

# بررسی تأثیر میراگر اصطکاکی سیلندری بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های فلزی

حمید میرزائی فرد<sup>۱</sup>، مسعود میرطاهری<sup>۲\*</sup>، حمید رحمانی سامانی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دکتری سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

mmirtaheeri@kntu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۴/۳/۱۹]

تاریخ دریافت: [۹۳/۹/۸]

**چکیده-** در این مقاله، پاسخ لرزه‌ای سازه‌های فولادی با استفاده از میراگر اصطکاکی سیلندری بررسی شده است. میراگر اصطکاکی سیلندری شامل دو عنصر اصلی، شفت (استوانه توپر) و سیلندر (استوانه توخالی) است. این دو عنصر به طور کامل درون هم قرار می‌گیرند. اگر نیروی محوری میراگر بیش از نیروی اصطکاک بین شفت و سیلندر شود، شفت داخل سیلندر حرکت می‌کند که منجر به جذب قابل توجه انرژی خواهد شد. به منظور ارزیابی اثر بخشی میراگر اصطکاکی سیلندری، قاب‌های فولادی مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. قاب‌ها تحت تحلیل غیر خطی تاریخچه زمانی و تحلیل افزایشی دینامیکی قرار گرفته‌اند که پاسخ‌های قاب فلزی دارای میراگر اصطکاکی سیلندری و بدون آن، تأکید بر اثربخشی میراگر اصطکاکی سیلندری در بهبود پاسخ لرزه‌ای دارد. نتایج نشان می‌دهد میراگر اصطکاکی سیلندری به شکل قابل توجهی پاسخ‌های لرزه‌ای را کاهش می‌دهد.

**واژگان کلیدی:** میراگر اصطکاکی سیلندری، کنترل غیر فعال سازه، تحلیل دینامیکی افزایشی، بار لغزش بهینه، پاسخ لرزه‌ای

## ۱- مقدمه

ظرفیت مورد نیاز، طراحی و محاسبه می‌شود. قسمتی از قطر داخلی بخش لوله‌ای که در ناحیه  $L_0$  قرار داشته و در شکل نشان داده شده است، از قطر بخش استوانه به اندازه‌ی معینی کوچکتر است. یعنی دردمای همسان، استوانه نمی‌تواند داخل لوله قرار گیرد. با ایجاد اختلاف دمای مناسب بین لوله و استوانه، قطر داخلی لوله افزایش یافته و استوانه داخل آن قرار می‌گیرد. پس از تعادل گرمایی فشار لازم بین سطوح تماس (سطح جانبی استوانه و سطح داخلی قسمت لوله‌ای شکل) ایجاد شده و این تنش‌های عمودی حلقوی و شعاعی بین سطوح تماس که حاصل از کرنش تحمیلی است، سبب ایجاد اصطکاک بین دو بخش اصلی این میراگر می‌شود. در اثر اعمال نیروی محوری کافی به میزان بار طراحی لغزش به دو سر این

میراگرهای اصطکاکی و در کل ساز و کار اصطکاک به علت داشتن عملکرد ساده و عدم نیاز به مصالح و تکنولوژی خاص، به عنوان یکی از بهترین راه‌های ارتقاء رفتار لرزه‌ای سازه‌ها محسوب شود. یکی از انواع میراگرهای اصطکاکی، میراگر اصطکاکی سیلندری<sup>۱</sup> (CFD) است این میراگر از دو بخش اصلی به علاوه اتصالات لازم برای الحاق به سازه یا هر سیستم لرزنده یا تحت اثر ضربه تشکیل شده است. دو بخش اصلی این میراگر عبارتند از بخش استوانه توپر (شفت) (شکل ۱ الف) و بخش لوله‌ای شکل (سیلندر) (شکل ۱ ب) که جنس و مشخصات هندسی آنها مانند قطر، ضخامت و طول، بر اساس

1 Cylindrical Friction Damper

$m$  جرم،  $\ddot{u}_g$  شتاب،  $c_v$  میرایی ویسکوز،  $u$  سرعت،  $k$  سختی،  $u$  سرعت،  $f_d$  نیروی لغزش میراگر و  $p(t)$  نیروی خارجی است. نیروی خارجی  $p(t)$  برابر  $-m \ddot{u}_g$ ، که  $\ddot{u}_g$  شتاب ناشی از زمین لرزه، و تابع علامت است هنگامی که  $u$  کوچکتر از صفر برابر 1- و هنگامی که  $u$  برابر صفر، صفر و هنگامی که  $u$  بزرگتر از صفر 1 است. با مساوی قرار دادن انرژی تلف شده در هر چرخه میراگر با میرایی ویسکوز، می‌توان نیروی اصطکاکی میراگر را با نیروی ویسکوز معادل جایگزین نمود. بنابراین می‌توان معادله (1) را با معادله زیر تحت بار هارمونیک جایگزین کرد:

$$m \ddot{u} + (c_v + c_{eq}) \dot{u} + ku = F_0 \sin \omega t \quad (2)$$

$F_0$  دامنه بار هارمونیک،  $C_{eq}$  ثابت میرایی ویسکوز معادل و  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای بار است.

با حل معادله بالا نسبت تغییر مکان دینامیکی به استاتیکی

$$\left( u_0 = \frac{F_0}{k} \right) \text{ برابر است با:}$$

$$DMF = \frac{u_0}{u_{st}} = \frac{-\left(\frac{8}{\pi}\right) \omega_r \xi_v F_r + [\alpha^2 + 4 \omega_r^2 \xi_v^2 - \left(\frac{4}{\pi} \alpha F_r\right)^2]^{\frac{1}{2}}}{\alpha^2 + (2 \omega_r \xi_v)^2} \quad (3)$$

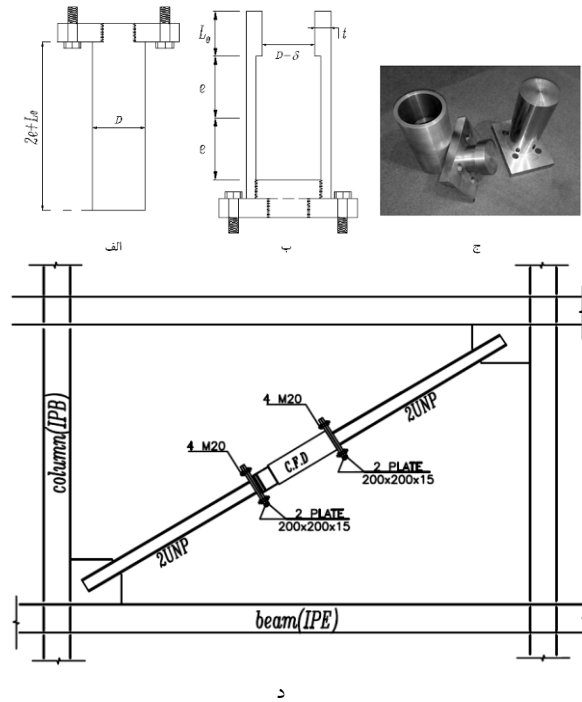
که در آن:

$$F_r = \frac{f_d}{F_0} \quad \alpha = 1 - \omega^2 \quad \omega_r = \frac{\omega}{\omega_n}$$

و  $\omega_n$  برابر فرکانس زاویه ای طبیعی سازه است [2].

به منظور بررسی اثر تشدید روی سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی سیلندری یک سازه سه طبقه یک دهانه در نرم افزار Abaqus6-10 مدل شده است و فرکانس زاویه‌ای طبیعی دومیود اول قاب به دست آمده، و با استفاده از میرایی رایلی و نسبت میرایی رایلی معادل 0.5٪، ضرایب ماتریس جرم و سختی تعیین شده و به قاب‌ها اعمال شده است. با توجه به در نظر نگرفتن جرم حاصل از بارهای اعمالی در نرم افزار Abaqus6-10 جرم حاصل بارهای اعمالی به طور جداگانه به سازه اختصاص یافته است. سپس سازه تحت بار هارمونیک در حالت با و بدون میراگر اصطکاکی سیلندری و با نسبت های مختلف بار لغزش میراگر نسبت به دامنه بار هارمونیک اعمالی ( $F_r$ ) قرار گرفته

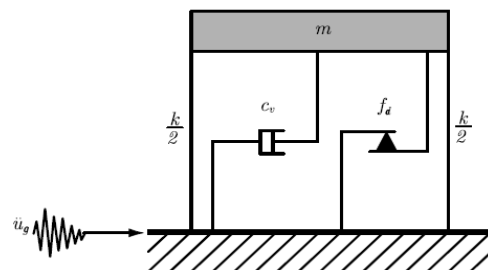
میراگر، بخش استوانه‌ای داخل بخش لوله‌ای با غلبه بر اصطکاک حرکت خواهد کرد و سبب جذب انرژی مکانیکی قابل توجهی خواهد شد. در شکل 1 د جزئیات اتصال مهاربند به میراگر نشان داده شده است [1].



شکل (1) میراگر اصطکاکی سیلندری (الف) بخش استوانه توپر (ب) لوله خارجی (ج) میراگر ساخته شده (د) جزئیات اتصال مهاربند به میراگر

## ۲- تأثیر میراگر اصطکاکی تحت بار هارمونیک

میراگرهای اصطکاکی بین مهاربندها نصب می‌شوند و باعث کاهش تغییر مکان نسبی طبقات می‌شوند. در شکل 2 یک ساختمان یک طبقه یک دهانه با میراگر اصطکاکی نشان داده شده است.



شکل (2) ساختمان یک طبقه یک دهانه مجهز شده به میراگر اصطکاکی

معادله حاکم بر این سازه مطابق معادله زیر است:

$$m \ddot{u} + c_v \dot{u} + ku + f_d \operatorname{sgn}(\dot{u}) = p(t) \quad (1)$$

توجه به مقدار کمی از لغزش، انرژی تلف شده ناچیز است. در این حالت قاب مانند یک قاب خمشی رفتار می‌کند. بین این دو حالت حدی، بار لغزشی از میراگر را می‌توان یافت که بیشترین میزان انرژی تلف شده در آن رخ می‌دهد. این بار لغزش، بار لغزش بهینه<sup>۲</sup> است.

به منظور یافتن بار لغزش بهینه، بار لغزش‌های مختلف باید مورد بررسی قرار گیرد. به عنوان نمونه برای اولین بار، ۸۰٪ بار کمانش عضو به عنوان بار لغزش میراگر انتخاب شده است. پس از آن، مطالعه پارامتریک در هر زمین لرزه صورت می‌گیرد و بار لغزشی که کمترین تغییر مکان بام در آن رخ دهد به عنوان بار لغزش بهینه انتخاب می‌شود.

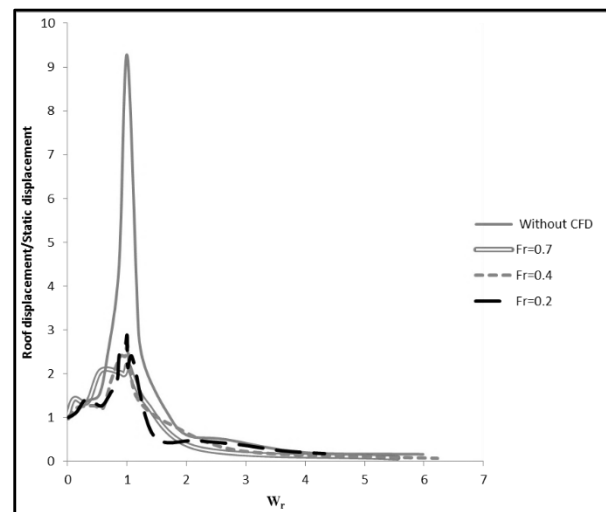
همان‌گونه که دیده می‌شود میزان بار لغزش بهینه به طور کامل وابسته به زمین لرزه‌ای خارجی است. بدین منظور قاب ۶ طبقه ۳ دهانه در شکل ۴ با ضریب رفتار ۶، پهنه با خطر نسبی زیاد و کاربری مسکونی در نرم افزار SAP2000 طراحی شده‌اند. ارتفاع طبقات ۳ متر و سطح بارگیر تیرهای اصلی برابر ۴ متر در نظر گرفته شده است. قاب نمونه (شکل ۴) یک قاب کناری از یک سازه سه دهانه که در هر راستا دارای دو دهانه مهاربندی است به طوری که نیمی از بار و جرم هر یک از دهانه‌های طرفین را تحمل می‌کند، با توجه به وجود میراگر در میان مهاربندها و لغزش میراگر و احتمال ناپایداری سازه هنگام اعمال شتاب نگاشت اتصالات تیر به ستون و پای ستون گیردار فرض شده‌اند. مصالح از نوع فولاد st-37 و با فرض رفتار الاستو پلاستیک کامل می‌باشند. فرضیات لرزه‌ای در قاب مورد نظر رعایت شده است ضوابط ویژه لرزه‌ای بند (۵-۱) آیین‌نامه ۲۸۰۰ در مورد ستون‌های سازه مطابق ذیل است که در طراحی سازه گفته رعایت شده است.

$$P_{DL} + 0.8P_{LL} + 2.8P_E \leq P_{SC} = 1.7F_a A \quad (5) \text{ فشار محوری}$$

$$P_{DL} + 0.85P_{LL} + 2.8P_E \leq P_{ST} = F_y A \quad (6) \text{ کشش محوری}$$

همچنین ضوابط مربوط به تغییر مکان نسبی مجاز (بند ۲-۵ آیین‌نامه ۲۸۰۰) و ضوابط مربوط به لاغری مجاز مهاربندهای تحت فشار (بند ۸-۲ آیین‌نامه ۲۸۰۰) در طراحی سازه رعایت شده

است. در شکل ۳ اثر میراگر اصطکاکی سیلندری تحت بار هارمونیک نشان داده شده است.



شکل (۳) اثر میراگر اصطکاکی سیلندری بر ساختمان سه طبقه یک دهانه

با توجه به شکل بالا می‌توان دریافت هنگامی که نسبت فرکانس بار اعمالی به فرکانس طبیعی تقریباً برابر ۱ است (فرکانس شدید) تغییر مکان بام نسبت به تغییر مکان استاتیکی آن بسیار کمتر از سازه بدون میراگر است. نتایج نشان می‌دهد تغییر مکان سازه با استفاده از میراگر اصطکاکی سیلندری کاهش قابل توجهی داشته است.

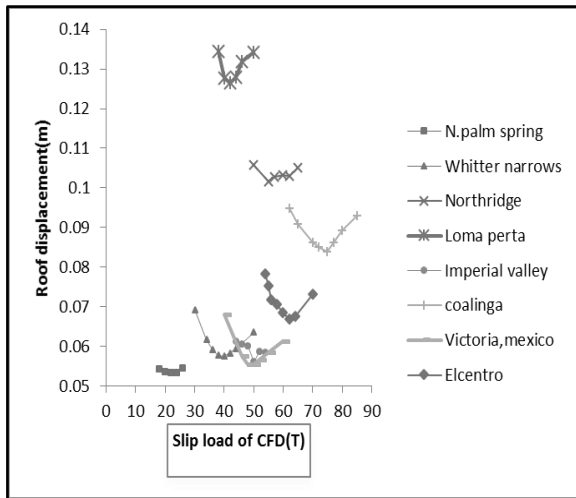
### ۳- بار لغزش

انرژی تلف شده در سازه‌های مهاربندی مجهز به میراگر اصطکاکی سیلندری،  $E_d$  به شرح ذیل بیان می‌شود:

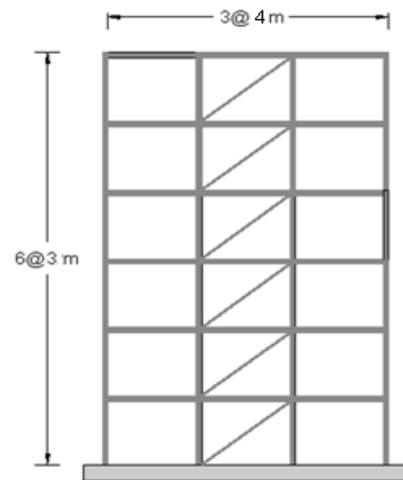
$$E_d = \sum_{i=1}^n E_{di} = \sum_{i=1}^n \int F_{si} |y_i| dt \quad (4)$$

که در آن  $n$  تعداد کل میراگرها،  $E_{di}$  انرژی تلف شده در یک میراگر،  $F_{si}$  بار لغزش میراگر و  $y_i$  تغییر مکان میراگر است. اگر بار لغزش<sup>۱</sup> میراگر زیاد باشد (بزرگتر از کمانش عضو مهاربندی که میراگر در آن قرار دارد) انرژی تلف شده برابر با صفر است، زیرا هیچ لغزش رخ نمی‌دهد. در این حالت قاب مانند یک قاب مهاربندی شده رفتار می‌کند. از سوی دیگر، اگر بار لغزش بیش از حد کم باشد، لغزش بیش از حد رخ می‌دهد اما با

است. مقاطع ستون‌ها تیر آهن IPB و تیرها IPE و مهار بندها ناودانی دویل انتخاب شده است [۴] و [۵].



شکل (۵) تأثیر زمین لرزه بر میزان بار لغزش بهینه برای ۸ زمین لرزه مختلف مقیاس شده با شتاب گرانش (g)



شکل (۴) ابعاد قاب مدل شده در نرم افزار

Earthquake	Optimum slip load (kN)	Deviation from average (%)
Coalinga(1983)	75	52
Elcentro(1940)	62	25
Imperial valley(1979)	50	1
Loma perita()	42	-15
N.palm spring(1986)	24	-52
Northridge(1994)	55	11
Victoria,mexico(1980)	48	-3
Whitter narrows(1987)	40	-19
<b>Average</b>	<b>49.5</b>	

جدول (۱) بار لغزش بهینه ۸ زمین لرزه مقیاس شده با شتاب گرانش (g)

به منظور ارزیابی حساسیت پاسخ‌های سازه نسبت به بار لغزش انتخابی، پارامترهای زیر تعریف می‌شوند:

$$\alpha = 1 - \frac{F_s}{F_{so}} \quad (۷)$$

$$\beta = \frac{R_{df}}{R_{dfo}} - 1 \quad (۸)$$

$$\eta = 1 - \frac{R_{df}}{R_d} \quad (۹)$$

$F_s$  بار لغزش میراگر،  $F_{so}$  بار لغزش بهینه،  $R_d$  تغییر مکان بام

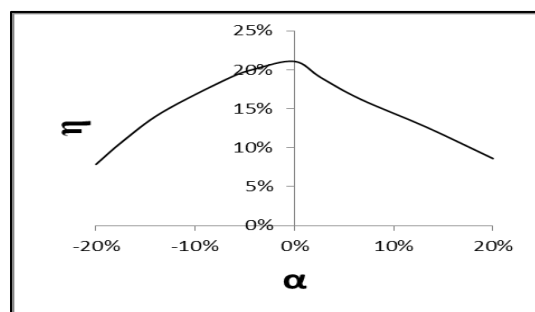
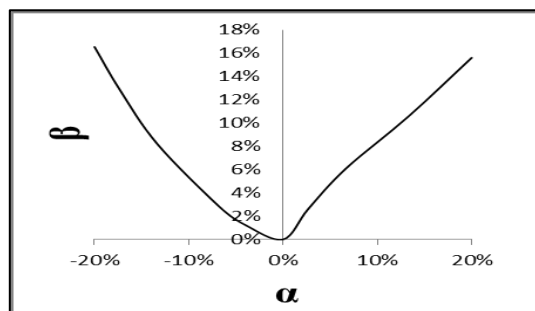
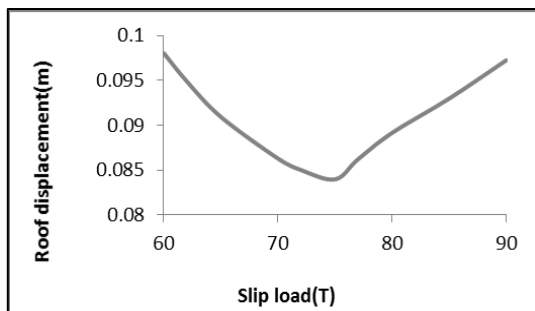
پس از طراحی قاب‌ها، مدل اجزای محدود آنها به کمک نرم افزار Abaqus6-10 تهیه شده است. تیرها، ستون‌ها و بادبندها با استفاده از المان‌های تیر با رفتار دو خطی (الاستوپلاستیک کامل) و با مقاطع طراحی شده در قبل مدل شده است. به منظور مدل‌سازی میراگر اصطکاکی سیلندری از المان Connector انتقالی در یک جهت در وسط مهاربند که رفتار آن منطبق بر منحنی‌های هیستریسیس به دست آمده از مدل آزمایشگاهی است، استفاده شده است. بعد از مدل‌سازی، سازه مورد نظر با بار لغزش‌های متفاوت تحت شتاب نگاشت زمین لرزه‌های مختلف که با شتاب ثقل زمین (g) (به دلیل بررسی رفتار سازه مجهز شده به میراگر اصطکاکی سیلندری تحت شتاب نگاشت زمین لرزه‌های مختلف با شرایط یکسان و در سطح خطر یکسان) مقیاس شده‌اند و در فاصله بین ۵۰ تا ۱۵۰ کیلومتر از کانون زمین لرزه و نیز روی خاک نوع دو قرار دارند؛ قرار گرفته‌اند و برای هر یک از بار لغزش‌ها تغییر مکان بام به دست آمده است. نتایج مورد نظر در شکل ۵ نشان می‌دهد که میزان بار لغزش بهینه وابسته به شتاب نگاشت زمین لرزه ورودی است.

در جدول ۱ بار لغزش بهینه مربوط به زمین لرزه مقیاس شده با شتاب ثقل زمین و نیز انحراف از میانگین آنها نشان داده شده

مقادیر  $\beta$  و  $\eta$  برای زمین لرزه‌های مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود بیشترین مقدار  $\beta$  برابر ۳۶٪ تحت زلزله السترو است. میانگین مقادیر  $\beta$  برابر ۱۶/۸۷٪ در  $\alpha = -20\%$  و  $\alpha = 20\%$  در  $\alpha = -20\%$  است.

جدول (۲) مقادیر  $\beta$  و  $\eta$  برای ۸ زمین لرزه

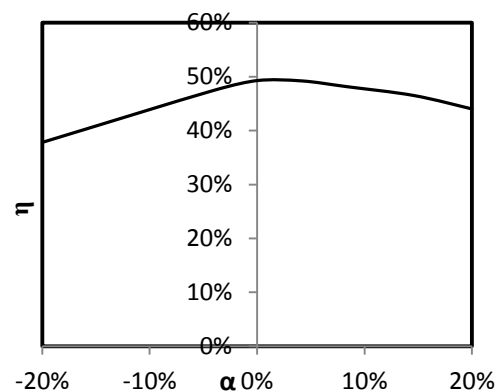
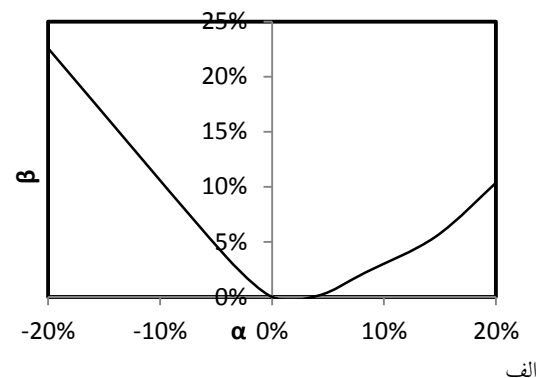
Earthquake	$\alpha = -20\%$		$\alpha = 20\%$	
	$\beta$	$\eta$	$\beta$	$\eta$
Coalinga	16.54	7.87	15.61	8.62
Elcentro	35.96	16.98	11.22	32.09
Imperial valley	8.63	67.55	8.40	67.62
Loma perita	24.02	-6.42	6.11	5.62
N.palm spring	1.73	50.42	4.36	49.13
Northridge	5.14	3.55	3.55	5.01
Victoria,mexico	22.58	37.82	10.36	44.01
Whitter narrows	20.38	9.39	10.54	16.08
Average	16.87	23.40	8.77	28.52



شکل (۷) نمودار بار لغزش بهینه و تأثیر بار لغزش بر پاسخ سازه تحت زمین لرزه Coalinga (1983)

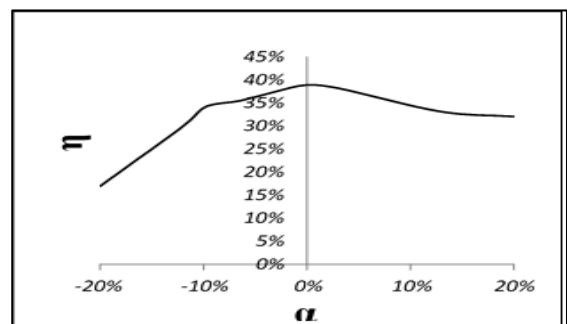
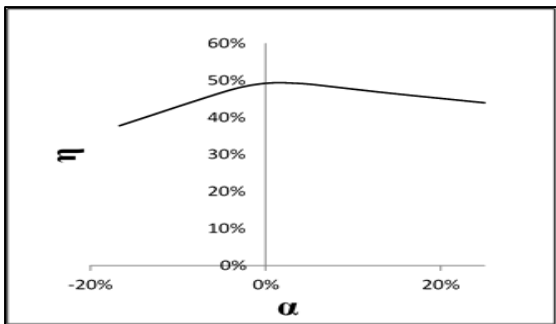
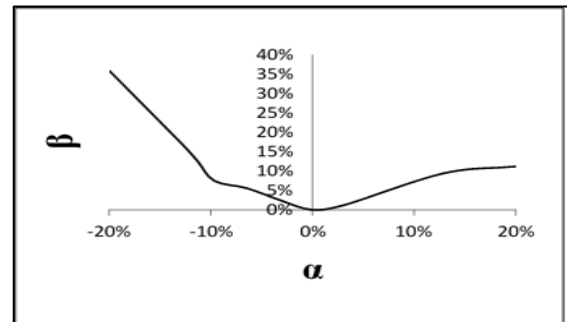
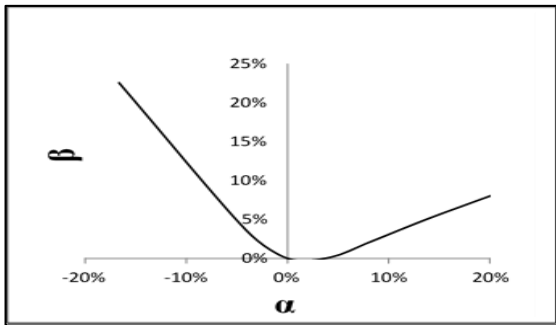
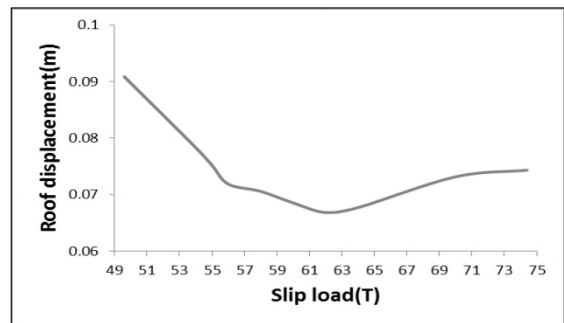
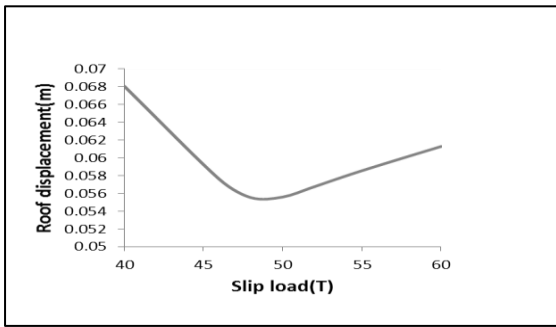
سازه در سازه مهاربندی شده بدون میراگر،  $R_{df}$  تغییر مکان بام در سازه مهاربندی شده با میراگر اصطکاکی سیلندری و نهایتاً  $R_{dfo}$  تغییر مکان بام در سازه مهاربندی شده با میراگر اصطکاکی سیلندری در بار لغزش بهینه است.

شکل ۶ الف  $\beta$  را در برابر  $\alpha$  تحت زمین لرزه Victoria نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود هنگامی که  $\alpha = 20\%$  است (بار لغزش انتخابی ۲۰٪ کمتر از بار لغزش بهینه است)،  $\beta$  برابر ۲۳٪ درصد است به عبارت دیگر بیشینه تغییر مکان بام در این حالت ۲۳٪ بیشتر از تغییر مکان بیشینه بام در حالت بار لغزش بهینه است. شکل ۶ ب  $\eta$  را در برابر  $\alpha$  نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود هنگامی که  $\alpha = -20\%$  است (بار لغزش انتخابی ۲۰٪ کمتر از بار لغزش بهینه است)  $\eta$  برابر ۳۸٪ درصد است. به عبارت دیگر بیشینه تغییر مکان بام در این حالت ۳۸٪ کمتر از تغییر مکان بیشینه بام در حالت بدون میراگر اصطکاکی سیلندری (قاب مهار بندی شده) است.



شکل (۶) ارزیابی حساسیت پاسخ های سازه نسبت به بار لغزش انتخابی تحت زمین لرزه Victoria

شکل ۸، ۷ و ۹ تأثیر ۲۰٪ افزایش و یا کاهش انتخاب بار لغزش میراگر اصطکاکی سیلندری نسبت به بار لغزش بهینه بر پاسخ سازه (تغییر مکان بام) و مقایسه آن‌ها با حالت بدون میراگر اصطکاکی (قاب مهار بندی شده) تحت شتاب نگاشت زمین لرزه‌های مقیاس شده با شتاب ثقل زمین (g) و با ضرایب تعریف شده در قبل نشان داده شده است.



شکل (۹) نمودار بار لغزش بهینه و تأثیر بار لغزش بر تغییر مکان بام تحت زمین لرزه Victoria, Mexico (1980)

شکل (۸) نمودار بار لغزش بهینه و تأثیر بار لغزش بر تغییر مکان بام تحت زمین لرزه Elcentro (1940)

#### ۴- بررسی تأثیر میراگر اصطکاکی سیلندری بر پاسخ سازه

به منظور ارزیابی رفتار میراگر اصطکاکی، سازه مدل شده در قبل را تحت زمین لرزه‌های الاسترو، کبه و طبس و بدون امقیاس کردن به شتاب زمین برای بررسی رفتار واقعی سازه تحت زمین لرزه حقیقی قرار می‌دهیم و بار لغزش بهینه مربوط به هر زمین لرزه را به دست می‌آوریم. سپس پاسخ‌های لرزه‌ای آن از قبیل تغییر مکان، سرعت، شتاب و برش پایه را با حالت

در جداول ۳ تا ۶ بیشینه تغییر مکان، سرعت، شتاب بام و برش پایه قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با و بدون میراگر اصطکاکی سیلندری تحت زمین لرزه‌های السترو، کبه و طیس و همچنین میزان کاهش پاسخ سازه در حالت با میراگر اصطکاکی سیلندری نشان داده شده است

جدول ۳- بیشینه تغییر مکان بام در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه (m)

Earthquake	PGA(g) <sup>۱</sup>	Without CFD	With CFD	Reduction(%)
<b>Elcentro</b>	0.318	0.1026	0.0451	56
<b>Kobe</b>	0.598	0.4654	0.1769	62
<b>Tabas</b>	0.835	0.1342	0.1204	10

جدول ۴- بیشینه سرعت بام در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه (m/s)

Earthquake	PGA(g)	Without CFD	With CFD	Reduction(%)
<b>Elcentro</b>	0.318	1.0292	0.4713	54
<b>Kobe</b>	0.598	1.2824	0.8636	32
<b>Tabas</b>	0.835	1.4019	1.3070	7

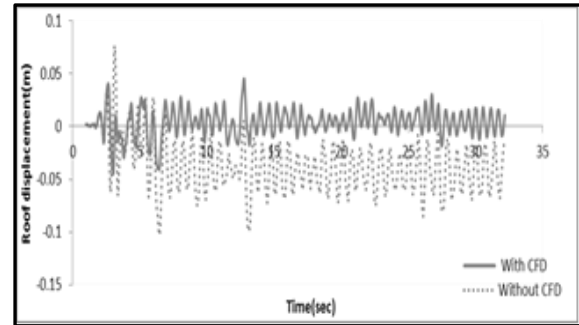
جدول ۵- بیشینه شتاب بام در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه (m/s<sup>2</sup>)

Earthquake	PGA(g)	Without CFD	With CFD	Reduction(%)
<b>Elcentro</b>	0.318	9.98	4.80	52
<b>Kobe</b>	0.598	13.95	10.49	25
<b>Tabas</b>	0.835	12.62	14.91	-20

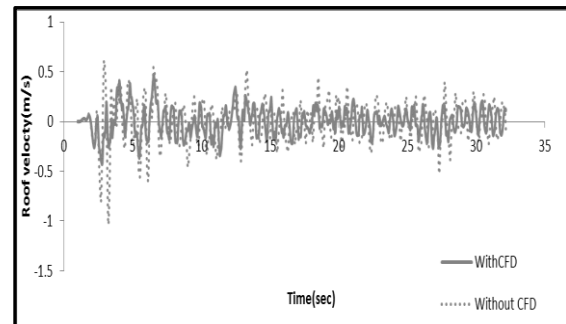
جدول ۶- بیشینه برش پایه در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه (T)

Earthquake	PGA(g)	Without CFD	With CFD	Reduction(%)
<b>Elcentro</b>	0.318	136	37,76	72
<b>Kobe</b>	0.598	162	80,90	50
<b>Tabas</b>	0.835	139	99,84	28

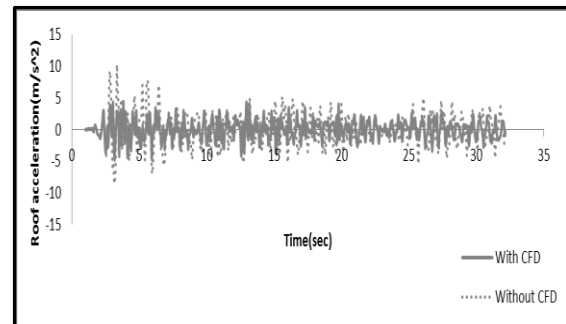
بدون میراگر (در حالتی که مهار بندهای آن دارای برون محوری به اندازه یک هزارم طول مهار بند برای کمانش مهار بندها است) مقایسه می‌کنیم. شکل ۱۰ نمودار پاسخ‌های سازه را تحت زمین لرزه السترو نشان می‌دهد.



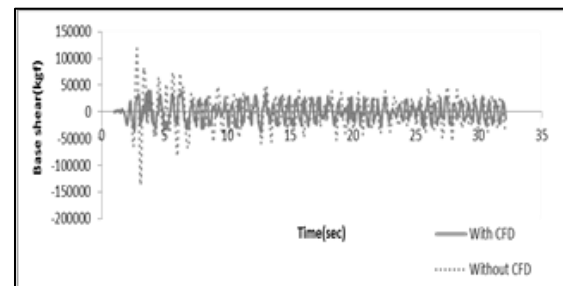
الف) تغییر مکان بام



ب) سرعت بام



پ) شتاب بام



ت) برش پایه

شکل (۱۰) مقایسه پاسخ‌های سازه تحت زمین لرزه Elcentro (1940)

همان‌گونه که در شکل بالا مشخص است تخریب در سازه‌های با میراگر اصطکاکی سیلندری تحت زمین لرزه‌های بسیار قویتر از سازه‌های مهاربندی شده و یا قاب خمشی اتفاق می‌افتد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در سیستم‌های اصطکاکی به علت استهلاک بالای انرژی ورودی به سازه و همچنین انتقال مفاصل پلاستیک به مکان‌های از پیش تعیین شده، تغییر مکان جانبی و همچنین نیروی انتقالی به اعضای اصلی قاب به میزان زیادی کاهش می‌دهند. از نتایج این امر کاهش زیاد تعداد مفاصل پلاستیک در اعضای اصلی قاب است به گونه‌ای که حتی در بسیاری از مواقع که به علت نیروی زمین لرزه در سیستم بدون میراگر با تشکیلات مفاصل پلاستیک زیادی سازوکار تخریب در قاب تشکیل می‌شود. در سیستم شامل میراگر مفاصل پلاستیک ایجاد نمی‌شود و یا فقط تعداد اندکی مفاصل پلاستیک تشکیل می‌شود که نهایتاً به پایداری کلی سیستم کمک خواهند کرد.

میراگر اصطکاکی سیلندری از اجزای کمتری نسبت به سایر میراگرهای اصطکاکی تشکیل شده است. که سبب سادگی ساخت آن شده و فقدان پیچ برای فشردن صفحات اصطکاکی اعتماد پذیری این سیستم را افزایش می‌دهد. میراگر اصطکاکی سیلندری باعث بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها شده و تأثیر مناسبی روی کاهش تغییر مکان‌های نسبی، سرعت، شتاب و برش پایه به میزان قابل ملاحظه‌ای می‌شود.

در این مقاله به ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی سیلندری پرداخته شد و نتایج زیر به دست آمدند:

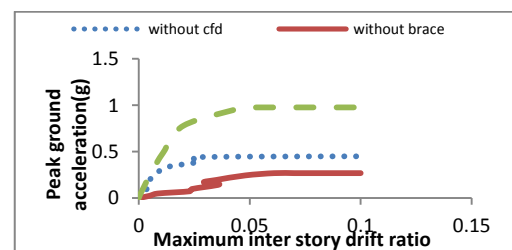
۱. رفتار سازه‌های مجهز به میراگرهای اصطکاکی سیلندری تحت بار هارمونیک بسیار بهتر از سازه‌های مهاربندی شده است و تشدید اثر کمتری روی سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی سیلندری دارد.

۲. بار لغزش بهینه وابسته به شتاب نگاشت زمین لرزه ورودی به سازه است و تحت زمین لرزه‌های مختلف بار لغزش‌های متفاوت به دست می‌آید. کم یا اضافه انتخاب کردن بار لغزش نسبت به بار لغزش بهینه (۲۰٪) باعث افزایش پاسخ‌های سازه

## ۵- تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)

IDA<sup>۱</sup> یک روش تحلیلی پارامتریک است که در سال‌های اخیر، برای بررسی دقیق‌تر رفتار لرزه‌ای سازه‌ها رواج یافته است. این روش شامل اعمال یک یا بیش از یک شتاب نگاشت حرکت زمین لرزه به سازه و بزرگنمایی هر کدام از آنها در چندین مرحله (تا رسیدن به سطح خرابی) است که منجر به ساخت منحنی‌های IDA می‌شود. در این روش ابتدا سازه مورد نظر که قرار است تحلیل IDA روی آن انجام شود، تحت اثر یک شتاب نگاشت انتخاب شده قرار گرفته و تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی سازه انجام می‌شود، در مرحله بعد شتاب نگاشت انتخاب شده با اعمال ضریب مقیاس (Scale Factor) تقویت می‌شود و تحلیل تاریخیچه زمانی سازه تحت این شتاب نگاشت تقویت شده انجام خواهد گرفت. در مراحل بعد شتاب نگاشت دوباره تقویت شده و به سازه اعمال می‌شود. این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که در اثر اعمال شتاب نگاشت تقویت شده به سازه مفاصل پلاستیک تشکیل شده و سازه تخریب شود. بدین ترتیب مراحل مختلف رفتار سازه از رفتار الاستیک، رفتار الاستوپلاستیک تا رفتار پلاستیک تحت اثر بارهای دینامیکی مشاهده می‌شود [۳].

در این بخش قاب ۶ طبقه ۳ دهانه طراحی شده در قبل را در سه حالت با میراگر اصطکاکی سیلندری، با مهاربند دارای برون محوری برای کمانش و بدون مهاربند (قاب خمشی) تحت شتاب نگاشت زمین لرزه Coalinga (1983) قرار داده و بار لغزش بهینه برای سازه مجهز به میراگر اصطکاکی سیلندری به دست آمده است. سپس ضریب مقیاس به شتاب نگاشت تا رسیدن به سطح خرابی اعمال می‌شود. نتایج به دست آمده در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل (۱۱) منحنی IDA تحت زمین لرزه Coalinga (1983)



[۴] مبحث دهم مقررات ملی ساختمان "طرح و اجرای ساختمان های فولادی" وزارت مسکن و شهر سازی، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان-۱۳۸۸

[۵] آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله استاندارد ۸۴-۲۸۰۰ (ویرایش سوم) مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن. ویرایش سوم ۱۳۸۴

[6] Constantinou MC, Mokha A, Reinhorn AM. Teflon bearings in base isolation, II: Modeling. Journal of Structural Engineering 1990

[7] Li C, Reinhorn AM. Experimental and analytical investigation of seismic retrofit of structures with supplemental damping: Part II-Friction devices. Technical report NCEER-95-0009. Buffalo (NY): State University of New York at Buffalo; 1995.

[8] Grigorian CE, Yang TS, Popov EP. Slotted bolted connection energy dissipaters. Report of national science foundation, Berkeley: University of California; 1992.

[9] Mualla IH, Belev B. Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation. Engineering Structures 2002;

[10] Cho CG, Kwon M. Development and modelling of a frictional wall damper and its applications in reinforced concrete frame structures. Earthquake Engineering Structures Dynamics 2004

[11] Lee SH, Park JH, Lee SK, Min KW. Allocation and slip load of friction dampers for a seismically excited building structure based on storey shear force distribution. Engineering Structures 2008

می شود اما همچنان سازه رفتار بهتری نسبت به سازه های فاقد میراگر اصطکاکی سیلندری دارد.

۳. پاسخ سازه های مجهز به میراگر اصطکاکی سیلندری کمتر و در بعضی موارد بسیار کمتر از سازه های مهاربندی شده است که دلیل آن را می توان اتلاف انرژی در میراگر اصطکاکی سیلندری، تولید کمتر مفاصل پلاستیک در سازه و جلوگیری از کمانش مهاربند در سازه های مجهز به این نوع میراگر دانست.

۴. تحلیل دینامیکی افزایشی نشان داد که تخریب در سازه های مجهز به میراگر اصطکاکی دیرتر از سازه های مهاربندی شده و فاقد مهاربند اتفاق می افتد.

## ۲- مراجع

[1] Mirtaheri Masoud, Zandi Amir Peyman, Sharifi Samadi Sahand, Rahmani Samani Hamid "Numerical and experimental study of hysteretic behavior of cylindrical friction dampers" Journal of Constructional Steel Research, (2010)

[2] Kyung-Won Mina, Ji-Young Seonga, Jinkoo Kimb "Simple design procedure of a friction damper for reducing seismic responses of a single-story structure", (2010)

[3] ASGARIAN BEHROUZ, YAHYAI MAHMOOD, MIRTAHERI M, RAHMANI SAMANI HAMID AND PEJMAN ALANJARI. "INCREMENTAL DYNAMIC ANALYSIS OF HIGH-RISE TOWERS" THE STRUCTURAL DESIGN OF TALL AND SPECIAL BUILDINGS Structure Design Tall Spec. Build. (2009)