

در مدل‌سازی میراگر اینرسی دورانی اصطکاکی، از مخزنی شبیه مخزن استوانه‌ای میراگرهای ویسکوز استفاده شده با این تفاوت که به جای ماده ویسکوز از لنت ترمز استفاده شده است. در نمونه آزمایشگاهی، میراگر هیبرید در یک قاب IPE12 به ابعاد ۱۱۸ سانتی‌متری قرار داده شده است شکل (۱). در طراحی داخلی میراگر از لنت‌های منحنی شکل، پارس لنت با سختی بسیار بالا و ضریب اصطکاک ۰/۳ استفاده گردیده و هدف از ساخت چنین میراگری بهبود رفتار میراگرهای اصطکاکی با استفاده از خاصیت اینرسی افزوده شده به آن می‌باشد. افزوده شدن اینرسی به خاصیت اصطکاکی باعث از بین رفتن ترمزهای ناگهانی و قفل شدگی‌ها، در منحنی هیستریزس میراگرهای اصطکاکی می‌شود و رفتار میراگر اصطکاکی نرم‌تر و جذب انرژی آن نیز به واسطه وجود اینرسی بهتر خواهد شد.

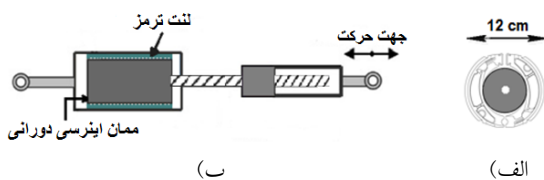


در شکل (۲) شکل شماتیک میراگر اینرسی دورانی اصطکاکی و برش مقطع آن آورده شده است.

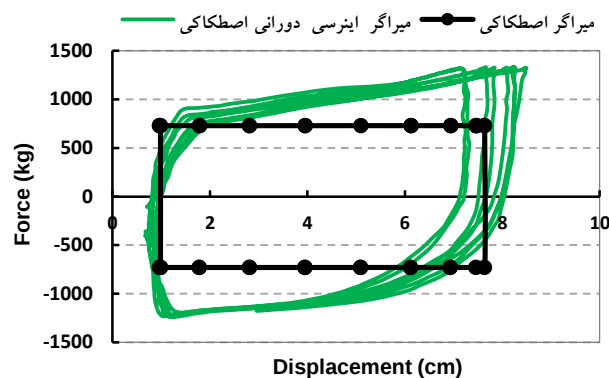


شکل ۱- میراگر اینرسی دورانی اصطکاکی ساخته شده در آزمایشگاه زلزله دانشگاه ارومیه

در ساخت میراگر از استوانه‌ای به قطر ۱۲ سانتی متر و وزنه تو خالی با قطر داخلی ۲ و قطر خارجی ۹ سانتی متری از جنس



شکل ۲- الف) سطح مقطع میراگر و ب) تصویر شماتیک میراگر



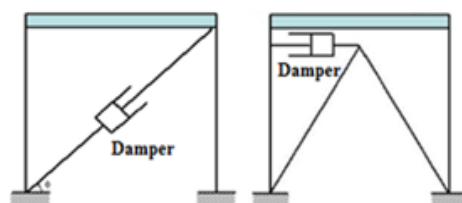
شکل ۳- منحنی هیستریزیس میراگر اینرسی دورانی اصطکاکی و میراگر با خاصیت اصطکاکی تنها

#### ۴- مدل سازی عددی سازه مورد مطالعه

در این بخش ابتدا با استفاده از نرم افزارهای ABAQUS و SAP2000 به مدل سازی میراگرهای اینرسی دورانی ویسکوز و اصطکاکی که توسط Hwang و همکارانش (۲۰۰۷) معرفی گردید در سازه ۸ طبقه فولادی می پردازیم. سپس نتایج بدست آمده را با آزمایشگاهی مقایسه گردیده تا صحت مدل سازی مورد تأیید قرار گیرد.

به منظور مدل سازی میراگر در آباکوس از خاصیت Wire به مدل Interaction استفاده، همچنین نوع تحلیل در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس Dynamic Explicit انتخاب شده است. در شکل (۴) تصویر شماتیک مدل سازی میراگر در بادبند چورون و قطری آورده شده است.

ابتدا سازه های ۴ و ۸ طبقه بدون مهاربند تحت بارگذاری های متعارف آیین نامه ای در نرم افزار SAP 2000 طراحی شده سپس مقاطع بهینه آنها مطابق جدول (۱) به نرم افزار ABAQUS 2016 منتقل شده و بارهای وارده بر سازه را به عنوان بار لرزه ای به گره های سازه جدید اعمال می نماییم.



شکل ۴- تصویر شماتیک میراگر اینرسی دورانی در قاب دو بعدی با بادبند چورون و قطری



جدول ۱- مقاطع بدست آمده از آنالیز سازه در SAP2000

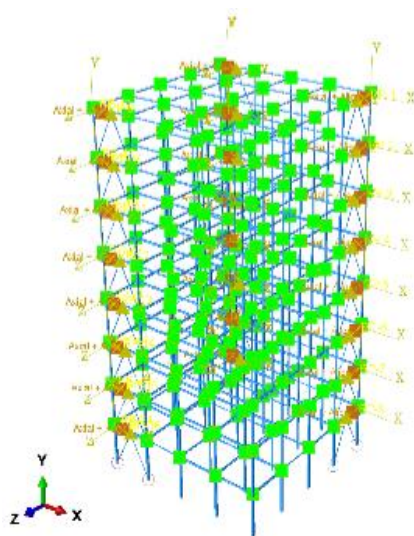
| تعداد طبقات | شماره طبقه | مقاطع تیر | مقاطع ستون |
|-------------|------------|-----------|------------|
| ۸           | ۱-۴        | IPE450    | IPB340     |
|             | ۵-۶        | IPE360    | IPB320     |
|             | ۷-۸        | IPE 330   | IPE300     |

در شکل (۵) تصویر مدل سازی سازه ۸ طبقه در محیط SAP2000 و ABAQUS نشان داده شده است. در این مدل سازی، برای مدل کردن میراگر اینرسی دورانی اصطکاکی از مدل بادبند قطری و برای مدل کردن میراگر اینرسی دورانی ویسکوز از بادبند چورون استفاده شده است. در این تحقیق بیشتر تأثیرات میراگرهای دورانی در زلزله های حوزه نزدیک اما با قدرت های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته اند. بدین منظور از شتاب نگاشت زلزله های کوبه و طبس استفاده شده و در این تحقیق نیز مقایسه ای بین عملکرد این دو نوع میراگر صورت گرفته است.

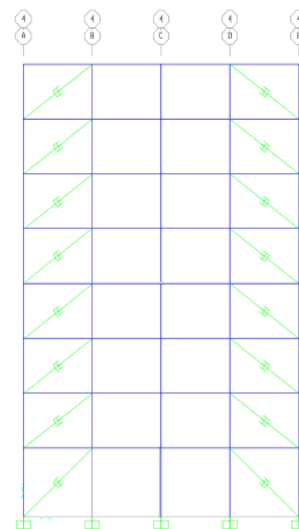
#### ۵- نتایج عملکرد میراگرها در سازه

در آنالیزهای انجام گرفته، برای سازه هیچ گونه میرایی ذاتی در نظر گرفته نشده است و صرفاً اثرات میراگرها در سازه، منجر به

کاهش پاسخ دینامیکی ساختمان ۸ طبقه گردیده است. در شکل (۶) و (۷) به ترتیب نمودارهای جابه جایی مربوط به زلزله کوبه و طبس نشان داده شده و برش پایه حداکثر سازه ۸ طبقه نیز برای دو زلزله کوبه و طبس در شکل (۸) و (۹) آورده شده است. همان طور که در نمودارها مشاهده می شود رفتار میراگرهای ترکیبی منجر به کاهش پاسخ های دینامیکی شده است. با این تفاوت که در ابتدا وقوع زلزله میراگر ویسکوز سریع تر وارد فرایند استهلاک انرژی شده، اما بعد از گذشت چند ثانیه از رخداد زلزله میراگر اصطکاکی بهتر عملکرد و بیشتر و بهتر از میراگر دورانی ویسکوز اقدام به مستهلک نمودن نیروی وارده به سازه کرده است. که این به دلیل نیاز میراگرهای اصطکاکی به یک سطح انرژی فعال سازی خاص و شروع به فعالیت بعد از اعمال جابه جایی اولیه به سازه است. به منظور بررسی کمی بهبود عملکرد میراگرهای استفاده شده در سازه، از داده های خروجی نرم افزار در جدول (۲) و (۳) استفاده شده است. جدول (۲) مربوط به بهبود پاسخ های دینامیکی جابه جایی سازه ۸ طبقه تحت شتاب نگاشت زلزله های کوبه و طبس و جدول (۳) نیز مربوط به کاهش برش پایه حداکثری سازه مورد مطالعه تحت همان شتاب نگاشت های کوبه و طبس می باشد.

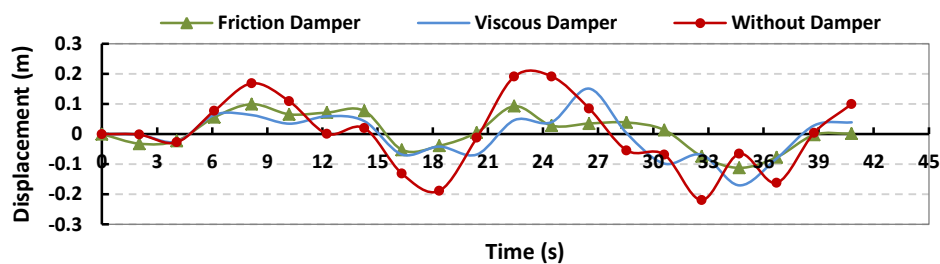


ب) میراگر دورانی

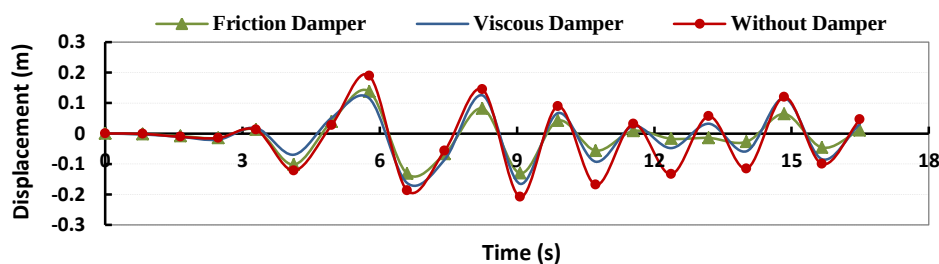


الف) میراگر دورانی اصطکاکی

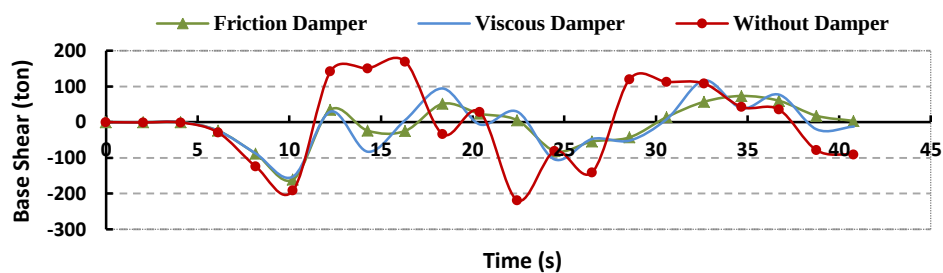
شکل ۵- مدل سازی ساختمان ۸ طبقه در نرم افزار



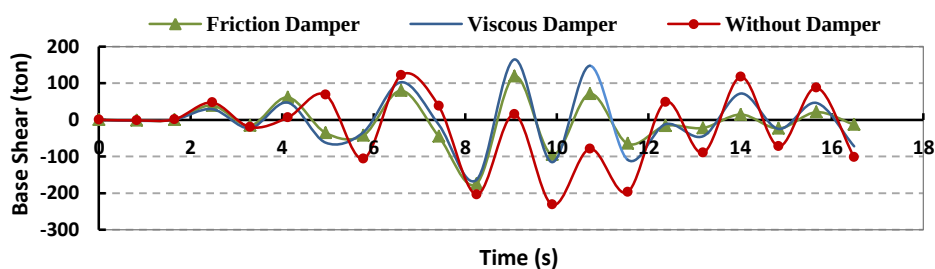
شکل ۶- منحنی جابه‌جایی-زمان سازه ۸ طبقه تحت زلزله کوبه



شکل ۷- منحنی جابه‌جایی-زمان سازه ۸ طبقه تحت زلزله طبس



شکل ۸- منحنی برش پایه-زمان سازه ۸ طبقه تحت زلزله کوبه



شکل ۹- منحنی برش پایه-زمان سازه ۸ طبقه تحت زلزله طبس

جدول ۲- حداکثر جابه‌جایی بام (cm) و درصد کاهش حداکثری جابه‌جایی

| زلزله | بدون میراگر | میراگر هیبرید دورانی<br>اینرسی اصطکاکی | درصد بهبود رفتار<br>دینامیکی | میراگر هیبرید دورانی<br>اینرسی ویسکوز | درصد بهبود رفتار<br>دینامیکی | درصد کاهش<br>حداکثر |
|-------|-------------|----------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| کوبه  | ۲۱/۹۱       | ۱۱/۲۳                                  | ٪۴۸/۷۷                       | ۱۷/۰۴                                 | ٪۲۲/۲۴                       | ٪۴۴/۷۷              |
| طبس   | ۲۰/۸۲       | ۱۳/۷۹                                  | ٪۳۳/۷۷                       | ۱۶/۵۱                                 | ٪۲۰/۷۱                       | ٪۳۳/۷۷              |

جدول ۳- حداکثر برش پایه (ton) و درصد کاهش حداکثری برش پایه

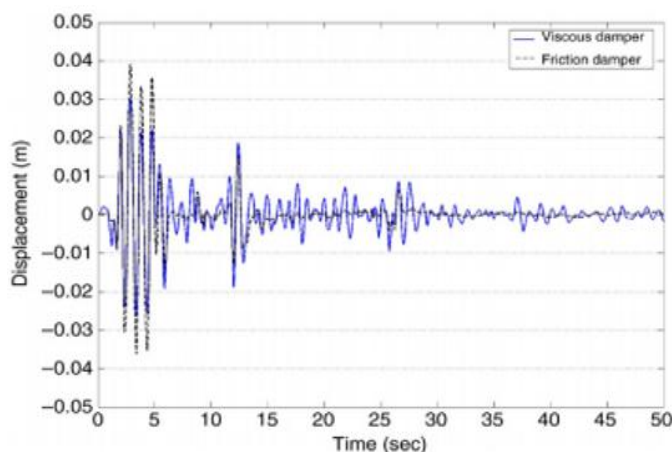
| زلزله | بدون میراگر | میراگر هیبرید دورانی<br>اینرسی اصطکاکی | درصد بهبود رفتار<br>دینامیکی | میراگر هیبرید دورانی<br>اینرسی ویسکوز | درصد بهبود رفتار<br>دینامیکی | درصد کاهش<br>حداکثر |
|-------|-------------|----------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| کوبه  | ۲۱۹/۲۳      | ۱۶۰/۷۴                                 | ٪۲۶/۶۸                       | ۱۵۲/۵۵                                | ٪۳۰/۴۱                       | ٪۳۰/۴۱              |
| طبس   | ۲۳۱/۵۴      | ۱۷۳/۹۸                                 | ٪۲۴/۸۴                       | ۱۶۴/۷۶                                | ٪۲۸/۸۴                       | ٪۲۸/۸۴              |

## ۶- بحث و نتیجه‌گیری

افزودن خاصیت اینرسی به میراگر اصطکاکی منجر به بهبود رفتار هیستریزس میراگرهای اصطکاکی می‌شود؛ که می‌توان نمود آن را در تغییر، زاویه‌های ۹۰ در منحنی‌های اصطکاکی به منحنی‌های نرم‌تر در منحنی هیستریزس میراگرهای اینرسی دورانی اصطکاکی مشاهده نمود شکل (۳). همچنین به واسطه وجود خاصیت اینرسی، ترمزهای ناگهانی و دفرمیدگی در میراگرهای اصطکاکی از بین خواهد رفت.

همان‌طور که پیشتر بیان گردید Enomoto و همکارانش (۲۰۱۴) در مقاله خود به بررسی عملکرد میراگرهای هیبرید اینرسی دورانی ترکیب شده با خاصیت‌های ویسکوز و

اصطکاکی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تحلیل تاریخیچه زمانی جابه‌جایی حداکثر سازه پرداختند که نتیجه آن بهبود رفتار سازه مقاوم سازی شده با میراگرهای جدید هیبریدی بوده است، با این تفاوت که میراگرهای اینرسی دورانی ویسکوز سریع‌تر از میراگرهای اینرسی دورانی اصطکاکی اقدام به استهلاک انرژی می‌نمودند. نتایج مربوط به بررسی اثرات میراگر بر جابه‌جایی سازه مورد مطالعه در مقاله Enomoto و همکارانش در ۲۰۱۴ در شکل (۱۰) آورده شده است که می‌توان نتایج آنها را با نتایج این مقاله که در اشکال (۶) تا (۹) همچنین جداول (۲) و (۳) آورده شده مقایسه گردد.



شکل ۱۰- نمودار مقایسه‌ای جابه‌جایی-زمان میراگرهای هیبرید دورانی ویسکوز و اصطکاکی [۳]

دورانی اصطکاکی نسبت به میراگر هیبرید اینرسی دورانی ویسکوز در کاهش جابه‌جایی حداکثر بام خیلی بهتر عمل کرده و بازدهی میراگر اصطکاکی تقریباً ۲ برابر میراگر ویسکوز در کاهش برش پایه بوده است.

تحلیل سازه ۸ طبقه تحت زلزله‌های طبس و کوبه نشان از عملکرد مناسب میراگرهای هیبرید اینرسی دورانی اصطکاکی و ویسکوز در زلزله‌های حوزه نزدیک دارد. با این وجود با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان بیان کرد میراگر هیبرید اینرسی

- [2] EMA 273, NEHRP., (1997), Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings, Prepared by the Building Seismic Safety Council for Federal Emergency Management Agency, Washington DC, US.
- [3] Enomoto, Y., Fujita, S. and Minagawa K. (2014), "Study on Viscous-Friction Hybrid Damper Installed in Industrial Plants", Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2014-28380.
- [4] Soong, T.T and Dragush, G.F. (1997), "Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering", John Wiley and Sons.
- [5] خالقیان، ف. و تهرانی زاده، م. (۱۳۸۷)، "طراحی یک نوع میراگر اصطکاکی جدید همراه با لنت ترمز"، مجله علمی پژوهشی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (JSEE)، شماره ۴، ص. ۱۷۱-۱۸۲.
- [6] Makris, N. and Kampas, G. (2016), "Seismic Protection of Structures with Supplemental Rotational Inertia", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 142, No. 11, pp. 04016089.
- [7] Hwang, J.S., Kim, J. and Kim Y. M. (2007), "Rotational Inertia Dampers with Toggle Bracing for Vibration Control of a Building Structure", Engineering Structures, Vol. 29, No. 6, pp. 1201-1208.

میراگر هیبرید اینرسی دورانی ویسکوز، نسبتاً رفتار بهتری در کاهش برش پایه سازه ۸ طبقه نسبت به نوع اصطکاکی داشته است. اما این اختلاف خیلی چشمگیر نبوده است و رفتار هر دو میراگر در مجموع برای کاهش برش پایه تقریباً مشابه بوده است. همانند نتیجه مقاله مرجع این تحقیق، میراگر ویسکوز سریع‌تر از میراگرهای اصطکاکی اقدام به کنترل و کاهش پاسخ‌های دینامیکی داشته است که این می‌تواند به دلیل نیاز به سطح انرژی خاص در فعال سازی میراگرهای اصطکاکی باشد. این نقیصه در میراگر هیبرید اینرسی دورانی اصطکاکی نیز دیده می‌شود.

## ۷- مراجع

[۱] زهرائی، س، م. و تخم پاش، ع. (۱۳۸۸)، "بررسی عملکرد سیستم ترکیبی میراگرهای ویسکو الاستیک و اصطکاکی در برابر زلزله های حوزه نزدیک"، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، شیراز، دانشگاه شیراز.

## پی نوشت

- <sup>1</sup> Ball screw
- <sup>2</sup> Silicon oil
- <sup>3</sup> Rotational inertia-viscous dampers
- <sup>4</sup> Rotational inertia-friction damper

