

# Experimental Study of Rotational-Friction Damper with Two Slip Load and Evaluation of its Performance in RC Frame under Cyclic Loading

Reza Moradi

Phd Student in structure Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Ebrahim Khalilzadeh Vahidi\*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran  
khalilzadeh@razi.ac.ir

## Abstract:

The main purpose of this research is an experimental study of a type of rotational-friction dampers with two slip loads and numerical study of the behavior of reinforced concrete frames with this type of dampers under cyclic loading. For this purpose, first, the mechanism of action of the proposed damper will be explained. In the next step, two specimens of rotational-friction dampers with two different slip loads are investigated in the laboratory. Then, using the Opensees software, a behavioral model is proposed for it and validated using experimental results. In the final step, one story-one bay reinforced concrete frame in four states, (1) without damper, (2) with rotational-friction damper with one slip load (RFD), (3) with the rotational-friction damper with two slip load type S01 and (4) rotational-friction damper with two slip load type S02, under cyclic loading will be analyzed and the results will be investigated. The results of experimental studies show that the effective stiffness in the final cycle for specimens S01 and S02 were 109 and 128 tons per meter, respectively, while their effective damping in the final cycle is about 0.48, which indicates the appropriate ability of experimental specimens to absorb earthquake energy and reduce structural damage. Also, the results of numerical studies of reinforced concrete frame show that concrete frame with S01 damper has better seismic performance because its ultimate strength is 15% and its dissipated energy in the final cycle is 164% more than the ultimate strength and energy dissipation of the final cycle of the frame without damper.

Keywords: Slip load, Rotational-Friction, Damper, Energy Dissipated, Effective Stiffness, Effective Damping

# بررسی آزمایشگاهی میراگر اصطکاکی-دورانی با دو بار لغزش و ارزیابی عملکرد آن در قاب بتن مسلح تحت بارگذاری چرخه‌ای

دریافت مقاله: ۲-۶-۱۴۰۰

پذیرش مقاله: ۲۱-۶-۱۴۰۰

رضا مرادی

دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

ابراهیم خلیل زاده وحیدی\*

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

چکیده:

هدف اصلی در این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی نوعی از میراگرهای اصطکاکی-دورانی با دو بار لغزش و بررسی عددی رفتار قاب بتن مسلح دارای این نوع میراگرها تحت بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد. برای این منظور پس از مقدمه به توضیح سازوکار عملکرد میراگر پیشنهادی پرداخته خواهد شد. در گام بعدی دو نمونه میراگر اصطکاکی دورانی دارای دو بار لغزش متفاوت مورد بررسی آزمایشگاهی قرار می‌گیرد. سپس مدل رفتاری ای برای آن پیشنهاد و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی اعتبار سنجی می‌شود. در گام آخر قاب بتن مسلح یک طبقه-یک دهانه در چهار حالت بدون میراگر، با میراگر اصطکاکی-دورانی دارای یک بار لغزش (RFD)، با میراگر اصطکاکی-دورانی دارای دو بار لغزش از نوع S01 و با میراگر اصطکاکی-دورانی دارای دو بار لغزش از نوع S02، تحت بارگذاری چرخه‌ای تحلیل و نتایج آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که، مقدار سختی موثر در چرخه آخر برای نمونه S01 و S02 به ترتیب ۱۰۹ و ۱۲۸ تن بر متر بوده است، در حالیکه مقدار میرایی موثر آنها در چرخه آخر حدوداً ۰/۴۸ می‌باشد، که این مقادیر به معنی توانایی مناسب نمونه‌های آزمایشگاهی در جذب انرژی زلزله و کاهش خسارات سازه‌ای، می‌باشد. همچنین نتایج بررسی‌های عددی قاب بتن مسلح نشان می‌دهد که قاب بتن مسلح دارای میراگر S02 عملکرد لرزه‌ای بهتری داشته، زیرا مقاومت نهایی آن ۱۵ درصد و انرژی میرا شده آن در چرخه آخر ۱۶۴ درصد بیشتر از مقاومت نهایی و انرژی میرا شده چرخه آخر قاب بدون میراگر بوده است.

کلمات کلیدی: میراگر اصطکاکی، بار لغزش، انرژی میرا شده، سختی موثر، میرایی موثر

## ۱- مقدمه :

زلزله والدیویا<sup>۱</sup> شیلی در سال ۱۹۶۰ با بزرگای ۹/۵ ریشتر و ۱۷۱۶ نفر کشته، شدیدترین زلزله دنیا [۱] و زلزله هائیتی<sup>۲</sup> که در سال ۲۰۱۰، با بزرگای ۷ ریشتر و ۳۱۶۰۰۰ نفر کشته، مرگبارترین زلزله دنیا، بوده‌اند [۲]. بنابراین زلزله جزء یکی از حوادث غیرمترقبه است، که می‌تواند موجب خسارات جانی و مالی زیادی شود [۳]. مهمترین عامل بروز خسارات در زلزله‌ها، آسیب پذیری سازه‌ها و زیرساخت‌ها می‌باشد [۴]. هر چند که جلوگیری کامل از خسارات ناشی از زلزله‌های شدید دشوار است، اما با طراحی و ساخت اصولی سازه‌ها و همچنین نظارت مستمر بر ساخت آنها، می‌توان خسارات ناشی از زلزله‌های آینده را به میزان قابل توجهی کاهش داد [۵].

روش‌های مختلفی برای کنترل ارتعاش سازه وجود دارد که هدف اصلی آنها میرا کردن انرژی زلزله و کاهش تقاضای سازه است [۵-۷]. یکی از این روش‌ها، کنترل ارتعاش سازه به روش غیرفعال با استفاده از میراگرهای اصطکاکی است. اولین بار مهندسان مکانیک از نیروی اصطکاک به عنوان میرا کننده انرژی جنبشی در ماشین‌ها و ادوات مکانیکی استفاده کردند [۸]. سپس از این ایده به منظور میرا نمودن انرژی ورودی به سازه ناشی از زلزله و به شکل میراگرهای اصطکاکی، در صنعت ساختمان استفاده گردید. به دلیل اینکه سازوکار عملکرد میراگرهای اصطکاکی بر پایه اصطکاک بین دو صفحه می‌باشد، سامانه‌های سازه‌ای دارای این نوع میراگرها با هزینه کمتر، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند [۹-۱۱]. از برتری‌های این میراگرها می‌توان به نمودار بار-جابجایی مستطیلی آنها اشاره کرد که باعث می‌شود توانایی بالایی در جذب انرژی ورودی ناشی از زلزله را داشته باشند. هنگامیکه سازه تحت ارتعاشات شدید زلزله قرار می‌گیرد، صفحات مربوط به میراگرهای اصطکاکی با رسیدن نیرو به نیروی لغزش، نسبت به هم حرکت کرده و باعث تغییر در بسامد طبیعی سازه و جلوگیری از آسیب به اجزاء دیگر سازه می‌شود [۱۲]. در میراگرهای اصطکاکی نیروی عمود بر سطح، توسط پیچ‌های پرمقاومت تامین می‌گردد. همچنین مقدار ضریب اصطکاک وابسته به جنس سطوحی که روی هم می‌لغزند، است [۱۳]. بررسی و توسعه میراگرهای اصطکاکی به دلیل رشد روزافزون استفاده از آنها در سازه‌های پراهمیت، ضروری به نظر می‌رسد. به همین دلیل این روش یکی از مواردی است که در طول سالیان گذشته مورد توجه محققین بسیاری بوده است. در سال ۲۰۱۹ انوشه‌ای و همکاران [۱۴] به ارزیابی لایه‌های اصطکاکی با جنس‌های مختلف در میراگرهای اصطکاکی-دورانی T شکل پرداختند. برای این منظور میراگرهای اصطکاکی-دورانی با لایه‌هایی از جنس آلومینیوم، فولاد روی‌اندود، فولاد ST37 و فولاد ضد زنگ مورد آزمایش بارگذاری چرخه‌ای قرار داده شده است. در ادامه نتایج آزمایش را بر اساس معیارهای پذیرش میراگرهای حساس به جابجایی، موجود در دستورالعمل FEMA356 ارزیابی کردند. نتایج مطالعات آنها حاکی از آنست که آلومینیوم و فولاد ST37، حلقه‌های نمودار بار-جابجایی پایداری با اندکی کاهش در بار لغزش دارند، همچنین سایدگی لایه اصطکاکی آلومینیومی نسبت به لایه‌های فولادی روی‌اندود و فولادی ST37 بیشتر است. البته بر اساس معیارهای پذیرش FEMA356 فقط لایه آلومینیومی قابل قبول است ولی به دلیل سایش زیاد بعد از زلزله شدید باید با لایه جدید جایگزین شود. در سال ۲۰۱۸ لاتور<sup>۳</sup> و همکاران [۱۵] به بررسی عددی و آزمایشگاهی دو نوع اتصال اصطکاکی در قاب فولادی پرداختند. برای این منظور ابتدا دو نوع اتصال دارای سطح لغزش افقی و قائم ساخته و مورد آزمایش قرار دادند. سپس با استفاده از نرم افزار Abaqus مدل آزمایشگاهی، راستی‌آزمایی و توسعه داده شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که هر دو اتصال، میرایی انرژی خوبی داشته‌اند. در سال ۲۰۱۷ پرز<sup>۴</sup> و همکاران [۱۶] با استفاده از الگوی بهینه سازی استوار<sup>۵</sup>، روشی برای بهینه نمودن نیروی لغزش میراگرهای اصطکاکی و مکان یابی مناسب میراگرهای اصطکاکی در سازه، ارائه دادند. سپس با استفاده از این روش، سازه بتن مسلح واقع در شهر کلومبیا<sup>۶</sup> را طراحی و تحلیل کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از روش

<sup>1</sup> Valdivia

<sup>2</sup> Haiti

<sup>3</sup> Latour

<sup>4</sup> Perez

<sup>5</sup> Robust simultaneous optimization

<sup>6</sup> Colombian

بهینه سازی استوار، باعث کاهش خرابی سازه در هنگام زلزله خواهد شد. در سال ۲۰۱۵ میرزایی فر و میرطاهری [۱۷] به ارزیابی لرزه‌ای و انتخاب بهینه حالت قرار گیری میراگر اصطکاکی استوانه‌ای پرداختند. برای این منظور ابتدا قاب ۶ طبقه ۳ دهانه، طراحی کردند و سپس بدون میراگر اصطکاکی و با میراگر اصطکاکی استوانه‌ای، که میراگرها به سه صورت قطری، زانویی و لوزی شکل در قاب قرار گرفته بودند، تحت زلزله السنترو، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سازه دارای میراگر اصطکاکی استوانه‌ای نسبت به سازه بدون میراگر، عملکرد بهتری دارد. همچنین مقدار انرژی میرا شده و پاسخ لرزه‌ای سازه دارای میراگر که میراگر اصطکاکی استوانه‌ای به صورت قطری در آن قرار گرفته است، بهتر است.

با توجه به تحقیقات گذشتگان، در تغییر شکل‌های مساوی، میراگرهای اصطکاکی بیشترین انرژی را میرا می‌کنند و مقدار انرژی میرا شده توسط آن بستگی به پارامترهایی همچون شتاب ورودی به سازه، زبری و نرمی سطوح و ... دارد. از طرفی تمرکز اصلی تحقیقات گذشته بر روی بررسی میراگرهای اصطکاکی دارای یک بار لغزش بوده است. بنابراین ضرورت و اهمیت پرداختن به نسل جدید میراگرهای اصطکاکی که دارای دو بار لغزش هستند و توانایی بهتری در کنترل ارتعاشات را دارند، کاملاً مشهود و قابل احساس می‌باشد. بنابراین هدف اصلی در این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی میراگر اصطکاکی-دورانی دارای دو بار لغزش و ارزیابی رفتار لرزه‌ای قاب بتن مسلح دارای آن، می‌باشد. برای این منظور پس از مقدمه، به توضیح طرح میراگر پیشنهادی پرداخته خواهد شد. در مرحله بعد مراحل انجام آزمایش‌ها شرح و نتایج به دست آمده مورد بحث قرار می‌گیرد. پس از آن با استفاده از نرم افزار Opensees نتایج آزمایشگاهی راستی‌آزمایی خواهد شد. در نهایت قاب بتن مسلح بدون میراگر، با میراگر اصطکاکی-دورانی دارای دو بار لغزش و با میراگر اصطکاکی-دورانی دارای یک بار لغزش، مورد بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته و رفتار آنها ارزیابی و مقایسه خواهد شد.

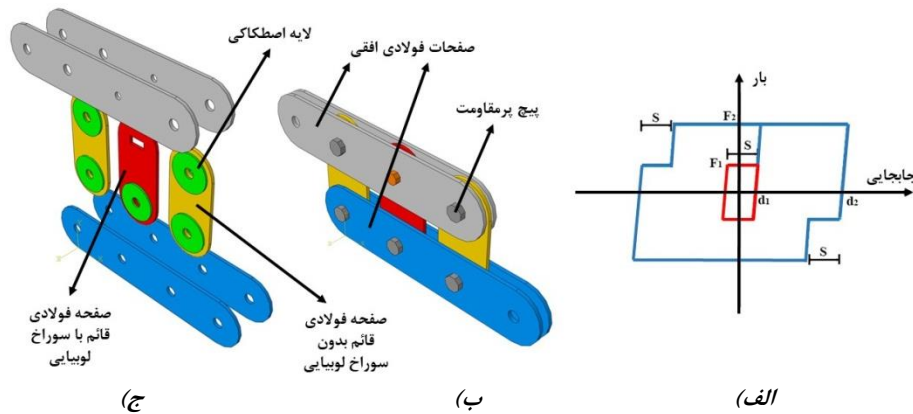
## ۲- سازوکار عملکرد میراگر اصطکاکی-دورانی پیشنهادی :

میراگرهای اصطکاکی از طریق پدیده اصطکاک بین ورق‌های فولادی و لایه‌های اصطکاکی که به وسیله پیچ‌های پرمقاومتی بهم متصل شده‌اند، انرژی ورودی به سازه را میرا می‌کنند. مقدار انرژی میرا شده ناشی از میراگرهای اصطکاکی در سازه، بستگی به مقدار نیروی لغزش میراگر اصطکاکی دارد. در صورتی که مقدار نیروی لغزش میراگر اصطکاکی کمتر از مقدار بهینه آن باشد، تحت تحریکات ضعیف باد یا زلزله فعال می‌شود و اگر مقدار نیروی لغزش بزرگتر از مقدار بهینه آن باشد، آنگاه میراگر اصطکاکی فعال نمی‌شود و سازه شبیه به سازه دارای مهاربند عمل می‌کند [۱۲، ۱۸، ۱۹]. از طرفی تعیین دقیق نیروی لغزش بهینه کار مشکلی است، به دلیل اینکه، طبق تحقیقات نبید<sup>۱</sup> و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۹ مقدار نیروی لغزش بستگی به انرژی ورودی به سازه دارد. با افزایش مقدار انرژی ورودی به سازه، برای افزایش انرژی میرا شده، باید مقدار بار لغزش افزایش پیدا کند. بنابراین در این تحقیق میراگر اصطکاکی پیشنهاد شده است که دو نیروی لغزش داشته باشد و با افزایش انرژی ورودی به سازه مقدار انرژی میرا شده ناشی از میراگر اصطکاکی افزایش پیدا می‌کند. شکل ۱ میراگر اصطکاکی پیشنهادی در این تحقیق و نمودار بار-جابجایی آن را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، این میراگر از بازوهای فولادی، لایه‌های اصطکاکی مدور، صفحات فولادی و پیچ‌های پرمقاومت، تشکیل شده است. در این میراگر مانند سایر انواع دیگر میراگرهای اصطکاکی نیروی عمودی که باعث به وجود آمدن اصطکاک بین سطح فولادی و لایه اصطکاکی مدور می‌شود، از طریق پیچ‌های پرمقاومت تامین خواهد شد. بر روی صفحه فولادی قرمز رنگ، سوراخ لوبیایی مستطیلی شکلی وجود دارد که باعث می‌شود بازوی فولادی قرمز رنگ، در تحریکات ضعیف تا متوسط فعال نشود. طول سوراخ مستطیلی به گونه‌ای است که، جوابگوی دامنه منفی و مثبت حرکت میراگر پیشنهادی در تحریکات ضعیف تا متوسط، باشد. در این نوع میراگر در صورتی که تغییر مکان وارد بر میراگر کمتر از نصف طول سوراخ مستطیلی باشد، آنگاه فقط بازوهای زرد

<sup>۱</sup> Nabid

رنگ فعال می‌شوند و بازوی قرمز رنگ غیر فعال است. همچنین اگر تغییر مکان وارد بر میراگر، بیش از نصف طول سوراخ مستطیلی باشد، در حالت رفت، ابتدا بازوهای فولادی زرد رنگ فعال می‌شوند، سپس بعد از رسیدن تغییر مکان میراگر به مقدار نصف طول سوراخ مستطیلی، بازوی فولادی قرمز رنگ نیز فعال می‌شود. در حالت برگشت، ابتدا بازوهای زرد رنگ فعال می‌شوند، سپس بعد از اینکه تغییر مکان میراگر به حد طول سوراخ مستطیلی رسید، آنگاه بازوی قرمز رنگ فولادی نیز فعال می‌شود. این میراگر مثل سایر میراگرهای اصطکاکی، وابسته به جابجایی است و قابلیت نصب آسان و به صورتهای گوناگون در سازه را دارد.



شکل (۱): الف) نمودار بار-جابجایی ایده آل میراگر اصطکاکی دورانی با دو بار لغزش (ب) شکل کلی میراگر (ج) اجزای تشکیل دهنده میراگر اصطکاکی دورانی با دو بار لغزش

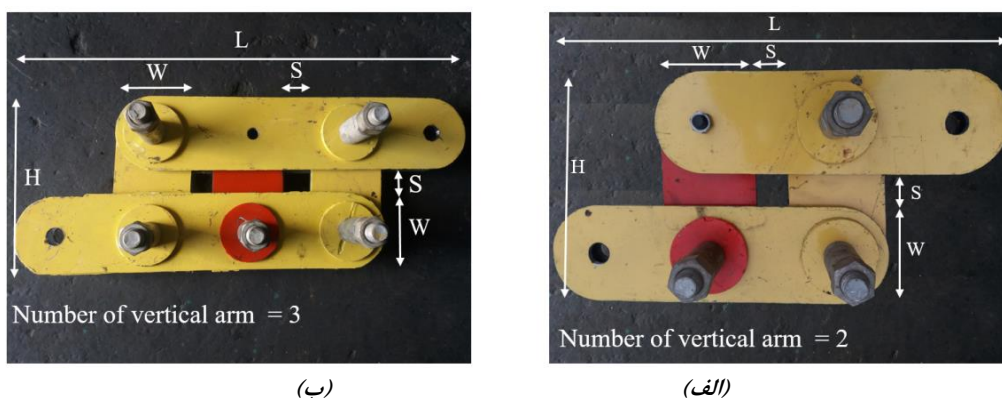
در شکل (۱) قسمت الف، طول سوراخ لوبیایی،  $d_1$  و  $d_2$  به ترتیب حداکثر تغییر مکان میراگر تحت زلزله متوسط و شدید و همچنین  $F_1$  و  $F_2$  نیروی لغزش مورد نیاز برای میراگر در زلزله با شدت متوسط و شدید می‌باشد.

### ۳- برنامه آزمایشگاهی :

#### ۳-۱- مشخصات هندسی نمونه های مورد مطالعه

در این تحقیق با توجه به هدف اصلی، که بررسی آزمایشگاهی میراگرهای اصطکاکی-دورانی با دو بار لغزش می‌باشد، دو نمونه از میراگرهای پیشنهادی اصطکاکی-دورانی با دو بار لغزش متفاوت به نام  $S_01$  و  $S_02$ ، ساخته شده است. نمونه های آزمایشگاهی در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.

برای هر دو نمونه ی آزمایشگاهی ظرفیت های جابجایی یکسانی در نظر گرفته شده است اما بار لغزش میراگرها با هم متفاوت می‌باشد. بارهای لغزش و ظرفیت های جابجایی بر اساس تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شده بر روی قاب بتن مسلح ۷ طبقه با ۳ دهانه ی ۵ متری که ارتفاع هر طبقه ی آن ۳/۲ متر بوده، انتخاب شده است. در جدول (۱) مشخصات بارهای لغزش و ظرفیت های جابجایی همچنین مشخصات ابعادی هر نمونه، نشان داده شده است.



شکل (۲): الف) نمونه آزمایشگاهی  $S_01$  (ب) نمونه آزمایشگاهی  $S_02$

جدول (1): مشخصات هندسی و ظرفیت جابجایی و نیروی لغزش نمونه‌های آزمایشگاهی

| Specimen | Displacement Capacity (mm) |     | H (mm) | L (mm) | W (mm) | T (mm) | S (mm) | N |
|----------|----------------------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|---|
|          | D 1                        | D 2 |        |        |        |        |        |   |
| S 01     | 15                         | 70  | 350    | 500    | 150    | 12     | 50     | 2 |
| S 02     | 15                         | 70  | 350    | 750    | 150    | 12     | 50     | 3 |

T= Thickness of plates, N=Number of vertical arms

### ۳-۲- مصالح مورد استفاده برای ساخت نمونه های آزمایشگاهی

برای ساخت بازوهای افقی و قائم، از فولاد ST37 استفاده شده است. ضخامت بازوهای افقی و قائم فولادی، دوازده میلیمتر می باشد، این ضخامت به گونه ای انتخاب شده است که میراگرهای ساخته شده در اتصالات اتکایی در اثر فشار تماسی ناشی از پیچ، ورق های فولادی دچار گسیختگی نشوند. ورق های فولادی با استفاده از دستگاه برش CNC<sup>۱</sup> و با دقت یک میلیمتر برشکاری شدند. پس از آن به منظور پرداختکاری و صیقلی نمودن بدنه سوراخ های استاندارد و لوبیایی در بازوهای افقی و قائم، از فرز انگشتی استفاده شده است. ابعاد سوراخ های استاندارد و لوبیایی با توجه به ضوابط مقررات ملی ساختمان ایران انتخاب شده اند. در همه ی نمونه های آزمایشگاهی از سوراخ استاندارد به قطر ۳۲ میلیمتر و از سوراخ لوبیایی به ارتفاع ۲۷ و عرض ۵۴ میلیمتر استفاده شده است. پس از برشکاری و سوراخکاری، قطعات فولادی رنگ آمیزی شدند.

لنت های مورد استفاده در این تحقیق به صورت دایره ای، به قطر داخلی ۳۲ میلیمتر و قطر خارجی ۱۵۰ میلیمتر و ضخامت ۶ میلیمتر می باشند. برای ساخت لنت ها از دو عدد تخته لنت کارخانه جهان ترمز به ابعاد ۶×۵۰×۵۰ میلیمتر از جنس لنت کم فلز با ضریب اصطکاک ۰/۵ استفاده شده است. تخته لنت های مورد نظر با استفاده از دستگاه CNC واتر جت برش داده شده اند.

در اجزای سازه ای تحت بارهای متناوب و پدیده خستگی، پیچ های پرمقاومت با عملکرد اصطکاکی کارایی بهتری دارند. به همین جهت در این تحقیق، در سوراخ های استاندارد از پیچ پرمقاومت M10.9 به قطر ۳۰ میلیمتر و طول ۲۰ سانتی متر و از جنس فولاد ضد زنگ و در سوراخ های لوبیایی از پیچ پرمقاومت M10.9 فولادی به قطر ۲۰ میلیمتر و طول ۷ سانتی متر استفاده شده است. پیچ های مورد استفاده به صورت شش گوشه و تمام رزوه هستند که دارای تنش تسلیم ۹۰۰ و تنش نهایی ۱۰۰۰ مگاپاسکال هستند.

همچنین در همه ی نمونه های ساخته شده، از واشرها به منظور ثابت ماندن نیروی عمودی اصطکاکی و پخش یکنواخت نیروی پیش تنیدگی در سطح تماسی، استفاده شده است. برای این منظور در زیر کله پیچ از واشر تخت فلزی به قطر داخلی ۳۲ میلیمتر و قطر خارجی ۵۰ میلیمتر و ضخامت ۲ میلیمتر استفاده شده است. همچنین در زیر آن از واشر تخت فلزی به قطر داخلی ۳۲ میلیمتر و قطر خارجی ۱۵۰ میلیمتر و ضخامت ۱۲ میلیمتر استفاده شده است. همچنین به منظور پخش یکنواخت تر نیروی عمودی اصطکاکی از بوش فلزی از جنس فولاد ضد زنگ به قطر داخلی ۳۵ میلیمتر و قطر خارجی ۴۰ میلیمتر و طول ۱۰ سانتیمتر استفاده شده است. پس از تهیه مصالح مورد نیاز نمونه های آزمایشگاهی با استفاده از آچار گشتاور سنج بسته شده اند.

### ۳-۳- پیکربندی آزمایش

تمامی نمونه ها در آزمایشگاه سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه، مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفته اند. نحوه برپایی نمونه ها در شکل ۳ قسمت الف و ب نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، برای آزمایش نمونه ها از یک تکیه گاه صلب استفاده شده است. پس از نصب تکیه گاه صلب در آزمایشگاه، با

<sup>۱</sup> Computer Numerical Control



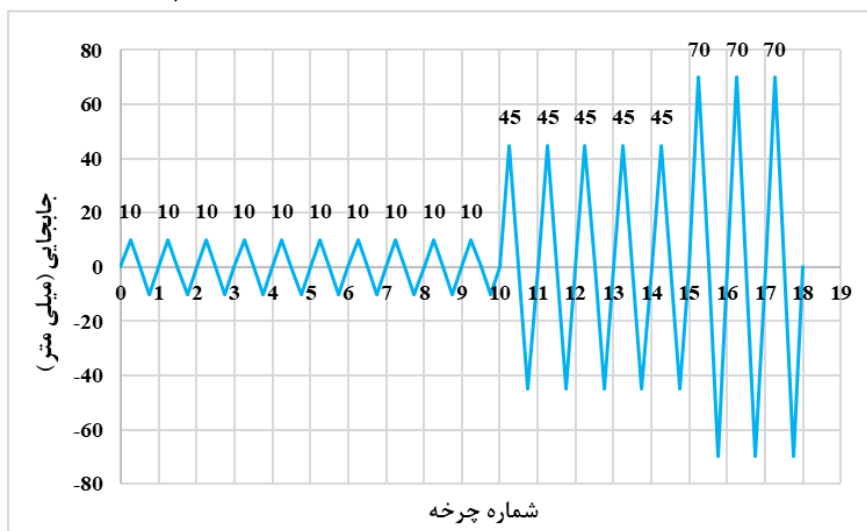
استفاده از صفحه اتصال کاملاً صلب، نمونه‌های آزمایشگاهی به صورت مفصلی به تکیه گاه وصل شده‌اند. طرف دیگر نمونه‌های آزمایشگاهی نیز با استفاده از قطعه فولادی صلبی به سر جک هیدرولیکی به صورت مفصلی متصل شده است. برای ثبت مقدار تغییر مکان نمونه‌های آزمایشگاهی از تغییر مکان سنج اهوومی (LTP)<sup>۱</sup> استفاده شده است. در این تحقیق تغییر مکان سنج بر روی جک هیدرولیکی نصب شده است. همچنین برای آزمایش نمونه‌ها از جک هیدرولیکی ۱۰۰ تن موجود در آزمایشگاه سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه استفاده شده است. پس از نصب پیکربندی آزمایش و قرار دادن نمونه‌ها، جهت انجام بارگذاری ابتدا جک هیدرولیکی را کالیبره نموده، سپس طبق الگوی بارگذاری در نظر گرفته شده که در شکل (۳) قسمت (ج) نشان داده شده است، بارگذاری اعمال می‌گردد.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل (۳): (الف) پیکربندی آزمایش برای نمونه S01 (ب) پیکربندی آزمایش برای نمونه S02 (ج) پروتکل بارگذاری نمونه‌های آزمایشگاهی

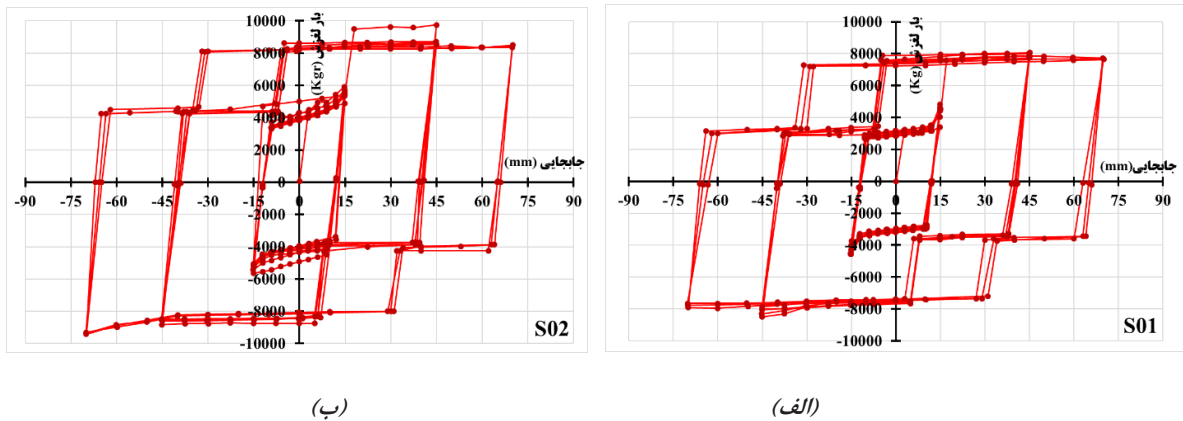
#### ۴- بررسی نتایج آزمایشگاهی :

انرژی ورودی زلزله به سازه زمانی توسط میراگرها میرا می‌گردد که میراگر عملکرد مورد انتظار مهندس طراح را داشته باشد. به عبارت بهتر، تحت بار لغزش مورد انتظار شروع به لغزش کند و تا آخرین حد ظرفیت جابجایی، میراگر دچار آسیب نگردد. به همین جهت به منظور ارزیابی کیفیت میراگرهای پیشنهادی، نمودار بار-جابجایی میراگر، بار لغزش، سختی موثر، میرایی موثر نمونه‌های آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

<sup>۱</sup> Linear Transducers Potentiometer

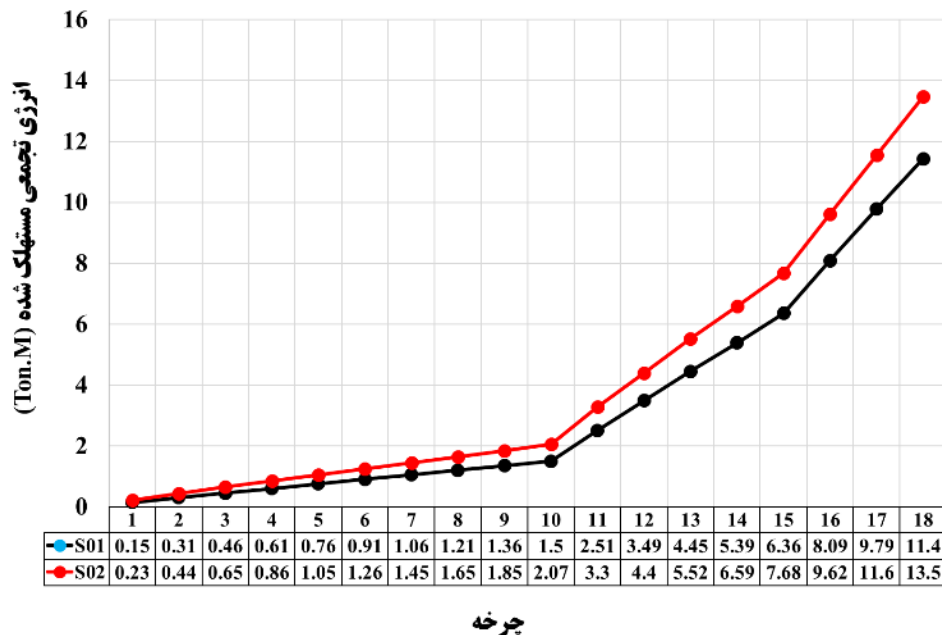
#### ۴-۱- نمودار بار-جابجایی میراگر:

یکی از موارد مهمی که در بررسی رفتار میراگر مورد بررسی قرار می‌گیرد، نمودار بار-جابجایی است. نمودار بار-جابجایی نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): نمودار بار-جابجایی نمونه‌های آزمایشگاهی (الف) S01، (ب) S02

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، نمودار بار-جابجایی نمونه اول، منظم ولی نمودار بار-جابجایی نمونه دوم نامنظم است، البته از این نامنظمی می‌توان چشم‌پوشی کرد به دلیل اینکه برای قابل پیش‌بینی بودن رفتار و عملکرد میراگر اصطکاکی-دورانی پیشنهادی مشکلی پیش نخواهد آورد. همچنین همه‌ی نمونه‌ها در حین بارگذاری دچار هیچگونه آسیب و گسیختگی نشده‌اند. در شکل (۵) نمودار انرژی میرا شده جمع‌شده برای هر نمونه-ی آزمایشگاهی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پس از افزایش بار لغزش شیب نمودار انرژی میرا شده در همه‌ی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. همچنین بر اساس شکل (۵) نمونه‌ی دوم مقدار انرژی میرا شده‌ی بیشتری دارد.

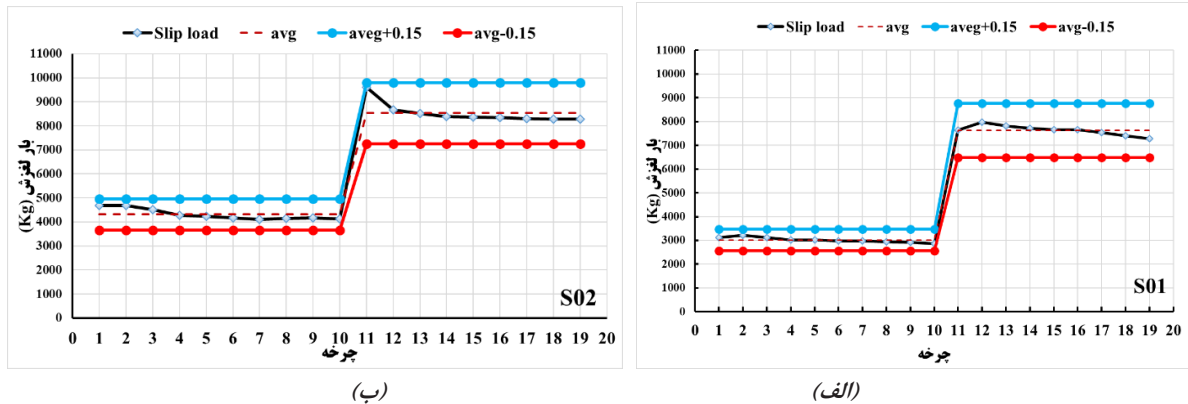


شکل (۵): مقایسه انرژی میرا شده جمع‌شده نمونه‌های آزمایشگاهی

#### ۴-۲- بار لغزش:

نیروی لغزش نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل ۶ نشان داده شده است.





شکل (۶): مقایسه بار لغزش هر چرخه با بار لغزش میانگین نمونه آزمایشگاهی (الف) S01 (ب) S02

طبق آیین نامه ASCE41-06 بار لغزش در هر چرخه نباید بیش از ۱۵ درصد با میانگین بار لغزش در همه ی چرخه‌ها تفاوت داشته باشد. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می شود، در همه ی نمونه های آزمایشگاهی مقدار بار لغزش در محدوده ی مجاز آیین نامه ASCE41-06 می باشد. همچنین به مرور زمان مقدار هر دوی نیروی لغزش برای همه ی نمونه های آزمایشگاهی کاهش یافته است. این کاهش در نمونه دوم و در بار لغزش دوم بیشتر است که علت این اتفاق می تواند چسپندگی در سطوح تماس در ابتدای لغزش باشد. به عبارت بهتر، زمانیکه میراگر شروع به فعال شدن می کند، دو سطح به هم چسپیده هستند و برای فعال شدن میراگر باید به نیروی چسپندگی غلبه شود. در جدول (۲) مقدار میانگین بار لغزش برای هر نمونه نشان داده شده است.

جدول (۲): میانگین نیروی لغزش نمونه های آزمایشگاهی

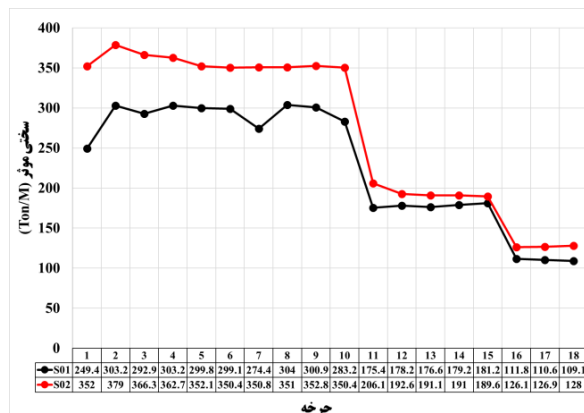
| میانگین بار لغزش F2 (کیلوگرم) | میانگین بار لغزش F1 (کیلوگرم) | نمونه آزمایشگاهی |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------|
| 7629.7                        | 3017.9                        | میراگر S01       |
| 8526.9                        | 4310.8                        | میراگر S02       |

#### ۳-۴ - سختی موثر :

از سختی موثر برای شبیه سازی رفتار غیرخطی میراگر اصطکاکی در تحلیل غیرخطی سازه های دارای میراگر اصطکاکی استفاده خواهد شد. مقدار سختی موثر در هر چرخه را از رابطه زیر به دست می آورند.

$$K_{eff}^i = \frac{(|P_{i,max}^+| + |P_{i,max}^-|)}{(|\delta_{i,max}^+| + |\delta_{i,max}^-|)} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $\delta_{i,max}^+$  و  $\delta_{i,max}^-$  به ترتیب حداکثر جابجایی مثبت و حداکثر جابجایی منفی در حداکثر نیروی مثبت ( $P_{i,max}^+$ ) و حداکثر نیروی منفی ( $P_{i,max}^-$ ) در هر چرخه می باشند. در شکل (۷) مقدار سختی موثر در هر چرخه برای هر نمونه آزمایشگاهی نشان داده شده است.



شکل (۷): مقدار سختی موثر در هر چرخه برای هر نمونه آزمایشگاهی

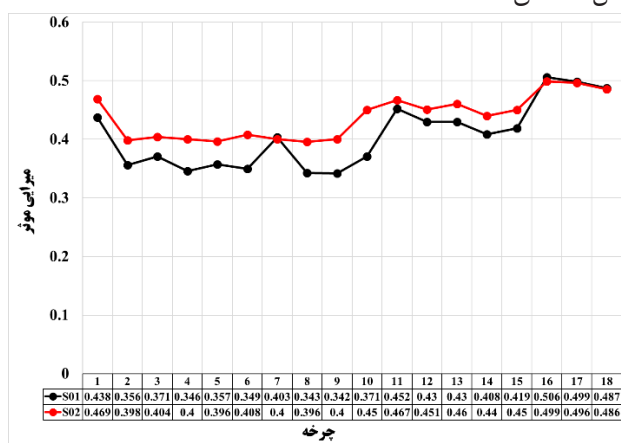
با توجه به شکل (۷)، افزایش بار لغزش سبب افزایش سختی خواهد شد، به گونه‌ای که بیشترین و کمترین سختی موثر در همه چرخه‌ها، مربوط به نمونه آزمایشگاهی S01 و S02 بوده است. همچنین با افزایش میزان جابجایی وارد بر نمونه‌های آزمایشگاهی میزان سختی موثر کاهش یافته است، به گونه‌ای که در همه‌ی نمونه‌های آزمایشگاهی کمترین مقدار سختی موثر مربوط به سه چرخه آخر بوده است.

#### ۴-۴- میرایی موثر :

یکی دیگر از مشخصه‌هایی که برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی میراگرهای اصطکاکی در تحلیل سازه‌های دارای میراگر اصطکاکی مورد استفاده قرار می‌گیرد، میرایی موثر است. میرایی موثر در واقع بیانگر ظرفیت میرایی انرژی سازه است [۲۱، ۲۲]. در این تحقیق برای تعیین میرایی موثر از رابطه ارائه شده در آیین نامه FEMA356 استفاده شده است. این رابطه به صورت زیر است.

$$\beta_{eff}^i = \frac{1}{4\pi} \times \frac{E_{loop}^i}{E_{es}^i} = \frac{2}{\pi} \times \frac{E_{loop}^i}{K_{eff}^i (|\delta_{i,max}^+| + |\delta_{i,max}^-|)^2} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $K_{eff}^i$  سختی موثر در هر چرخه و  $E_{loop}^i$  و  $E_{es}^i$  به ترتیب انرژی میرا شده و انرژی الاستیک در هر چرخه می‌باشد. همچنین،  $\delta_{i,max}^+$  و  $\delta_{i,max}^-$  به ترتیب حداکثر جابجایی مثبت و حداکثر جابجایی منفی در حداکثر نیروی مثبت ( $P_{i,max}^+$ ) و حداکثر نیروی منفی ( $P_{i,max}^-$ ) در هر چرخه می‌باشند. مقدار میرایی موثر در هر چرخه و برای هر نمونه آزمایشگاهی در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل (۸): مقدار میرایی موثر نمونه‌های آزمایشگاهی

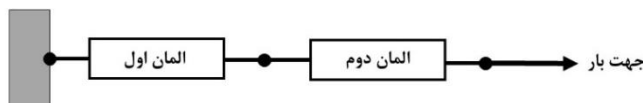
با توجه به شکل ۸، در پایان چرخه نهم، که هنوز بار لغزش دوم میراگرها فعال نشده است، مقدار میرایی موثر برای نمونه‌ی S01 و S02 به ترتیب برابر ۰/۳۴ و ۰/۴ می‌باشد و همچنین در پایان چرخه ۱۸ این مقدار برای هر دو آنها ۰/۴۸ خواهد رسید. بنابراین با توجه به این مقادیر، از این نوع میراگرها به منظور کاهش خسارات ناشی از زلزله، می‌توان استفاده نمود. همچنین با توجه به شکل (۸)، بر خلاف سختی موثر، میرایی موثر با افزایش میزان جابجایی وارد بر نمونه‌های آزمایشگاهی، مقدار میرایی موثر افزایش یافته است.

#### ۵- مدل‌سازی عددی

پس از ارزیابی عملکرد نمونه‌های آزمایشگاهی در آزمایشگاه، اقدام به بررسی عددی تاثیر میراگر اصطکاکی دورانی دارای دوبار لغزش در قاب بتن مسلح و مقایسه آن با میراگر اصطکاکی دورانی معمولی پرداخته خواهد شد. برای این منظور ابتدا باید مدل پیشنهادی رفتاری برای میراگر اصطکاکی-دورانی دارای دوبار لغزش راستی آزمایشی خواهد شد، پس از آن به بررسی رفتار لرزه‌ای قاب یک دهانه-یک طبقه بدون میراگر، دارای میراگر اصطکاکی-دورانی دارای دوبار لغزش و دارای میراگر اصطکاکی-دورانی دارای یک بار لغزش، تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداخته خواهد شد. در نهایت پاسخ قاب‌ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار خواهد گرفت.

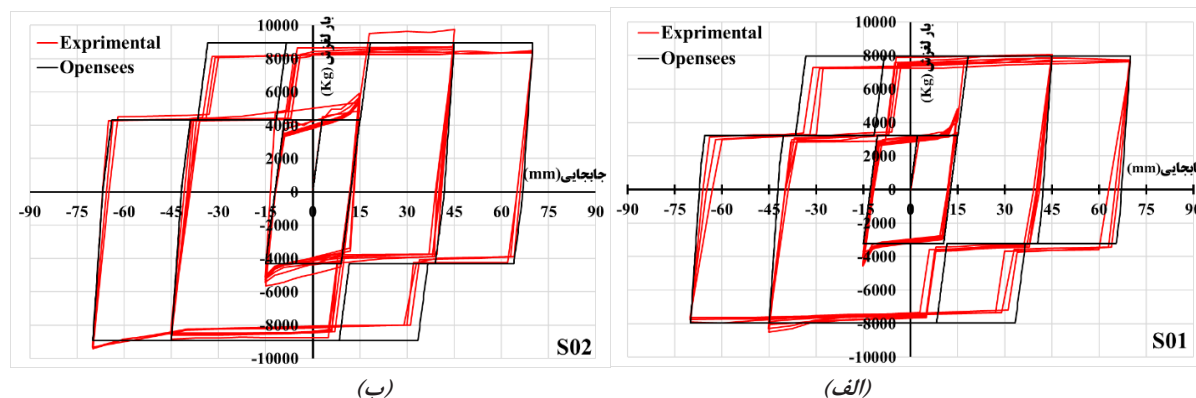
## ۵-۱- راستی آزمایشی نمونه‌های آزمایشگاهی میراگر اصطکاکی دورانی دارای دو بار لغزش

برای مدلسازی میراگر پیشنهادی در نرم افزار Opensees از دو جزء<sup>۱</sup> فنر با طول صفر<sup>۲</sup> که به صورت سری به هم وصل شده‌اند، استفاده خواهد شد. به طوری که برای جابجایی‌های زیر ۱۵ میلیمتر در حالت بارگذاری و باربرداری فقط جزء اول فعال خواهد شد. برای جابجایی‌های بیش از ۱۵ میلیمتر، در حالت بارگذاری ابتدا جزء اول و سپس جزء دوم فعال خواهد شد و همچنین در حالت باربرداری ابتدا جزء اول فعال خواهد شد سپس جزء دوم فعال می‌گردد. در جزء اول، سه مصالح الاستوپلاستیک کامل، الاستوپلاستیک با گپ مثبت و الاستوپلاستیک با گپ منفی به صورت موازی استفاده شده‌اند، که مقدار گپ در هر دو جهت به اندازه مقدار سوراخ لوبیایی در نظر گرفته شده است. در شکل (۹) نحوه‌ی تشکیل مدل عددی میراگرها نشان داده شده است.



شکل (۹): مدل عددی نمونه‌های آزمایشگاهی

نتایج راستی آزمایشی میراگر اصطکاکی دورانی دارای دو بار لغزش در شکل (۱۰) نشان داده شده است. بر مبنای شکل (۱۰)، مدل پیشنهادی رفتاری برای میراگر اصطکاکی-دورانی دارای دو بار لغزش تطابق خوبی با نمونه‌های آزمایشگاهی دارد. البته نیاز به پارامترهای مختلف و پیچیده موجب اختلاف اندک بار لغزش نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی میراگر شده، که به نظر می‌رسد این اختلاف اندک در بار لغزش بر روی پاسخ لرزه‌ای قاب بتن مسلح دارای میراگر اصطکاکی تاثیر چشم گیری نخواهد داشت.



شکل (۱۰): نتایج راستی آزمایشی در نرم افزار Opensees برای نمونه آزمایشگاهی الف (S01) ب (S02)

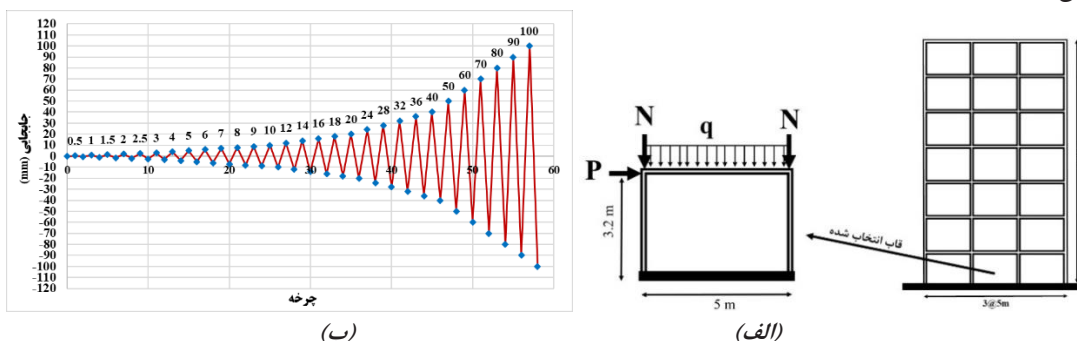
## ۵-۲- فرضیات طراحی و تحلیل قاب بتن مسلح

در این تحقیق پس از پیشنهاد میراگر اصطکاکی، به ارزیابی عملکرد آن در قاب بتن مسلح تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداخته می‌شود. برای این منظور، در ابتدا برای اطمینان به مدلسازی قاب بتن مسلح در نرم افزار Opensees، ابتدا نمونه آزمایشگاهی قاب بتن مسلح یک دهانه-یک طبقه توفیق عیسی و همکاران [۲۳] مدلسازی و نتایج مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. پس از صحت سنجی مدلسازی قاب بتن مسلح، طبق مبحث ششم و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و استاندارد ۲۸۰۰ ایران، قاب بتن مسلح هفت طبقه، که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، طراحی و تحلیل شده است. در تحلیل و طراحی این قاب مقدار بار مرده ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار زنده ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است. برای طراحی ساختمان مورد نظر از بتن با مقاومت فشاری مشخصه ۲۱ مگاپاسکال استوانه‌ای و از آرماتور رده S400 و S340 به ترتیب برای آرماتور طولی و عرضی استفاده

<sup>1</sup> Element

<sup>2</sup> Zero length element

شده است. در شکل (۱۱) قاب یک دهانه-یک طبقه انتخاب شده در این تحقیق، نشان داده شده است. عرض و ارتفاع مقطع تیر در قاب یک دهانه-یک طبقه انتخاب شده برای بارگذاری چرخه‌ای به ترتیب ۴۰ و ۵۰ سانتی متر و دارای ۴ آرماتور به قطر ۲۴ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین مقطع ستون به صورت مربعی به ضلع ۶۰ سانتی متر است، که دارای ۱۶ آرماتور به قطر ۲۴ میلیمتر می‌باشد. میراگر اصطکاکی دورانی در این تحقیق به منظور بهسازی لرزه‌ای و به صورت قطری در قاب قرار می‌گیرد. دستورالعمل بارگذاری قاب بتن مسلح، در مدل‌های عددی در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۱): الف) قاب یک دهانه-یک طبقه انتخاب شده برای بارگذاری چرخه‌ای ب) دستورالعمل بارگذاری نمونه‌های عددی قاب بتن مسلح در مدل‌سازی قاب‌های بتن مسلح، نمودار تنش-کرنش بتن بر اساس مدل رفتاری هسو و همکاران (۱۹۹۴) [۲۴] در نظر گرفته شده، همچنین برای بتن محصور شده هسته تیر و ستون و بتن پوشش محصور نشده آنها از مصالح Concrete 01 استفاده شده است. در نمودار تنش-کرنش میلگرد فولادی، لاغرشوندگی<sup>۱</sup> در اثر نیروی فشاری، خرابی در اثر کمناش و کاهش مقاومت باید در نظر گرفته شود، بنابراین در این تحقیق، برای میلگردهای فولاد از مصالح Hysteretic استفاده شده است. برای تیر و ستون‌ها از جزء تیر ستون غیرخطی<sup>۲</sup> با مقطع الیافی<sup>۳</sup> استفاده شده است [۲۵].

## ۶- بحث و بررسی نتایج عددی

در این قسمت به بررسی نتایج حاصل از تحلیل چرخه‌ای قاب بدون میراگر اصطکاکی، قاب دارای میراگر اصطکاکی-دورانی با یک بار لغزش (RFD<sup>۴</sup>) و قاب دارای میراگر اصطکاکی-دورانی با دو بار لغزش از نوع S01 و S02 پرداخته می‌شود. برای این منظور، نمودار بار-جابجایی قابهای بتن مسلح، انرژی میرا شده تجمعی قاب بتن مسلح، مقاومت نهایی قاب و نمودار بار-جابجایی میراگرهای موجود در قاب مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

### ۶-۱- نمودار بار-جابجایی قاب بتن مسلح

نمودار بار-جابجایی قاب بتن مسلح، یکی از مهمترین مواردی است که می‌توان بر اساس آن رفتار لرزه‌ای قاب را مورد ارزیابی قرار داد. در شکل (۱۲)، نمودار بار-جابجایی قاب‌های بتن مسلح، نشان داده شده است.

بر اساس قسمت "الف" شکل (۱۲)، افزودن میراگر اصطکاکی-دورانی، سختی و شکل پذیری قاب را تغییر نداده است. همچنین هر دو نمودار از لحاظ باریک شدگی<sup>۵</sup> وسط نمودار و افت مقاومت شبیه هم هستند. اما نمودار مربوط به قاب دارای میراگر اصطکاکی-دورانی با یک بار لغزش (RFD) نسبت به نمودار قاب بدون میراگر دارای مقداری جهش است. بر اساس قسمت "ب" شکل (۱۲)، که در آن نمودار بار-جابجایی قاب بتن مسلح دارای میراگر اصطکاکی دورانی با یک بار لغزش و قاب بتن مسلح دارای میراگر اصطکاکی-دورانی از نوع S01 مقایسه شده است، بعد از فعال شدن نیروی لغزش دوم، نمودار بار-جابجایی قاب، مقداری جهش داشته است. به همین دلیل نمودار بار-جابجایی قاب دارای میراگر اصطکاکی-دورانی از نوع S01 نسبت به قاب

<sup>1</sup> Pinching

<sup>2</sup> Nonlinear Beam Column

<sup>3</sup> Fiber

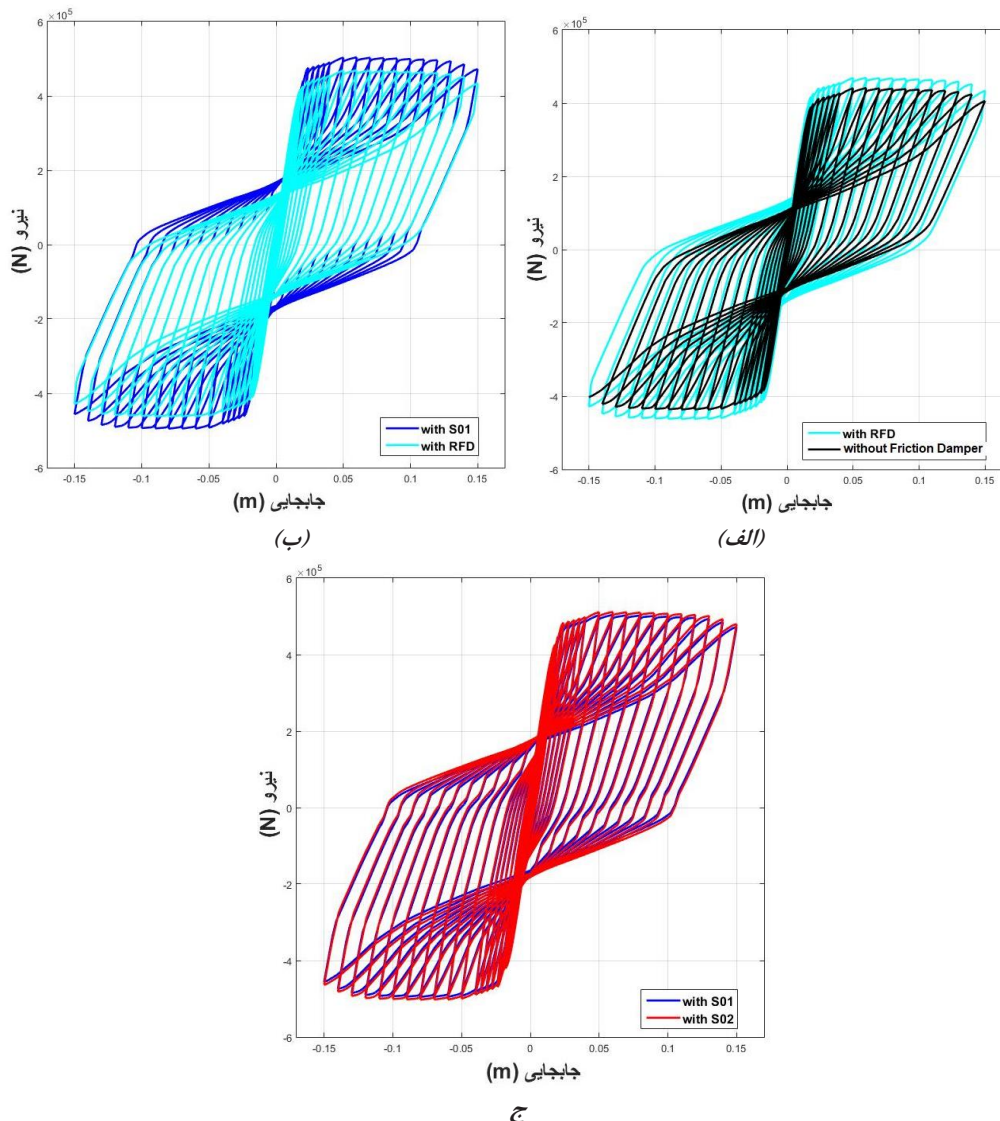
<sup>4</sup> Rotational Friction Damper

<sup>5</sup> Pinching

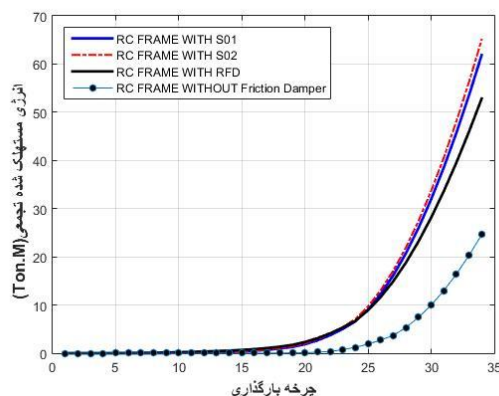
دارای میراگر اصطکاکی-دورانی دارای یک بار لغزش (RFD) چاقتر است. در قسمت "ج" شکل (۱۲)، نمودار بار-جابجایی قابهای بتن مسلح دارای میراگر اصطکاکی دورانی از نوع S01 و S02 مقایسه شده است. بر اساس قسمت "ج" شکل (۱۲)، نمودار بار-جابجایی قاب دارای میراگر اصطکاکی-دورانی S02 نسبت به نمودار بار-جابجایی قاب دارای میراگر اصطکاکی-دورانی S01 بهتر است.

### ۲-۶- انرژی تجمعی قاب بتن مسلح

انرژی میرا شده در هر چرخه، برابر سطح محصور شده به حلقه‌های محصور شده در آن چرخه است. در شکل (۱۳)، انرژی میرا شده تجمعی قاب‌های بتن مسلح نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، در هر چرخه انرژی تجمعی قاب دارای میراگر اصطکاکی-دورانی نسبت به قاب بدون میراگر بیشتر است. همچنین در قاب‌های دارای میراگر اصطکاکی-دورانی با دو بار لغزش، انرژی تجمعی مقدار بیشتری نسبت به قاب دارای میراگر اصطکاکی-دورانی با یک بار لغزش (RFD)، دارد. به بیان بهتر، انرژی میرا شده تجمعی چرخه آخر، در قاب بتن مسلح دارای میراگر اصطکاکی-دورانی با یک بار لغزش (RFD)، در قاب بتن مسلح دارای میراگر اصطکاکی دورانی S01 و در قاب بتن مسلح دارای میراگر اصطکاکی دورانی S02 به ترتیب ۱۱۴ و ۱۵۱ و ۱۶۴ درصد بیشتر از قاب بتن مسلح بدون میراگر می‌باشد. در جدول (۳)، مقدار انرژی تجمعی در چرخه آخر برای قاب‌ها نشان داده شده است.



شکل (۱۲): مقایسه نمودار بار-جابجایی برای الف) قاب بدون میراگر و قاب دارای میراگر اصطکاکی-دورانی دارای یک بار لغزش (RFD) ب) قاب‌های بتن مسلح دارای میراگر اصطکاکی-دورانی دارای یک بار لغزش و میراگر اصطکاکی-دورانی S01 ج) قاب‌های بتن مسلح دارای میراگر S01 و S02



شکل (۱۳): مقایسه نمودار انرژی تجمعی قاب‌های بتن مسلح

### ۳-۶- مقاومت نهایی قاب‌های بتن مسلح

یکی دیگر از مهمترین پارامترها در بررسی رفتار لرزه‌ای قاب بتن مسلح، مقاومت نهایی آنها می‌باشد. مقدار مقاومت نهایی قاب‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. طبق جدول ۳، افزودن میراگر اصطکاکی-دورانی موجب افزایش مقاومت نهایی قاب بتن مسلح شده است، همچنین با افزایش بار لغزش، مقدار مقاومت نهایی قاب بتن مسلح افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که افزودن میراگر اصطکاکی-دورانی با یک بار لغزش، افزودن میراگر اصطکاکی S01 و افزودن میراگر اصطکاکی S02 به قاب بدون میراگر، به ترتیب موجب افزایش ۶، ۱۳/۴ و ۱۵ درصدی مقاومت نهایی آن شده است.

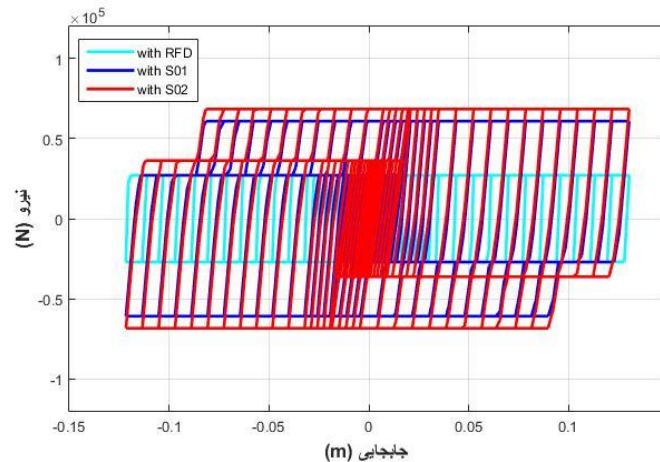
جدول (۳): انرژی تجمعی قاب بتن مسلح در چرخه آخر و مقاومت نهایی قاب بتن مسلح

| اختلاف انرژی تجمعی در چرخه آخر به انرژی تجمعی چرخه آخر قاب بدون میراگر (%) | انرژی تجمعی در چرخه آخر (ton.m) | اختلاف مقاومت نهایی به مقاومت نهایی قاب بدون میراگر (%) | مقاومت نهایی (ton) | قاب بتن مسلح                          |
|--|---------------------------------|---|--------------------|---------------------------------------|
| ۱  | ۲۴/۶                            | ۱   | ۴۳/۷               | قاب بدون میراگر                       |
| ۱۱۴  | ۵۲/۸                            | ۶   | ۴۶/۳               | قاب با میراگر دارای یک بار لغزش (RFD) |
| ۱۵۱  | ۶۱/۹                            | ۱۳/۴  | ۴۹/۵               | قاب با میراگر S01                     |
| ۱۶۴  | ۶۵                              | ۱۵  | ۵۰/۲               | قاب با میراگر S02                     |

### ۴-۶- نمودار بار-جابجایی میراگرهای موجود در قاب

به منظور مطالعه کارایی میراگرهای اصطکاکی-دورانی در این تحقیق، در شکل (۱۴) نمودار بار-جابجایی هر یک از میراگرهای اصطکاکی-دورانی در قاب‌ها نشان داده شده است. بر اساس شکل (۱۴)، میراگرهای اصطکاکی در بار لغزش مورد انتظار فعال شده‌اند، همچنین ظرفیت جابجایی مورد انتظار را داشته‌اند. همانطور که در شکل (۱۴) قابل مشاهده است، میراگر اصطکاکی-دورانی S02 بیشترین میرایی انرژی را نسبت به سایر میراگرها، داشته است. به همین دلیل عملکرد لرزه‌ای قاب بتن مسلح دارای میراگر اصطکاکی-دورانی S02 از سایر قاب‌ها بهتر بوده است.





شکل (۱۴): نمودار بار-جابجایی میراگرهای اصطکاکی-دورانی

## ۷- نتایج:

در این پژوهش هدف اصلی، بررسی آزمایشگاهی نوعی از میراگرهای اصطکاکی با دو نیروی لغزش و مقایسه آن با میراگرهای اصطکاکی-دورانی بوده است. برای این منظور ابتدا به ارزیابی آزمایشگاهی سه نمونه میراگر اصطکاکی-دورانی دارای دو بار لغزش، پرداخته شده است. در گام بعدی مدل رفتاری برای نمونه‌های آزمایشگاهی، تهیه و در نرم افزار راستی آزمایی شده است. در ادامه با استفاده از نرم افزار Opensees قاب بتن مسلح یک طبقه-یک دهانه در چهار حالت، بدون میراگر اصطکاکی، با میراگر اصطکاکی-دورانی دارای یک بار لغزش (RFD) و با میراگر اصطکاکی-دورانی دارای دو بار لغزش از نوع S01 و S02 تحت بارگذاری چرخه‌ای تحلیل و رفتار لرزه‌ای آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج اصلی این پژوهش به صورت زیر می‌باشند:

۱. در همه‌ی نمونه‌های آزمایشگاهی، نمودار بار-جابجایی از پایداری و منظمی قابل قبولی برخوردار بوده است. همچنین مقدار بار لغزش آنها در محدوده‌ی مجاز آیین نامه بوده است.
۲. مقدار سختی موثر در چرخه آخر برای نمونه S01 و S02 به ترتیب ۱۰۹ و ۱۲۸ تن بر متر بوده است، در حالیکه مقدار میرایی موثر هر دوی آنها در چرخه آخر حدوداً ۰/۴۸ می باشد، که این مقادیر به معنی توانایی مناسب نمونه‌های آزمایشگاهی در جذب انرژی زلزله و کاهش خسارات سازه‌ای، می باشد.
۳. میراگرهای اصطکاکی-دورانی تأثیری بر روی سختی اولیه قاب بتن مسلح نداشته است اما باعث افزایش مقاومت نهایی قاب بتن مسلح شده است. به گونه‌ای که مقاومت نهایی در قاب بتن مسلح دارای میراگر اصطکاکی-دورانی با یک بار لغزش (RFD) و قاب دارای میراگر S01 و قاب دارای میراگر S02 به ترتیب ۶، ۱۳/۴ و ۱۵ درصد بیشتر از مقاومت نهایی قاب بدون میراگر بوده است.
۴. میراگرهای اصطکاکی-دورانی اثر بیشتری بر روی میرایی انرژی سازه دارند. در این خصوص انرژی تجمعی قاب دارای میراگر اصطکاکی دورانی با یک بار لغزش (RFD)، قاب دارای میراگر S01 و قاب دارای میراگر S02 به ترتیب ۱۱۴، ۱۵۱ و ۱۶۴ درصد بیشتر از انرژی میرا شده تجمعی قاب بدون میراگر بوده است.
۵. مقاومت نهایی قاب دارای میراگر S01 و قاب دارای میراگر S02 به ترتیب ۴۹/۵ و ۵۰/۲ تن و همچنین انرژی تجمعی در سیکل آخر برای آنها به ترتیب ۶۱/۹ و ۶۵ تن متر می‌باشد. علت تفاوت اندک مقاومت نهایی و انرژی تجمعی در سیکل آخر برای قاب دارای نمونه S01 و S02 اینست که اولاً این دو میراگر ظرفیت جابجایی یکسانی دارند، ثانیاً بار لغزش آنها تفاوت اندکی دارد.

## ۸- قدردانی و تشکر:

کلیه آزمایش های این تحقیق با همکاری کارشناسان آزمایشگاه سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه انجام شده است. نویسندگان این مقاله بدین وسیله از همکاری عوامل یاد شده، تشکر و قدردانی می کنند.

## ۹- منابع :

- [۱] H. Luo, B. Ambrosius, R.M. Russo, V. Mocanu, K. Wang, M. Bevis, R. Fernandes, A recent increase in megathrust locking in the southernmost rupture area of the giant 1960 Chile earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, 537 (2020) 116200.
- [۲] R. DesRoches, M. Comerio, M. Eberhard, W. Mooney, G.J. Rix, Overview of the 2010 Haiti earthquake, *Earthquake Spectra*, 27(1\_suppl1) (2011) 1-21.
- [۳] Talebi, Ali and Jahangir, Hashem, 1396, Evaluation of the effect of geometric factors on the behavior of knee braces, *Fourth International Conference on New Technologies in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning (in persian)*
- [۴] TAHERIAN, Iman and GHALEHNOVI, Mansour and JAHANGIR, Hashem, 1394, ANALYTICAL STUDY ON COMPOSITE STEEL PLATE WALLS USING A MODIFIED STRIP MODEL, 7th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran.
- [۵] H. Jahangir, M. Bagheri, S.M.J. Delavari, Cyclic behavior assessment of steel bar hysteretic dampers using multiple nonlinear regression approach, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(2) (2021) 122.۷-۱۲۵۱
- [۶] Ghamari, A., Khaloo, A. (2020). Strengthening the RC Frames Using an Innovative Steel Damper with Shear Mechanism. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 5(2), 16-31. doi: 10.30478/jcsm.2020.224892.1150 (in persian)
- [۷] H. Jahangir, M. Bagheri, Evaluation of seismic response of concrete structures reinforced by shape memory alloys, *International Journal of Engineering*, 33(3) (2020) 410-418.
- [۸] B. Kavyashree, S. Patil, V.S. Rao, Review on vibration control in tall buildings: from the perspective of devices and applications, *International Journal of Dynamics and Control*, (2020) 1-16.
- [۹] S.P. LARIMI, Seismic response of steel frames with rotational friction damper, (2020).
- [۱۰] S.S. Sanghai, P.Y. Pawade, Effectiveness of friction dampers on seismic response of structure considering soil-structure interaction.
- [۱۱] O. Hussien, M. Elamy, Optimal Placement of Dampers on Multistorey Frames Using Dynamic Analysis, *Strength of Materials*, 52(3) (2020) 470-479.
- [۱۲] H. Jarrahi, A. Asadi, M. Khatibinia, S. Etedali, A. Samadi, Simultaneous optimization of placement and parameters of rotational friction dampers for seismic-excited steel moment-resisting frames, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 136 (2020) 106193.
- [۱۳] A.F. Santos, A. Santiago, M. Latour, G. Rizzano, L.S. da Silva, Response of friction joints under different velocity rates, *Journal of Constructional Steel Research*, 168 (2020) 106004.
- [۱۴] M. Anoushehei, F. Daneshjoo, S. Mahboubi, M. Hashemi, Empirical evaluation of cyclic behavior of rotational friction dampers with different metal pads, *scientiairanica*, ۳۰(۲۱)-۳۰(۲۹) (۲۰۱۸) (۶) ۲۵
- [۱۵] M. Latour, M. D'Aniello, M. Zimbru, G. Rizzano, V. Piluso, R. Landolfo, Removable friction dampers for low-damage steel beam-to-column joints, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115 (2018) 66-81.
- [۱۶] S.P. Ontiveros-Pérez, L.F.F. Miguel, L.F.F. Miguel, Robust Simultaneous Optimization of Friction Damper for the Passive Vibration Control in a Colombian Building, *Procedia engineering*, 199 (2017) 1743-1748.

- [۱۷] H. Mirzaeefard, M.M. Masoud Mirtaheri, *Evaluation of Seismic Behavior and Select Optimal Situation of Cylindrical Frictional Dampers in Steel Structures*, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2(4) (2016) 18-30.
- [۱۸] S. Sanghai, P. Pawade, *Optimal placement of friction dampers in building considering nonlinearity of soil*, *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(1) (2020) 1-18.
- [۱۹] N. Nabid, I. Hajirasouliha, M. Petkovski, *Multi-criteria performance-based optimization of friction energy dissipation devices in RC frames*, *Earthquakes and Structures*, 18(2.۱۸۵-۱۹۹ (۲۰۲۰) (
- [۲۰] N. Nabid, I. Hajirasouliha, M. Petkovski, *Simplified method for optimal design of friction damper slip loads by considering near-field and far-field ground motions*, *Journal of Earthquake Engineering*, (2019) 1-25.
- [۲۱] H. Jiang, S. Li, L. He, *Experimental study on a new damper using combinations of viscoelastic material and low-yield-point steel plates*, *Frontiers in Materials*, 6 (2019) 100.
- [۲۲] H.A. Amiri, E.P. Najafabadi, H.E. Estekanchi, *Experimental and analytical study of Block Slit Damper*, *Journal of Constructional Steel Research*, 141 (2018) 167-178.
- [۲۳] A.S.A. Tawfik Essa, M.R. Kotp Badr, A.H. El-Zanaty, *Effect of infill wall on the ductility and behavior of high strength reinforced concrete frames*, *HBRC Journal*, 10(3) (2014.۲۵۸-۲۶۴ (
- [۲۴] L. Hsu, C.-T. Hsu, *Complete stress—strain behaviour of high-strength concrete under compression*, *Magazine of concrete research*, 46(169) (1994) 301-312.
- [۲۵] moradi, R., khalilzadeh vahidi, E. (2018). *Comparison of Numerical Techniques of Masonry Infilled RC Frames for Lateral Loads*. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 3(2), 102-118. doi: 10.30478/jcsm.2019.82172
- [۲۶] R. Moradi, E. Khalilzadeh Vahidi, *General Study of New Ideas and Practical of Friction Dampers for Passive Vibration Control of Structures*, *Karafan Quarterly Research Journal*, 17(4) (2021) 231-248.