



## مقایسه رفتار لرزه‌ای میراگرهای اصطکاکی پال و دورانی با استفاده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی

نگار رحیم زاده<sup>۱</sup>، هاشم شریعتمدار<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

negarrahimzadeh0@gmail.com

۲- استاد، گروه عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

shariatmadar@um.ac.ir

### خلاصه

یکی از معتبرترین ابزارهای کنترل غیرفعال، میراگر اصطکاکی می‌باشد. در این پژوهش، تاثیر دو نوع میراگر اصطکاکی پال و دورانی در قاب‌های مهاربندی یکسان، با ارتفاع‌های متفاوت بر ضریب رفتار، بررسی گردیده است. تاثیر میراگرهای موردنظر در سازه‌ها با ۱۳۵ تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی برای هفت زلزله میدان نزدیک و هشت زلزله میدان دور بررسی شده است. مطابق روش‌های پیشنهادی آیین‌نامه‌ای، طراحی لرزه‌ای سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی به کمک ضریب رفتار، جهت به حداقل رساندن نیروهای طراحی و استفاده بهینه از ظرفیت سازه‌ها انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهد ضریب رفتار سازه مجهز به میراگر پال، ۵/۰ (افزایش ۴۲ درصدی) و سازه مجهز به میراگر دورانی ۴/۵ (افزایش ۲۸ درصدی) می‌شود که باعث طراحی برش کمتر، پاسخ‌های لرزه‌ای کمتر، سازه مقاوم‌تر و در نهایت اقتصادی‌تر شدن طرح می‌شود. همچنین نتایج، افزایش ضریب رفتار در سازه‌های با ارتفاع کمتر، نسبت به سازه‌های مرتفع را نشان می‌دهد. از طرفی نتایج نشان‌دهنده افزایش ضریب رفتار به میزان ۱۲٪ و ۵٪ در سازه‌های مجهز به میراگر پال و دورانی تحت زلزله‌های میدان نزدیک نسبت به میدان دور است که استفاده از میراگر پال در مناطق نزدیک به گسل‌های فعال پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: میراگر پال، میراگر دورانی، ضریب رفتار، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی

### ۱- مقدمه

در چند دهه اخیر به علت وقوع زلزله‌های مخرب، یافتن ایده‌های تازه جهت تقلیل نیروی زلزله برای محافظت از سازه‌ها و ساکنان آن‌ها، کاهش هزینه و افزایش سرعت، مهم‌ترین چالش‌های مهندسی سازه شده است. در روش‌های مرسوم، مقاومت ساختمان با استفاده از سه عامل سختی، قابلیت شکل‌پذیری و استهلاک انرژی، با افزودن اجزای سازه‌ای نظیر دیواربرشی، قاب مهاربندی، قاب خمشی، و ... تامین می‌شود. معایب این روش، بالا رفتن هزینه و وزن سازه می‌باشد. امروزه روش دیگری برای کاهش اثرات زلزله، مورد توجه قرار گرفته است. انرژی ورودی به سازه باید به طریقی جذب یا استهلاک شود و چون میرایی ذاتی سازه برای کنترل ارتعاش سازه کافی نمی‌باشد، از ابزار کنترلی استفاده می‌شود. ابزارهای کنترل غیرفعال، حفاظت سازه را با انعکاس یا جذب بخشی از انرژی، بدون نیاز به نیروی خارجی انجام می‌دهند. یکی از معتبرترین ابزارهای کنترل غیرفعال، میراگرهای اصطکاکی می‌باشند. این میراگرها دارای ویژگی عملکرد بالای غیرخطی، وابسته بودن به نیرو و تغییر دوره تناوب آن با دامنه‌ی ارتعاش می‌باشند. با اتمام زلزله، سازه تحت نیروی فنی الاستیک خود، به نزدیکی امتداد اصلی خود باز می‌گردد [1].

ایده اولیه استفاده از سیستم‌های جاذب انرژی به قرن بیستم میلادی برمی‌گردد. پال<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۰ با الهام از مکانیزم ترمز اولیه، میراگر پال را جهت مستهلک کردن انرژی زلزله، از طریق اصطکاک ابداع کرد و مزیت توزیع انرژی در سراسر ارتفاع، نرم شدن سازه بدون از دست دادن خواص پلاستیکی، کاهش دامنه ارتعاش و شتاب، محدود کردن انرژی بدون نیاز به منبع گران‌قیمت را دریافت [2]. پاسکوین<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۱۹۸۴ به ارائه تاریخچه‌ای از

۱- Pall

۲- Pasquin



سیستم‌های جاذب انرژی و نحوه طراحی آن‌ها پرداختند [1]. چری و فیلیاترالت در سال ۱۹۸۶ با قرار دادن یک قاب سه طبقه با میراگر اصطکاکی بر روی میز لرزه و اعمال زلزله‌ای با شتاب  $0.19g$  به سازه، متوجه سالم ماندن سازه شدند. ولی در نبود میراگر، سیستم در سطح لرزه پایین تری دچار خرابی می‌شد [3]. لی و همکاران نشان دادند که توزیع بار لغزش متناسب با برش طبقه، مؤثرتر از توزیع یکسان بار لغزش در طبقات است [4]. داریوش و آپوستولاکیس<sup>۶</sup> نشان دادند که در قاب‌های خمشی با میراگرهای اصطکاکی، توزیع شتاب، جابجایی نسبی و شکل‌پذیری یکنواخت‌تر می‌شود [5]. کویبتانا و پنکوسکی<sup>۸</sup> الگوریتم نیمه فعال این میراگر را شبیه‌سازی کرده و کاهش پاسخ سازه و نوسانات و سازگاری بیشتر سازه با تحریکات زمین لرزه را دریافتند [6]. میراگر اصطکاکی دورانی برای اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط مولا<sup>۹</sup> و بلیو<sup>۱۰</sup> مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها آلیاژ برنج را به عنوان ماده مناسب اصطکاکی جهت رفتار بهتر نمودار هیستریزس و پایداری سازه پیشنهاد کردند [7]. تحقیقات تکمیلی در این مورد در سال ۲۰۰۷ توسط پارک<sup>۱۱</sup> و همکاران روی یک قاب سه طبقه مجهز به میراگر روی میز لرزه صورت گرفت [8]. کولاجانی<sup>۱۲</sup> و پایا<sup>۱۳</sup> تاثیر وجود و عدم وجود میراگر اصطکاکی دورانی را در قاب مهاربندی، در دوره تناوب یکسان بررسی کردند و کاهش پاسخ سازه و افزایش مقاومت آن را دریافتند [9]. در این پژوهش دو میراگر اصطکاکی پال و دورانی که از کاراترین و قدیمی‌ترین میراگرهای اصطکاکی هستند، در سیستم قاب مهاربندی دوبعدی، مورد بحث قرار گرفتند. به همین دلیل در این مطالعات، اثرات پیش‌لحاظ نمی‌شود. از آنجایی که از لحاظ ارتفاعی سه سازه ۲، ۶ و ۱۰ طبقه در نظر گرفته شده‌اند، در مجموع ۹ مدل و ۱۳۵ تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی برای ۱۵ زلزله صورت گرفته است. در مرحله‌ی بعدی بار جانبی شبیه‌سازی شده، بر روی مدل‌های مختلف اعمال می‌شود. پس از ترسیم منحنی بار-تغییر مکان بام هر مدل، نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی بر روی سازه‌های مورد نظر تحت زلزله‌های کوبه، پارکفیلد، پالم اسپرینگز (دیزرت هات)، پالم اسپرینگز (نورث)، کوالی، نورتریج، لوماپریتا، تایوان اسمارت (۰۰۴)، تایوان اسمارت (۰۰۶)، سوپر استیشن هیلز، نورتریج (BALDWIN)، سوپر استیشن هیلز (PLC)، لوما پریتا (گیلروی)، امپریال ولی و نورتریج (HOLLYWOOD)، با استخراج مقادیر از نمودار منحنی هیستریزس و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

## ۲- معرفی میراگر پال و دورانی

میراگر پال مطابق شکل ۱ از یک بادنند و چند ورق فولادی، به همراه پیچ‌های اصطکاکی پرمقاومت تشکیل شده است که در بخش میانی بادنند به نحوی به هم متصل می‌شوند که بیشترین سطح اصطکاک را با هم داشته باشند. این مجموعه تحت بار لغزش معینی نسبت به یکدیگر شروع به حرکت و لغزش می‌کنند و میرایی و استهلاک انرژی از این طریق تامین می‌شود. اگر این بار لغزش بهینه میراگر زیاد باشد، اصطکاک و لغزشی در آن به وجود نمی‌آید. در طرف مقابل، اگر بار لغزش بهینه میراگر کم باشد، اتلاف و استهلاک انرژی قابل چشم‌پوشی است. مکانیزم و ساخت این میراگر، آسان و بسیار ارزان است، چرا که اصطکاک منبع بسیار ارزان‌تری نسبت به سایر منابع اتلاف انرژی می‌باشد.

۳- Cherry

۴- Filiatrault

۵- Lee

۶- Apostolakis

۷- Quintana

۸- Petkovski

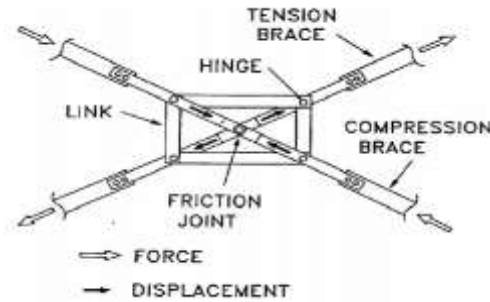
۹- Mualla

۱۰- Belev

۱۱- Park

۱۲- Colajanni

۱۳- Papia

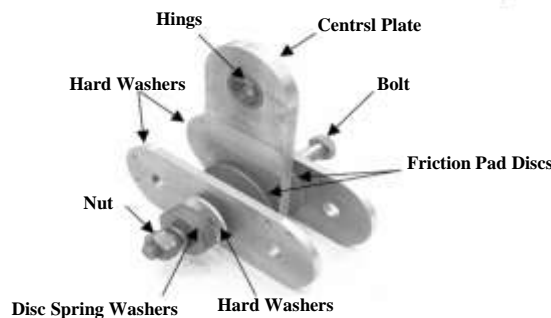


شکل ۱- میراگر اصطکاکی پال [10]

الگوی تغییرشکل مکانیزم میراگر اصطکاکی پال در سال ۱۹۸۶ توسط پال و مارش به شرح زیر پیشنهاد گردیده است: ابتدای هر دو مهاربند فعال بوده و در فشار و کشش، در ناحیه الاستیک قرار دارند. سپس بادیبند فشاری کماتش می‌کند، اما کشش بادیبند کششی هنوز در ناحیه الاستیک ادامه دارد. طراحی سیستم به گونه‌ایست که بار لغزش بهینه قبل از جاری شدن بادیبند کششی، در سازه اعمال شود و به دنبال آن چهار عنصر دیگر مکانیزم فعال شده و به شکل لوزی درآیند. در نتیجه مهاربند فشاری شکل خمیده‌ی خود را از دست داده و بعد از لغزش به شکل بادیبند فشاری، صاف و مستقیم شود. میراگر با رسیدن نیروی مهاربند کششی به بار لغزش بهینه، شروع به عمل کرده و موجب لغزیدن بالشتک‌های اصطکاکی می‌شود. در نتیجه طول بادیبند کششی بدون افزایش نیرو، افزایش می‌یابد. تغییر بار به جهت مخالف، سبب به کشش افتادن مهاربندی که به شکل صاف و مستقیم درآمده بود، می‌شود و از همین لحظه جذب انرژی آغاز می‌شود. نیروی بادیبند اول که حالا تحت فشار است، به  $P_{cr}$  رسیده و در سیستم، رفتاری مشابه مرحله دوم دیده می‌شود. با افزایش بار، مرحله سوم تکرار شده و چرخه رفت و برگشتی بارگذاری-باربرداری تکمیل خواهد شد [3].

میراگرهای دورانی مطابق شکل ۲، شامل دو صفحه عمودی و دو صفحه افقی می‌باشند که به مهاربندهای مفصلی متصل می‌شوند. بین این صفحات، چندلایه اصطکاکی قرار داده می‌شود که به کمک پیچ‌های پیش‌تنیده به هم متصل شده و در مرکز قاب نصب می‌شوند. جهت جلوگیری از تغییر نیروی بین این صفحات، واشر فتری به کار رفته و برای این که از خستگی صفحات جلوگیری شود، واشر سخت بین آن‌ها قرار داده می‌شود. جلوگیری مهاربندها از چرخش صفحات، موجب عملکرد میراگر به صورت یک گره صلب می‌شود. اگر گشتاور اعمال شده، به مقاومت اصطکاکی غلبه کند، چرخش در گره صلب آغاز می‌شود و استهلاک انرژی از طریق نیروی اصطکاکی موجود بر وجه تماس انجام می‌شود.  $M_f$  لنگر دورانی اصطکاکی قابل تحمل توسط میراگر می‌باشد که عملاً لغزش در میراگر، بعد از این لنگر پیچشی اتفاق می‌افتد. همچنین  $M_u$  لنگر نهایی ناشی از نیاز لرزه‌ای در میراگر بدون لغزش می‌باشد.  $\eta_m$  مقاومت نرمالایز شده میراگر است که نشان‌دهنده بیشترین میزان اتلاف انرژی و کمترین میزان جابه‌جایی در قاب است و برای به دست آوردن لغزش بهینه استفاده می‌شود، طبق  $\eta_m = \frac{M_f}{M_u}$  به دست می‌آید. در صورت صفر بودن لنگر لغزش در میراگر،  $(M_f = 0)$  سیستم شبیه قاب صلب بدون بادیبندی عمل کرده و  $\eta_m = 0$  است. در طرف مقابل اگر لنگر لغزش برابر نیاز لرزه‌ای باشد  $(M_f = M_u)$ ، در این صورت  $\eta_m = 1$  می‌شود و با قاب بادیبندی بدون میراگر معادل می‌باشد. بنابراین طبق رابطه ۱ مشاهده می‌شود [8]:

$$0 \ll \eta_m \ll 1 \quad (1)$$



شکل ۲- قطعات میراگر اصطکاکی دورانی [8]



### ۳- محاسبه بار لغزش در میراگرهای پال و دورانی

گام اول در طراحی سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی، تعیین درست و دقیق بار لغزش میراگر می‌باشد. بر اساس مطالعات پال، طرح بار لغزش لرزه‌ای سازه‌های دارای میراگر پال به شرح زیر است: در گام اول طراحی یک قاب مهاربندی نشده، در ترکیب بارهای معمولی (بار ثقلی و بار باد) انجام می‌شود. پیروی غالب سازه  $T_u$ ، برای این سازه‌ی تقویت نشده به دست آورده می‌شود. سپس با در نظر گرفتن صرفه‌ی اقتصادی، طراحی مقاطع مهاربندها به نحوی صورت می‌گیرد که اولین و مهم‌ترین شرط  $\frac{T_u}{T_b} < 0.4$  که در آن  $T_b$  زمان تناوب غالب سازه با بادبند است، حتما رعایت شده باشد. پس از آن حداکثر شتاب زمین  $a_g$  و پیروی غالب زمین محل احداث سازه،  $T_g$ ، بر حسب  $M_L$ ، بزرگی محلی زلزله، طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$5 \leq M_L \leq 7 \quad T_g = 2\pi(6.5 - 7.5 M_L) \quad (2)$$

مقادیر مرتبط با پیروها و شتاب حداکثر زمین باید در محدوده تعیین شده‌ی روابط (۳) تا (۵) قرار گیرند، در این روابط  $NS$  تعداد طبقات سازه است:

$$0.2 \leq \frac{T_b}{T_u} \ll 0.8 \quad (3)$$

$$0.005 \leq \frac{a_g}{g} \ll 0.04 \quad (4)$$

$$0.05 \leq \frac{T_g}{T_u} \ll 20 \quad NS \ll 10 \quad (5)$$

ضرایب  $\alpha$  و در صورت لزوم  $\beta$ ، طبق رابطه‌های (۶) و (۷) به دست می‌آیند:

$$\alpha = (-1.24NS - 0.31) \frac{T_b}{T_u} + 1.04NS + 0.43 \quad (6)$$

$$\beta = (-1.07NS - 0.1) \frac{T_b}{T_u} + 1.01NS + 0.45 \quad (7)$$

جهت به دست آوردن بار لغزش کل  $V_0$ ، از طیف طرح بار لغزش بهره‌جویی می‌شود. مقدار برش لغزش کل بین طبقات،  $V_{s(i)}$  سازه، به طور کاملاً برابر طبق رابطه ۸ تقسیم می‌شود.

$$V_{S(i)} = \frac{V_0}{NS} \quad (8)$$

بار لغزش هر طبقه در میراگرهای آن،  $P_{0ij}$ ، از رابطه‌ی (۹) به دست می‌آید ( $N_{Di}$  در این رابطه تعداد میراگرهای اصطکاکی در طبقه  $i$  ام را نشان می‌دهد و  $\theta$  زاویه هر مهاربند با تیر می‌باشد) [11]:

$$V_{S(i)} = \sum_{j=1}^{N_{Di}} P_{0ij} \cos \theta \quad (9)$$

با روابط داده شده مقادیر بار لغزش در سازه ۲ طبقه بعنوان نمونه در جدول ۱ آورده شده است:

جدول ۱- بار لغزش بهینه محاسبه شده برای میراگر اصطکاکی پال در سازه ۲ طبقه

سازه ۲ طبقه	بار لغزش (T)
طبقه دوم	20.02
طبقه اول	19.29

در میراگر دورانی مولا با انجام آنالیز سازه، لنگر لغزش بهینه،  $M_{FOPT}$ ، را به صورت رابطه‌ی (۱۰) به دست آورد [12].

$$\frac{M_{FOPT}}{h_a E A_b} = \frac{u_{A_0}}{L} \cos \nu^2 \quad (10)$$

$h_a$  ارتفاع میراگر،  $u_{A_0}$  تغییر مکان جانبی قاب،  $A_b$  سطح مقطع بادبند،  $E$  مدول الاستیسیته فولاد،  $L$  طول بادبند و  $\nu$  زاویه بادبند نسبت به محور افقی می‌باشد.

با روابط داده شده مقادیر لنگر لغزش در جدول ۲ برای سازه دو طبقه به عنوان نمونه آورده شده است:

جدول ۲- لنگر لغزش بهینه برای سازه ۲ طبقه در میراگر اصطکاکی دورانی

طبقه	تغییر مکان (m)	لنگر لغزش بهینه بر اساس رابطه (۱۰) (T.m)	لنگر لغزش بهینه حاصل از تحلیل دقیق (T.m)
2	0.006230	6.893	5.9
1	0.002988	8.954	6.8



#### ۴- طراحی و مدل‌سازی سازه‌ها

طراحی سازه‌های مورد مطالعه در نرم‌افزار ETABS 9.7.4 انجام شده است. سازه مورد نظر مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران و بارگذاری لرزه‌ای مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم و طراحی به روش حالت حدی، قاب مهاربندی از نوع متوسط، با اهمیت متوسط  $d=1$  خاک محل از نوع IV و منطقه با خطرپذیری زیاد  $A=0.3$  می‌باشد. مشخصات اعضای قاب مهاربندی در جدول ۳ آمده است:

جدول ۳- مشخصات اعضای قاب مهاربندی ۲ طبقه

تیر	مهاربندها	ستون‌های میانی	ستون‌های کناری
IPE360	BOX120×120×8	BOX100×100×18	BOX80×80×8
IPE330	BOX100×100×10	BOX80×80×8	BOX70×70×8

#### ۵- نحوه محاسبه ضریب رفتار

ضریب کاهش مقاومت  $R$  جهت به حداقل رساندن مقدار نیروهای طراحی و استفاده بهینه از ظرفیت سازه‌ها برای استهلاک انرژی لرزه‌ای، از زمان آغاز محدودی رفتار غیرخطی مصالح در استانداردهای تحلیل و طراحی، کاربرد دارد. بر اساس آیین‌نامه‌های ATC19 و ATC34 ضریب رفتار به صورت رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود [13].

$$R = R_{\mu} \Omega_0 R_y \quad (11)$$

$R_y$  ضریب مقاومت شکل‌پذیری که در روش حالت حدی برابر واحد است،  $R_{\mu}$  نشانگر ظرفیت شکل‌پذیری سازه در ناحیه غیرخطی مصالح،  $\Omega_0$  ضریب مقاومت افزون می‌باشد. جهت در نظر گرفتن اثرات میراگرهای الحاقی، پارامتر  $R_{\xi}$  توسط ویتاکر، طبق رابطه ۱۲ پیشنهاد شده است [14].

$$\bar{R} = R R_{\xi} \quad (12)$$

$R$  ضریب رفتار سازه با میرایی ذاتی تا ۵٪ و  $\bar{R}$ : ضریب رفتار سیستم با میراگر می‌باشد.

#### ۶- محاسبه ضریب رفتار بر مبنای تحلیل دینامیکی تاریخی زمانی

مطابق روش پیشنهادی رودریگو و همکاران ضریب رفتار از نمودار برش پایه-تغییر مکان، مطابق شکل ۳ به دست می‌آیند [15]: خطوط موازی با محورهای افقی و قائم، از نقاط  $L$  و  $N$  که مربوط به جابه‌جایی‌های حداکثر منفی و مثبت، جهت قطع کردن مجانب خطوط هیستریزس رسم شده از مرکز در نقاط  $S$  و  $H$  می‌باشند، ترسیم می‌شوند. در نتیجه حداکثر جابه‌جایی‌های منفی و مثبت  $OM$  و  $OC$  و حداکثر جابه‌جایی‌ها مثبت و منفی تسلیم سازه  $OB$  و  $OF$  به دست می‌آیند. نقاط  $T$  و  $K$  نیز که محل تقاطع خط مجانب رسم شده از مرکز با خطوط مجانب ناحیه‌ی سخت شدگی کرنشی هستند، نشان‌دهنده‌ی تشکیل اولین مفصل خمیری می‌باشند. ضریب رفتار و سه عنصر اصلی آن طبق روابط ۱۳ تا ۱۶ به دست می‌آید:

$$\mu = \frac{\Delta_{max}^+ + \Delta_{max}^-}{\Delta_y^+ + \Delta_y^-} \quad (13)$$

$$R_{\mu} = \frac{\mu}{C_1} \quad (14)$$

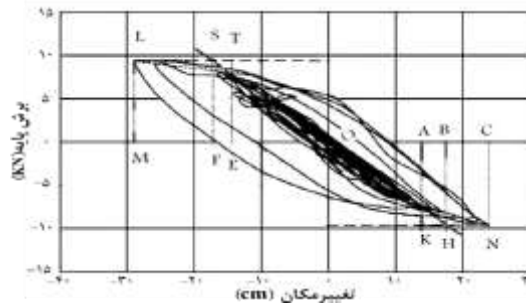
$$\Omega_{01} = \frac{\Delta_y^+ + \Delta_y^-}{\Delta_s^+ + \Delta_s^-} \quad (15)$$

$$\Omega_0 = \Omega_{01} \times F_1 \times F_2 \times F_3 \quad (16)$$

$C_1$  نسبت بیشینه‌ی تغییر مکان غیر ارتجاعی به بیشینه‌ی تغییر مکان ارتجاعی،  $\Omega_{01}$  ضریب مقاومت افزون اولیه،  $\Delta_{max}^+$  تغییر مکان بیشینه‌ی مثبت،  $\Delta_{max}^-$  تغییر مکان بیشینه‌ی منفی،  $\Delta_y^+$  تغییر مکان بیشینه‌ی مثبت تسلیم کلی قاب،  $\Delta_y^-$  تغییر مکان بیشینه‌ی منفی تسلیم کلی قاب،  $\Delta_s^+$  تغییر مکان مثبت مربوط به



تشکیل اولین مفصل خمیری،  $\Delta_s^-$  تغییر مکان منفی مربوط به تشکیل اولین مفصل خمیری می‌باشند.  $F_1$  ضریب اضافه مقاومت سیستم،  $F_2$  ضریب اضافه مقاومت مصالح ضریب اضافه مقاومت طراحی و به ترتیب برابر  $1/0.5$ ،  $1/1.5$ ،  $1/0.0$  می‌باشند. ضریب رفتار سازه‌های به دست آمده در جدول ۴ آمده است.



شکل ۳- منحنی هیستریزس فرضی برای محاسبه‌ی تغییر مکان‌های مورد نظر [15]

جدول ۴- متوسط ضریب رفتارهای محاسبه شده بر مبنای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی

سازه	نوع سازه	R	$R_{\xi}$
دوطبقه	بدون میراگر	3.20	-
	مجهز به میراگر پال	4.60	1.44
	مجهز به میراگر دورانی	4.16	1.30
شش طبقه	بدون میراگر	3.49	-
	مجهز به میراگر پال	4.67	1.36
	مجهز به میراگر دورانی	4.42	1.26
ده طبقه	بدون میراگر	3.43	-
	مجهز به میراگر پال	4.55	1.33
	مجهز به میراگر دورانی	4.14	1.20
مقادیر متوسط	بدون میراگر	3.37	-
	مجهز به میراگر پال	4.60	1.36
	مجهز به میراگر دورانی	4.24	1.25

## ۷- بررسی و تحلیل نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی

تحلیل تاریخچه زمانی با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های هفت زلزله میدان نزدیک و هشت زلزله میدان دور صورت گرفته است، نتایج به شرح جدول ۵

است:

جدول ۵- مقایسه ضریب رفتار در زلزله‌های میدان دور و میدان نزدیک

نوع میدان	نوع سازه	R	$R_{\xi}$
زلزله میدان نزدیک	بدون میراگر	3.35	-
	مجهز به میراگر پال	4.88	1.45



1.30	4.36	مجهاز به میراگردورانی	زلزله میدان دور
-	3.39	بدون میراگر	
1.27	4.32	مجهاز به میراگرپال	
1.21	4.12	مجهاز به میراگردورانی	

نتایج نشان‌دهنده افزایش ضریب رفتار سازه مجهاز به میراگر اصطکاکی پال، در زلزله میدان نزدیک نسبت به زلزله میدان دور به میزان ۱۲٪ و سازه‌های مجهاز به میراگر اصطکاکی دورانی به میزان ۵٪ می‌باشد. طبق نتایج سازه‌های مجهاز به میراگر اصطکاکی، رفتار بهتری در مقابل زلزله‌های میدان نزدیک، نسبت به زلزله‌های میدان دور دارند. دلیل این امر این است که انرژی در زلزله‌های میدان نزدیک، در زمان کمتر اما با توان بیشتر به سازه اعمال می‌شود. از طرفی میراگر اصطکاکی ابتدا باید به بار لغزش بهینه در نظر گرفته شده، برسد تا بتواند شروع به حرکت و استهلاک انرژی کند. به علت آنی بودن این عمل، میراگرهای اصطکاکی در زلزله‌های میدان نزدیک رفتار بهتری نسبت به زلزله‌های میدان دور دارند. از طرفی ضریب رفتار میراگر پال نسبت به میراگر دورانی در زلزله‌های میدان نزدیک بالاتر می‌باشد. علت این امر، انتقالی بودن جابه‌جایی در میراگر پال می‌باشد که با رسیدن به بار لغزش، عمل استهلاک انرژی آغاز می‌شود. اما دورانی بودن جابه‌جایی در میراگردورانی سبب افزایش زمان تا رسیدن به لنگر لغزش بهینه می‌شود. و این امر بهینه‌بودن میراگر پال نسبت به دورانی را در زلزله‌های میدان نزدیک روشن می‌سازد. لذا جهت حائق آمدن بر مشکل رفتاری سازه‌ها، در مناطق در معرض زلزله‌های میدان نزدیک، استفاده از میراگر پال اصطکاکی توصیه و تاکید می‌گردد.

## ۸- نتیجه‌گیری

۱- با توجه به روش ATC-34، با محدود کردن بار لغزش بهینه هر دو نوع میراگر اصطکاکی به ۲۰٪ وزن سازه ضریب رفتار سازه‌ها به شرح زیر است:

نوع میراگر	زلزله میدان نزدیک	زلزله میدان دور
میراگر پال	5.00	4.50
میراگر دورانی	4.50	4.25

۲- ضریب رفتار در سازه‌های با ارتفاع کمتر، نسبت به سازه‌های مرتفع به مقدار بیشتری افزایش یافته است.

۳- سازه مجهاز به میراگر پال موجب افزایش ۱۲٪ و سازه مجهاز به میراگر دورانی موجب افزایش ۵٪ زلزله‌های میدان نزدیک نسبت به زلزله‌های میدان دور می‌شوند. همچنین سازه‌های با ارتفاع بالاتر دارای تطابق بهتری با آیین‌نامه ۲۸۰۰ می‌باشد.

۴- افزودن میراگر پال به سازه موجب جذب بالای انرژی، افزایش مقاومت، افزایش پایداری و قابلیت اطمینان در مقایسه با میراگر دورانی و در مناطق مستعد زلزله و گسل می‌باشد.



## ۹- مراجع

- [1] Pasquin C, Leboeuf N, Pall RT, Pall A. Friction dampers for seismic rehabilitation of Eaton's building, Montreal. In 13th world conference on earthquake engineering, 1-2, 2004.
- [2] Pall AS, Marsh C. Response of friction damped braced frames. Journal of Structural Engineering, 108(9): 1313-1323, 1982.
- [3] Filiatrault A, Cherry S. Seismic tests of friction damped steel frames. In Dynamic Response of Structures, ASCE; 138-145, 1986.
- [4] 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, 30(4): 930-40, 2008.
- [5] Apostolakis G, Dargush GF. Optimal seismic design of moment-resisting steel frames with hysteretic passive devices. Earthquake engineering & structural dynamics. 39(4): 355-76, 2010.
- [6] Quintana HC, Petkovski M. Optimum performance of structural control with friction dampers. Engineering Structures, 172: 154-62, 2018.
- [7] Mualla IH, Belev B. Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation. Engineering Structures. 24(3): 365-71, 2002.
- [8] Park JH, Min KW, Chung L, Lee SK, Kim HS, Moon BW. Equivalent linearization of a friction damper-brace system based on the probability distribution of the extremal displacement. Engineering structures, 29(6): 1226-37, 2007.
- [9] Colajanni P, Papia M. Seismic response of braced frames with and without friction dampers. Engineering Structures, 17(2): 129-40, 1995.
- [10] Spencer Jr BF, Soong TT. New applications and development of active, semi-active and hybrid control techniques for seismic and non-seismic vibration in the USA. In Proceedings of international post-SMiRT conference seminar on seismic isolation, passive energy dissipation and active control of vibration of structures, 23-25, 1999.
- [11] Pall A. Design-Slip load of friction dampers, Pall Dynamics-Pioneers of friction dampers for seismic control of buildings.
- [12] Mualla IH. *Experimental & computational evaluation of a new friction damper device* (Doctoral dissertation, Ph. D. thesis, Dept. of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark).
- [13] ATC, Structural Response Modification Factors : ATC-19, Applied Technology Council, Redwood City, California, 5-32, 1995.
- [14] Whittaker AS, Bertero VV, Thompson CL, Alonso LJ. Seismic testing of steel plate energy dissipation devices. Earthquake Spectra. 7(4): 563-604, 1991.
- [15] Martinez-Rodrigo M, Romero ML. An optimum retrofit strategy for moment resisting frames with nonlinear viscous dampers for seismic applications. Engineering Structures, 25(7): 913-25, 2003.