نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۲ شماره ۱، سال ۱۳۹۹، صفحات ۵۳ تا ۷۲
DOI: 10.22060/ceej.2018.14589.5700

بررسی آزمایشگاهی و عددی میراگر اصطکاکی ترکیبی

الهام مودب* ، بابک شهبازی

مؤسسه ی آموزش عالی غیردولتی و غیرانتفاعی سراج، تبریز، ایران

خلاصه: در این مقاله به معرفی و بررسی عددی و آزمایشگاهی میراگر اصطکاکی ترکیبی جدید موسوم به HFDپرداخته شده است. این میراگر ترکیب سری دو میراگر اصطکاکی با دو سطح نیروی لغزش (فیوز اصلی و کمکی) متفاوت است که قادر به اتلاف انرژی متناسب با دو سطح زمین‌لرزه‌ی متوسط و شدید می‌باشد. چهار نمونه‌ی آزمایشگاهی مطابق با ساختار پیشنهادی، تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفته است. نتایج منحنی‌های نیرو تغییر مکان نشان می‌دهد هندسه‌ی پیشنهاد شده می‌تواند به خوبی عملکرد دوسطحی را فراهم کند، به نحوی که تا قبل از تغییر مکان گپ تنها میراگر کمکی و بعد از آن ترکیب هر دو میراگر باعث اتلاف انرژی می‌شوند. سپس ویژگی‌های نیرو-جابه جایی، انرژی اتلافی و میرایی ویسکوز معادل برای چرخه‌های متوالی بارگذاری محاسبه شد و مشخص گردید که این مقادیر به لحاظ مطابقت با الزامات ASCI/SEI41-06 برای دستگاه‌های وابسته به جابه جایی، واجد شرایط می‌باشد. مقایسه انرژی جذب شده در نمونه ها نشان داد در بازه‌های تغییر مکانی بزرگ تر از تغییر مکان گپ، فرآیند جذب انرژی در چرخه‌های بارگذاری متناظر با این تغییر مکان‌ها بهبود یافته است. در ادامه با استفاده از ابزار مدل سازی Open Sees تعداد ۱۰ مدل ساخته شدند و تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی به دست آمد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۲۸-۰۳-۱۳۹۷
بازنگری: ۱۹-۰۶-۱۳۹۷
پذیرش: ۲۰-۰۶-۱۳۹۷
ارائه آنلاین: ۲۴-۰۶-۱۳۹۷

کلمات کلیدی:
میراگر اصطکاکی
میراگر دوسطحی
زمین لرزه ی متوسط
جذب انرژی
آزمایشگاهی

۱- مقدمه

کنترل پاسخ سازه یکی از مهم ترین راهکارهایی است که به منظور افزایش عمر مفید و ایمنی ساختمان در دهه های اخیر مورد توجه عموم محققین در زمینه مهندسی زلزله قرار گرفته است. به این منظور، تجهیزاتی به سازه الحاق می‌گردد تا انرژی ورودی ناشی از تحریک های جانبی نظیر زلزله و باد را مستهلک کرده و مقدار تقاضا برای اعضای سازه‌ای را به حداقل برسانند. میراگرهای غیرفعال از جمله تجهیزاتی هستند که به دلیل عدم نیاز به منبع انرژی خارجی از مزیت‌های عمده‌ای نظیر هزینه‌ی کم تولید، نصب و نگهداری پایین نسبت به سایر روش های کنترل سازه برخوردار هستند. این نوع میراگرها می‌توانند به سه دسته‌ی وابسته به حرکت[1]، وابسته به سرعت و وابسته به تغییر مکان تقسیم‌بندی شود. وسایل اتلاف انرژی وابسته به حرکت اساساً برای افزایش حس ایمنی ساکنین در سازه ها و کاهش لرزش‌های ناشی از باد استفاده می‌شود و معمولاً در بالاترین تراز سازه قرار می‌گیرد. میراگرهای جرمی[2] (TMD) و جرمی مایع[3] (TLD) نمونه‌ای از این نوع می‌باشند. از طرفی میراگرهای وابسته به سرعت و تغییر مکان در سازه به منظور جذب انرژی ارتعاش ایجاد شده در سازه به دلیل زمین‌لرزه یا باد کاربرد دارد و عمدتاً بین طبقه های سازه استفاده می‌شود. نمونه هایی از میراگرهای وابسته به تغییر مکان شامل میراگرهای اصطکاکی[4] (FD) انواع میراگرهای فلزی تسلیمی[5] (MD) مهاربندهای کمانش تاب[6] (BRB) می‌باشد. وسایل

1 Motion dependent

2 Tuned Mass Damper
3 Tuned Liquid Damper
4 Friction Damper
5 Yielding Damper
6 Buckling Resisting Brace

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: e.moaddab@seraj.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

اتلاف انرژی که مقدار میرایی آن ها تابعی از سرعت نسبی ایجاد شده در وسیله تبعیت می کند وابسته به سرعت نام دارند که میراگرهای ویسکوز مایع، ویسکو الاستیک جامد از این نوع می باشند [۱].

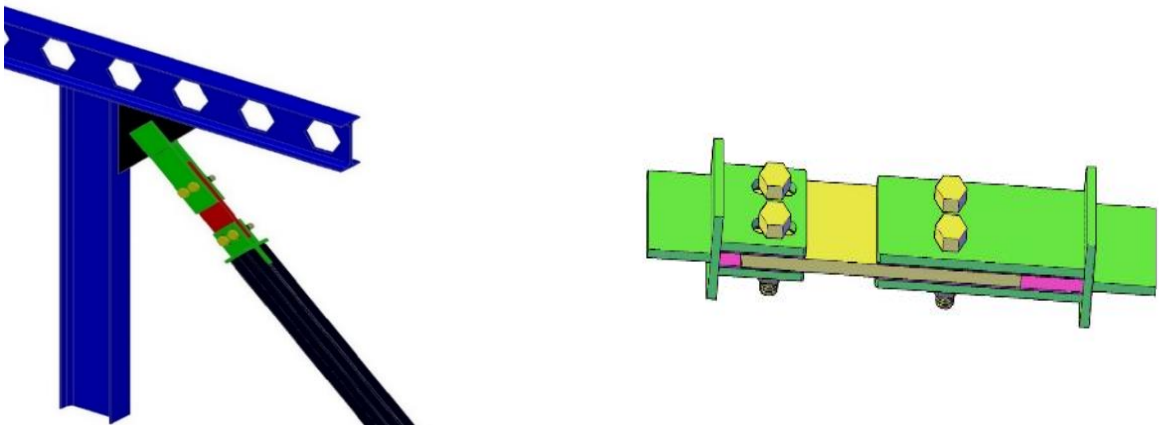
تاکنون استفاده از انواع میراگرهای ذکرشده در سازه‌ها رواج زیادی یافته است [۲, ۳]. الزامات طراحی این میراگرها درآیین نامه‌ها نشان می‌دهد سطح زمین‌لرزه‌ی طراحی میراگرها و آغاز اتلاف انرژی توسط این وسایل بر اساس زمین‌لرزه‌های شدید و یا زمین‌لرزه‌های طرح انتخاب شده است. روند در پیش گرفته شده برای تعیین نیرو یا تغییر مکان تسلیم میراگرهای وابسته به تغییر مکان این سوال را ایجاد می‌کند که در هنگام وقوع زمین‌لرزه‌های با شدت کمتر که احتمال وقوع بیشتری نسبت به زمین لرزه‌های شدید دارند عملکرد این نوع میراگرها آیا همچنان الاستیک خواهد بود؟ و اگر در زمین لرزه‌های متوسط میراگرهای وابسته به تغییر مکان بدون جذب انرژی، الاستیک باقی بمانند، افزایش سختی در سازه به دلیل عملکرد الاستیک این فیوزها چه تأثیری بر افزایش برش پایه یا نیروی ایجاد شده در سازه خواهد داشت؟

با اشاره به مطالب ذکر شده می‌توان دریافت که میراگرهای غیرفعال با هدف کنترل پاسخ سازه در برابر یک سطح ارتعاش طراحی می‌گردند، در نتیجه قادر نخواهند بود در سطوح پایین‌تر لرزه‌ای انرژی ورودی را اتلاف کنند. برای افزایش بازه‌ی عملکردی میراگرهای غیرفعال به صورت متناسب با نیروی ورودی زلزله، اخیراً مطالعه هایی بر روی میراگرهای ترکیبی که از یک دستگاه واحد برای کنترل سطوح مختلف ارتعاش انجام گرفته است. سیستم‌های کنترل ترکیبی در واقع باعث کاهش برخی محدودیت‌های موجود در هر یک از سیستم‌های کنترل معمول می‌شوند و در نتیجه این سیستم‌ها قادر به اتلاف انرژی در سطوح مختلفی از شدت های ارتعاش هستند و یا قادر هستند برخی ضعف های میراگرهای وابسته به سرعت و تغییر مکان را جبران کنند. جهت کنترل ارتعاش ناشی از زمین لرزه و باد، اسمیت و همکاران [۴] سیستمی ترکیبی از میراگر ویسکوالاستیک را پیشنهاد دادند. کیم و همکاران ترکیب میراگر ویسکوالاستیک و نوع خاصی از مهاربندهای کمانش‌تاب را پیشنهاد دادند. این ترکیب قادر بود انرژی ورودی را در بازه‌های تغییر مکانی کم و زمانی که سرعت نسبی در طبقه ها زیاد است با عملکرد میراگر وابسته به سرعت و در بازه‌های تغییر مکانی زیاد از طریق مهاربندهای کمانش تاب انجام دهد [۵]. کریستوپولوس ایده‌ی استفاده از میراگرهای ویسکوالاستیک در ارتعاش‌های ناشی از باد و میراگر تسلیمی دیگری را برای ارتعاش‌های ناشی از زمین لرزه معرفی کرد [۶] وی در مطالعه‌ای دیگر به بررسی عملکرد این ترکیب در مطالعات عددی پرداخت. با استفاده از تغییر مشخصات مصالح در بازه‌های تغییر مکانی متفاوت میراگر ترکیبی توسط کارواسیلیس بر روی مواد الاستومر فشرده انجام شد [۷].

جهت کنترل سطوح مختلف ارتعاشات ناشی از زلزله، ایبراهیم و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۷ ترکیبی از میراگرهای تسلیمی و ویسکوالاستیک را پیشنهاد دادند. مطالعه های انجام شده نشان داد که تحت سطوح پایین ارتعاش، مانند ارتعاش ناشی از باد، دستگاه ترکیبی از طریق کرنش‌های فشاری و کششی ایجاد شده در مواد ویسکوالاستیک انرژی را اتلاف می‌کند. با این حال برای سطوح بالای ارتعاش مانند تحریک های لرزه‌ای شدید، یک منبع قابل توجهی از اتلاف انرژی از طریق تسلیم المان های فلزی فراهم شد. مارشال و چارنی [۹] یک میراگر ترکیبی متشکل از مواد لاستیکی با میرایی بالا، به صورت سری با مهاربند کمانش تاب در دو فاز مختلف پاسخ را با هم ترکیب کردند که مطالعه های آزمایشگاهی نتایج مناسبی را برای ایجاد دو فاز مختلف اتلاف انرژی نتیجه داد.

کیم و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۴ ترکیب میراگر ویسکوز با بادبندهای کمانش‌تاب را برای کنترل پاسخ سازه‌های بلند مرتبه پیشنهاد دادند. دو سیستم سازهای مجهز به میراگر ترکیبی و بادبندهای کمانش تاب به تنهایی مقایسه شد و نتایج نشان داد که سیستم ترکیبی در بهبود سختی جانبی و قابلیت بهره‌برداری یک ساختمان مؤثر می‌باشد. در پژوهشی دیگر لی و همکاران [۱۱] ترکیبی از میراگرهای اصطکاکی و تسلیمی را مورد آزمایش قرار دادند. با به کارگیری میراگرهای اصطکاکی، عمر خستگی در قسمت تسلیمی این میراگرها افزایش یافت. نمونه‌های ترکیب میراگرهای حلقوی تسلیمی [۱۲] ورق های مثلثی [۱۳] به همین منظور در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفتند.

در ترکیب میراگرهای وابسته به سرعت با میراگرهای وابسته به تغییرمکان کاهش اثر بخشی میراگرهای جاری شونده گزارش شده است [۱۴] همچنین در برخی از ترکیبات میراگرهای تسلیمی با فاصله‌ی تغییر مکانی، عدم مونتاژ دقیق این میراگرها سبب شده است افزایش سختی در بازه‌ی تغییر مکان پیش بینی شده اتفاق نیفتد. در



شکل ۱. ساختار میراگر اصطکاکی ترکیبی (HFD)

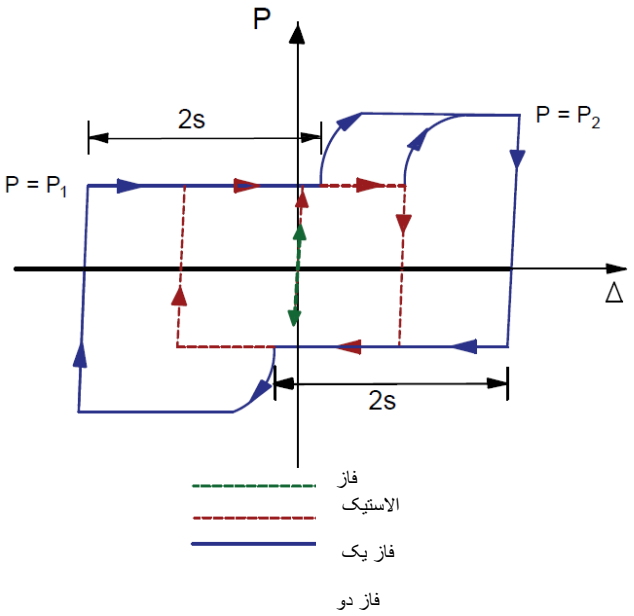
Fig. 1. Overall properties of developed the hybrid friction damper

این مطالعه نوع جدیدی از میراگر ترکیبی معرفی می‌شود که علاوه بر اتلاف انرژی در زمین لرزه‌های شدید قادر است تحت لرزش‌های با شدت کمتر نیز انرژی ورودی به سازه را جذب کرده و سختی سازه را متناسب با شدت زمین لرزه اصلاح کند. میراگر ترکیبی اصطکاکی با استفاده از دو سطح نیروی پیش تنیدگی متفاوت در یک دستگاه واحد، این قابلیت را فراهم می‌کند. ترکیب پیشنهاد شده به دلیل استفاده از یک نوع میراگر اصطکاکی در یک دستگاه واحد، رفتار قابل اطمینان‌تری نسبت به سایر ترکیب‌ها می‌تواند داشته باشد. ساخت این میراگر به دلیل معمول بودن تکنولوژی میراگرهای اصطکاکی با هزینه اندک و مقرون به صرفه‌تر خواهد بود.

در این تحقیق رفتار هیسترزیس یک نوع میراگر اصطکاکی ترکیبی موسوم به HFD (Hybrid Friction Damper) به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. میراگر اصطکاکی پیشنهادی متشکل از دو سطح نیروی لغزش مختلف برای کنترل پاسخ سازه در دو سطح متفاوت لرزه‌ای اعم از متوسط و شدید معرفی شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی میراگر تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفت و منحنی‌های هیسترزیس حاصل شده به خوبی عملکرد دوسطحی میراگر را در مطالعات عددی و آزمایشگاهی به نمایش گذاشت. مقدار میرایی معادل، اتلاف انرژی و سختی مؤثر نمونه‌های با نیروی پیش تنیدگی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. همچنین این پارامترها در مدل های عددی با تعداد بیشتر نیز مورد بررسی قرار گرفت.

۲- هندسه میراگر دوسطحی

در این مطالعه میراگر ترکیبی پیشنهادی که از ترکیب سری دو



شکل ۲. منحنی رفتاری ایده آل برای یک سیستم دوسطحی

Fig. 2. Idealized force – displacement curve for the dual-level function

میراگر اصطکاکی باهم تشکیل یافته، مورد بررسی قرار گرفته است. این میراگر از دو فنر که به صورت سری با فاصله‌ی تغییر مکانی به هم ارتباط دارند و شامل دو فیوز اصلی و کمکی می‌باشند. شکل ۱ به صورت شماتیک میراگر اصطکاکی ترکیبی HFD و نحوه اتصال میراگر در سیستم مهاربندی را نشان می‌دهد. در این میراگر با استفاده از دو سری نیروی پیش‌تنیدگی تقدم و تأخر عملکرد هر یک از بخش‌های میراگر تعیین می‌شود. مطابق شکل ۲ جدار سوراخ لوبیایی کوچک در فاز اول میراگر اصطکاکی پس از پیمودن مسیر لغزش در محدوده‌ی در نظرگرفته شده برای فاز اول به پیچ‌های سری دوم در فیوز اصلی

برخورد می‌کند. در این مرحله نیرو افزایش یافته و توسط انتقال از طریق پیچ‌ها به صفحه میانی، اتلاف انرژی در فاز دوم میراگر ترکیبی با حرکت صفحه میانی در محدوده سوراخ لوبیایی بزرگ آغاز می‌شود.

میراگر اصطکاکی ترکیبی را می توان به راحتی برای بارهای لغزش مختلف با انتخاب پارامترهای هندسی مناسب و نیروی پیش تنیدگی تنظیم کرد. همه پارامترها به غیر از نیروی پیش تنیدگی را می توان ثابت فرض کرد و بار لغزش مورد نظر را می توان با تغییر مقدار N تنظیم کرد. این کار به ساخت و ساز معمولی و اقتصادی تر از میراگرها منجر می‌شود بدان معنی که همه میراگرها یکسان تولید می‌شوند، سپس برای طراحی نیروی پیش تنیدگی لازم برای ایجاد نیروی اصطکاک (نیروی لغزش) مورد نیاز تنظیم می‌شوند.

نیروی لغزش میراگرها را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد.

$$P_s = 4\mu N \qquad (۱)$$

در این رابطه μ ضریب اصطکاک و N نیروی پیش تنیدگی می باشد.

شکل ۲ منحنی هیسترزیس ایده آل میراگر ترکیبی را تحت بارگذاری رفت و برگشتی نشان می‌دهد. در این نمودار در هر دو فاز اتلاف انرژی، از سیستم اتلاف انرژی وابسته به تغییر مکان استفاده شده است. زمانی که نیروی p افزایش می‌یابد و به مقدار نیروی لغزش در فیوز کمکی می‌رسد، حرکت لغزشی ما بین صفحات در فاز یک آغاز می‌شود. در محدوده‌ی تغییر مکانی فاز اول حرکت لغزشی بدون تغییر در مقدار بار همچنان ادامه خواهد داشت. از سوی دیگر اگر جهت حرکت معکوس شود، لغزش به همان اندازه‌ی بار در جهت مخالف رخ می‌دهد. چنین رفتاری بارها در همان محدوده‌ی تکرار که در آن جابه جایی انجام گرفته، روی می‌دهد و حلقه‌های هیسترزیس ناشی از عملکرد میراگر اصطکاکی که تقریباً مستطیل شکل است ایجاد می‌شود. برای کنترل سازه در زلزله کم تا متوسط، این گونه برنامه ریزی شده است که انرژی تنها توسط فاز اول میراگر اصطکاکی تلف شود. بر این اساس با توجه به نیاز کم سازه به سختی در زمین لرزه‌ی متوسط، در فاز یک نیروی لغزش مورد نیاز در میراگر اصطکاکی تأمین می‌شود [۱۳]. تحت یک زمین لرزه قوی، سیستم میرایی ممکن است جابه‌جایی زیادی را تجربه کند. در این وضعیت، رفتار ترکیبی از طریق فعال سازی میراگرهای فاز یک (فیوز کمکی) و دو (فیوز اصلی) در طی چند مرحله رخ می‌دهد.

جدول ۱. نیروی پیش تنیدگی در نمونه‌های مورد آزمایش
Table 1. sliding force of hybrid damper

نام نمونه	P_{S1} (kN)	P_{S2} (kN)	P_{S2}/P_{S1}	δ_{max} (mm)
A	۱۵	۲۸	۱/۹	۵۰
B	۳۶	۱۰۴	۲/۹	۴۰
C	۶۰	۱۸۰	۳	۶۰
D	۸۷/۵	۲۳۷/۵۸	۲/۷	۶۰

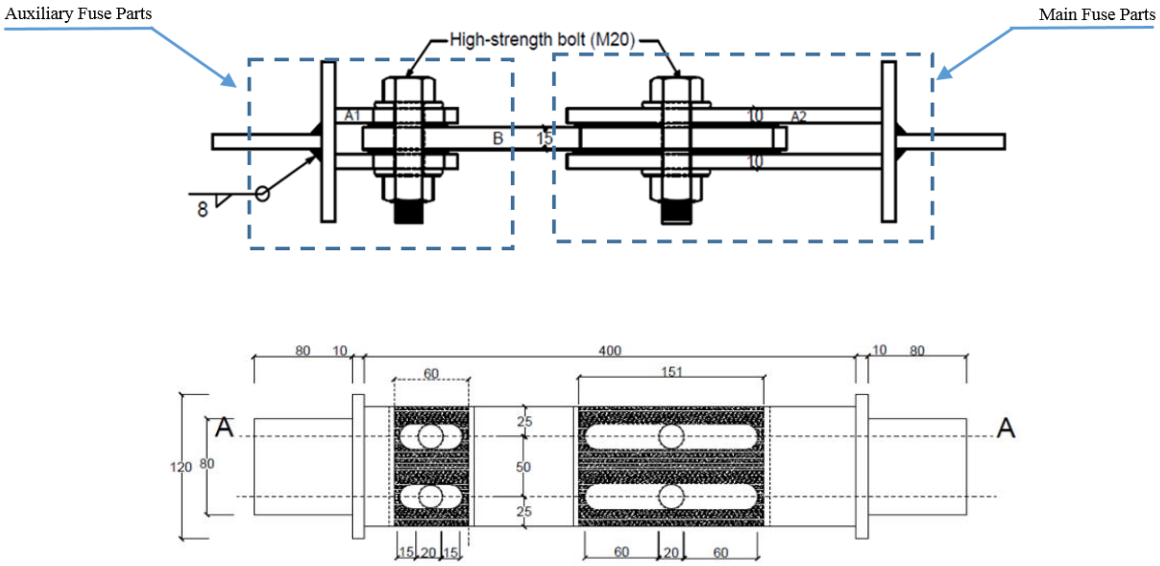
برای طراحی و تعیین ابعاد اولیه از جابه جایی‌های متناظر در هر طرح بهره گرفته شد. بر اساس جدول (۳-c۱) FEMA356 مقدار نسبت تغییر مکان طبقه برای ساختمان‌های مهاربندی‌شده در شرایط تأمین ایمنی جانبی سازه برابر با ۱٪ گذرا و در آستانه فروریزش CP معادل با ۵٪ گذرا یا ماندگار می‌باشد. بدین منظور جابه جایی متناظر با عملکرد فیوز اول برابر با ۱٪ و جابه جایی نسبی متناظر با عملکرد فیوز دوم برابر با ۴٪ در نظر گرفته شد [۱۴].

۳- آزمایش میراگرها

۳-۱- نمونه‌های آزمایشگاهی

جهت بررسی عملکرد پیکربندی پیشنهاد شده، چهار نمونه آزمایشگاهی با نیروهای پیش تنیدگی متفاوت تنظیم گردید. جدول ۱ نیروی پیش‌تنیدگی را در هر دو فیوز اصلی و کمکی برای تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد.

مطابق جزییات ارائه شده در شکل ۳ در گام‌های تغییر مکانی کمتر از ۱۵ میلی متر ابتدا صفحات مستطیلی در نظر گرفته شده برای فیوز اول درگیر می‌شوند. پس از افزایش تغییر مکان وارد شده، با برخورد جداره‌ی سوراخ‌های لوبیایی افقی با پیچ‌ها، مشارکت فیوز اصلی آغاز می‌شود. همانطوری که در بخش سوم اشاره شد سوراخ‌های لوبیایی افقی کوتاه در صفحات انتهایی برای تأمین تأخیر فاز تغییر مکانی برای فیوز دوم می‌باشد. دامنه‌ی سوراخ‌های لوبیایی در فیوز کمکی متناسب با دریفت مجاز برای زمین لرزه‌ی متوسط و برابر یک درصد ارتفاع طبقه در نظر گرفته شده است . با در نظر گرفتن مقیاس ۰/۵ برای ساخت میراگرها، فاصله تغییر مکانی برابر ۳۰ میلی‌متر و با در



شکل ۳. جزییات میراگر HFD

Fig. 3. Detail of experimented HFD

نظر گرفتن قطر پیچ‌ها برابر ۵۰ میلی‌متر انتخاب شده است.

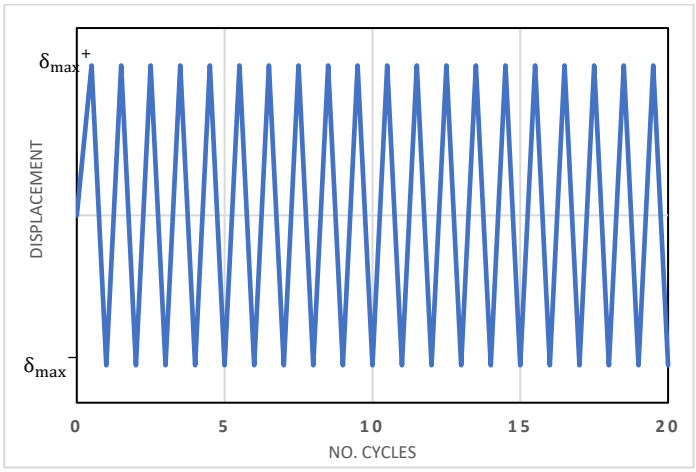
فیوز اصلی متشکل از یک صفحه افقی با سوراخ‌های لوبیایی بزرگی است که آزادی حرکتی مناسبی را برای زمین لرزه‌های شدید در سازه فراهم می‌کند. جهت تأمین اصطکاک بین صفحات فولادی از صفحات برنجی نوع (UNS-۲۶۰) Half cartridge با ضخامت یک میلی‌متر استفاده شد، همچنین برای اعمال نیروی پیش‌تنیدگی در پیچ‌ها در فازهای لغزشی مختلف از دستگاه اندازه‌گیری ترکمتر استفاده شده است که رابطه‌ای بین لنگر ایجاد شده توسط ترکمتر و نیروی اصطکاک حاصله اندازه‌گیری شده است. پیچ‌های استفاده شده در سوراخ‌های لوبیایی افقی به عنوان المان‌های رابط عمل می‌کنند. این المان‌ها باید قادر به انتقال نیرو بین دو فیوز اصطکاکی متفاوت باشند به نحوی که اثر تسلیم برشی در آن ها ایجاد نشود. این پیچ‌ها از نوع M۱۲.۹ و با قطر ۲۰ میلی‌متر انتخاب شده است. جدول ۱ مقادیر نیروی پیش تنیدگی مورد نظر را در دو فاز مختلف برای ۴ نمونه‌ی A تا D نشان می‌دهد. نمونه ها با بازه‌ی نیروهای پیش تنیدگی مختلف انتخاب شده اند تا بتوان تأثیر شدت این نیروها را در مقادیر میرایی و انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها را مقایسه نمود.

۳-۲- پروتکل بارگذاری

آزمون‌های محوری برای تعیین منحنی نیرو-جابه‌جایی محوری L.S در جابه‌جایی معادل دریفت‌های مجاز سطح عملکردی HFD براساس الزامات دستگاه‌های وابسته به HFD انجام شد. پروتکل تست می‌باشد. بر این اساس آزمایش [۱۵] ASCE/ SEI41-06جابه‌جایی شبه استاتیکی رفت و برگشتی با بیست چرخه‌ی جابه‌جایی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و رفتار هیسترزیس میراگر اصطاکاکی ترکیبی تحت دو نیروی پیش‌تنیدگی متفاوت برای فازهای مختلف HFD لغزشی با سرعت ۱/۰ هرتز مورد مطالعه قرار گرفته است. بازه‌های تغییر مکان اعمال شده در آزمون چرخه‌ای، به نحوی انتخاب شدند تا هر دو فیوز کمکی و اصلی در نیروی کل ثبت شده دخالت داشته باشند. بنابراین همان گونه که در جدول ۱ نشان داده شده است، مقادیر تغییر مکان‌های اعمالی بزرگتر از ۱۵ میلی‌متر می‌باشد. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، برای مطالعه های مطابق با جدول ۱ بر δ_{max} آزمایشگاهی ۲۰ چرخه با دامنه‌ی ثابت اعمال شد. D تا A نمونه‌های

۴- برپایی آزمایش

همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، نمونه HFD در دستگاه یونیورسال که ظرفیتی حدود ۳۰۰± کیلونیوتن، بازه‌ی جابه جایی ۵۰۰ میلی متر و سرعت حداکثر برابر ۱۰۰ میلی متر بر ثانیه دارد، بین دو فک دستگاه در جهت عمودی قرار گرفت. دستگاه



شکل ۴. پروتکل بارگذاری با دامنه ی ثابت در پژوهش های آزمایشگاهی

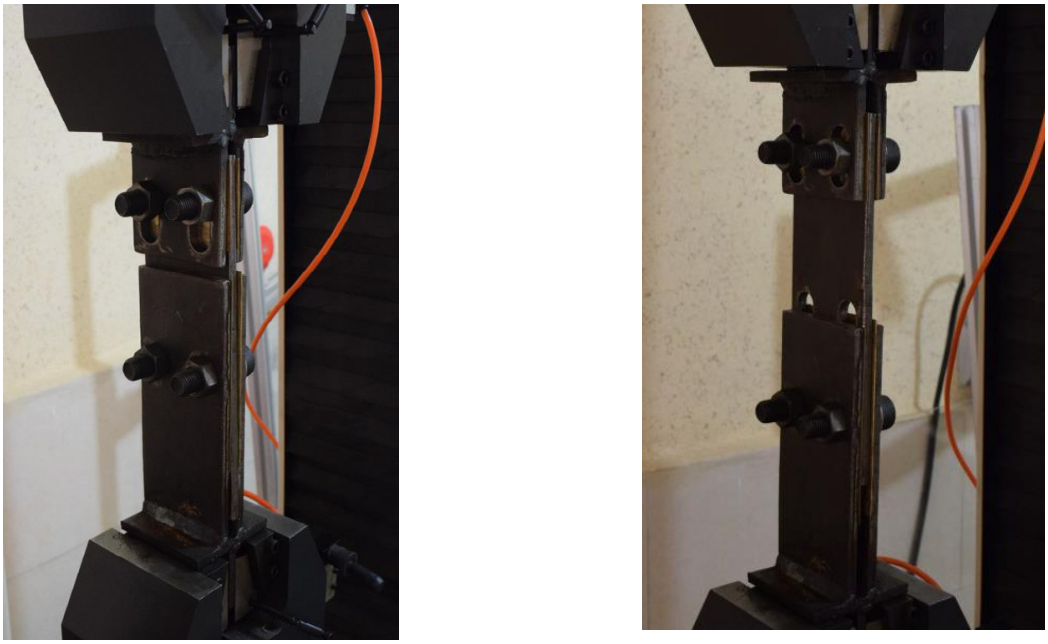
Fig. 4. Loading protocol applied in the tests with constant amplitudes

(الف)

(ب)

شکل ۵. جزییات آزمایشگاهی (الف) نمونه ی آزمایشگاهی HFD (ب) نحوه‌ی آزمایش در دستگاه یونیورسال

Fig. 5. Details of experiment sample (a) Experimented sample (b) set up of hybrid friction damper



(ب) (الف)

شکل ۶. تغییر مکان ایجاد شده بین صفحات در دو دامنه ی (الف) ۳۰ میلی‌متر کششی (ب) ۳۰ میلی‌متر فشاری

Fig. 6. The induced displacement between plates (a) 30 mm in tension (b) 30 mm in compression

تست همچنین مجهز به لودسل ۹۰۰ KW و مبدل خطی متغیر جابه جایی (LVDT) می‌باشد که رابطه نیرو-جابه جایی را برای هر مرحله از هر آزمون با استفاده از سیستم جمع آوری داده‌ها ثبت می‌کند. این دستگاه مستقر در آزمایشگاه مقاومت مصالح مؤسسه‌ی آموزش عالی سراج می‌باشد و تمام آزمایش ها در این مؤسسه انجام شده است.

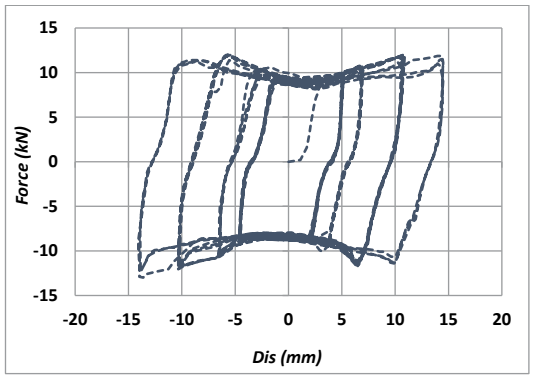
جک یونیورسال با بارگذاری چرخه‌ای کنترل شونده توسط تغییر مکان با دامنه‌ی ثابت برای هرکدام از نمونه‌ها، مطابق جدول ۱، تغییر مکان‌های محوری را در راستای عمودی اعمال می‌کند و نیروی تحمل شده توسط میراگر با استفاده از لود سل متصل به فک دستگاه اندازه گیری می‌شود.

۵- نتایج و مشاهدات تجربی

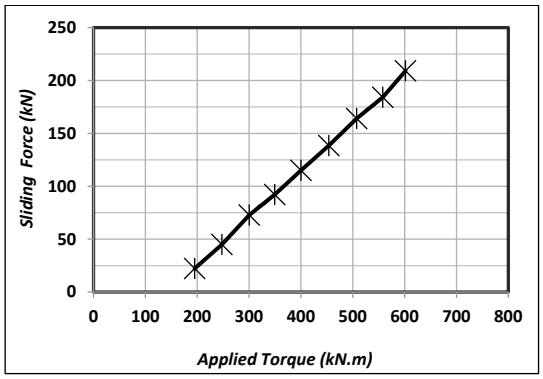
نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای با دامنه‌ی ثابت قرار گرفتند. در چهار مرحله نیروهای پیش‌تنیدگی در پیچ‌ها در دو فیوز اصلی و کمکی تغییر داه شدند. شکل ۶ نشان دهنده‌ی لغزش ایجاد شده در دو حالت کششی و فشاری می‌باشد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش دامنه‌ی تغییر مکان اعمالی به بیش از دامنه تغییر مکان گپ، پیچ‌های فیوز کمکی به کناره‌ی سوراخ های لوبیایی برخورد می‌کند و با این برخورد تغییر مکان به فیوز اصلی با نیروی پیش تنیدگی بالاتر منتقل می‌شود.

برای چهار نمونه‌ی آزمایشگاهی با نیروی لغزش متفاوت در فیوزها، نتایج نیرو-تغییر مکان ثبت شده در شکل ۷ نشان داده شده است.

نیروی پیش تنیدگی اولیه برای میراگر دوسطحی HFD-A به مقادیر ۱۵ و ۲۸ کیلونیوتن به ترتیب برای فیوز کمکی و اصلی تنظیم شد. همان طور که قبلاً ذکر شد این نیرو از طریق پیش تنیدگی دو ردیف پیچ در فازهای مختلف لغزشی توسط ترکمتر انجام پذیرفت. جهت کالیبراسیون دقیق ترکمتر و رسیدن به نیروی لغزش دلخواه، ابتدا در ترکهای مختلفی میراگر اصطکاکی به صورت غیر ترکیبی در دستگاه یونیورسال مورد آزمایش چرخه ای قرار گرفت. هر بار این آزمایش با تغییر مقدار ترک وارد شده تکرار شد و نتایج به صورت نقطه ای مطابق شکل ۷ به دست آمد. از به هم متصل کردن این نقاط یک نمودار خطی مطابق شکل ۷-ب به دست می‌آید که ضریب کالیبراسیون ترکمتر و ضریب اصطکاک صفحات برنجی قابل محاسبه است. با فرض مقدار مناسب ضریب اصطکاک برابر ۰/۳ مقدار ضریب کالیبراسون ترکمتر مورد استفاده قابل محاسبه است.



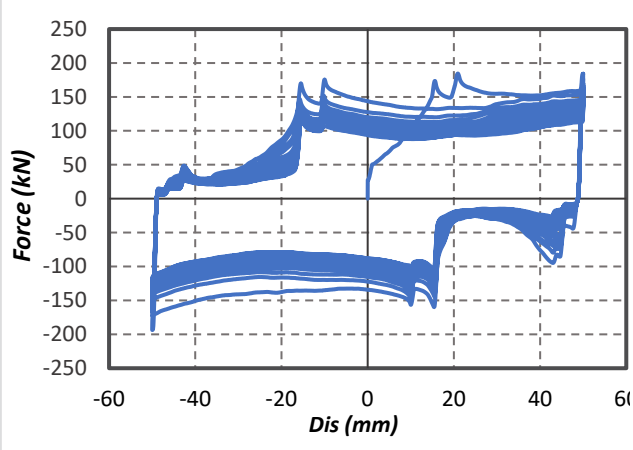
(الف)



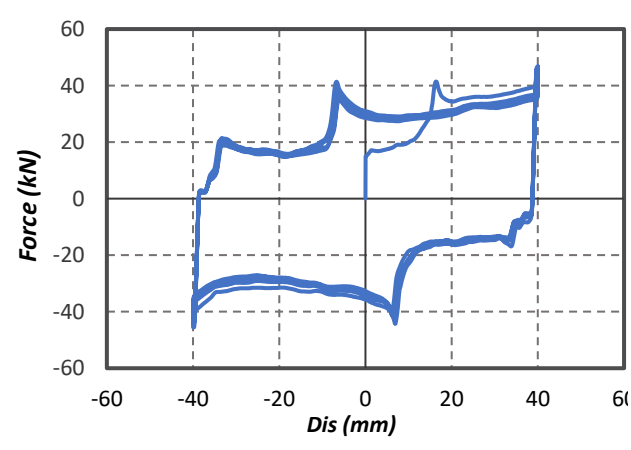
(ب)

شکل ۷. (الف) منحنی نیرو-تغییر مکان بخش اصطکاکی (ب) رابطه نیروی پیش تنیدگی و ترک اعمالی

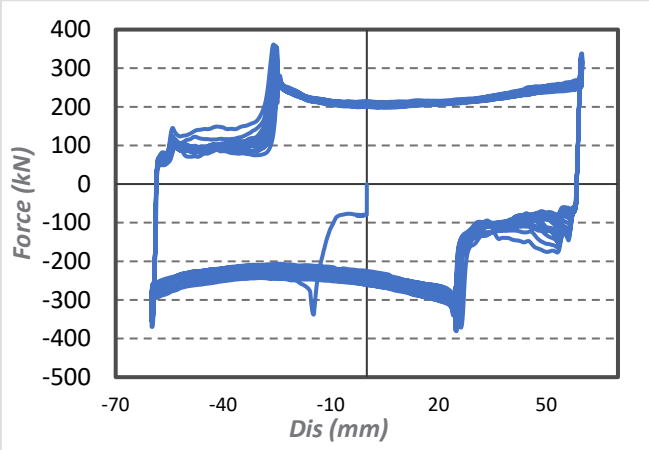
Fig. 7. (a) Force –displacment of friction part (b) relation between applied torque and slippage force



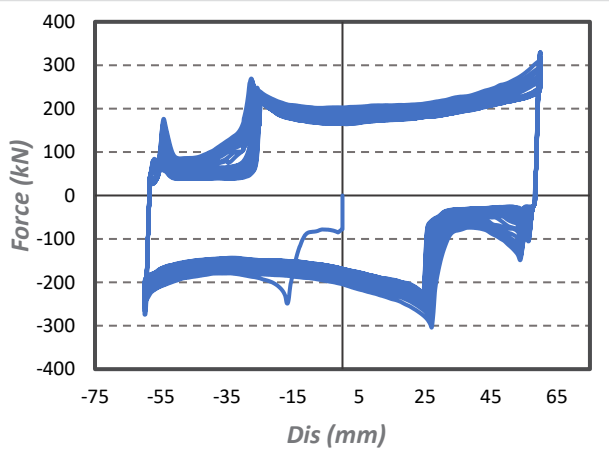
(B)



(A)



(D)



(C)

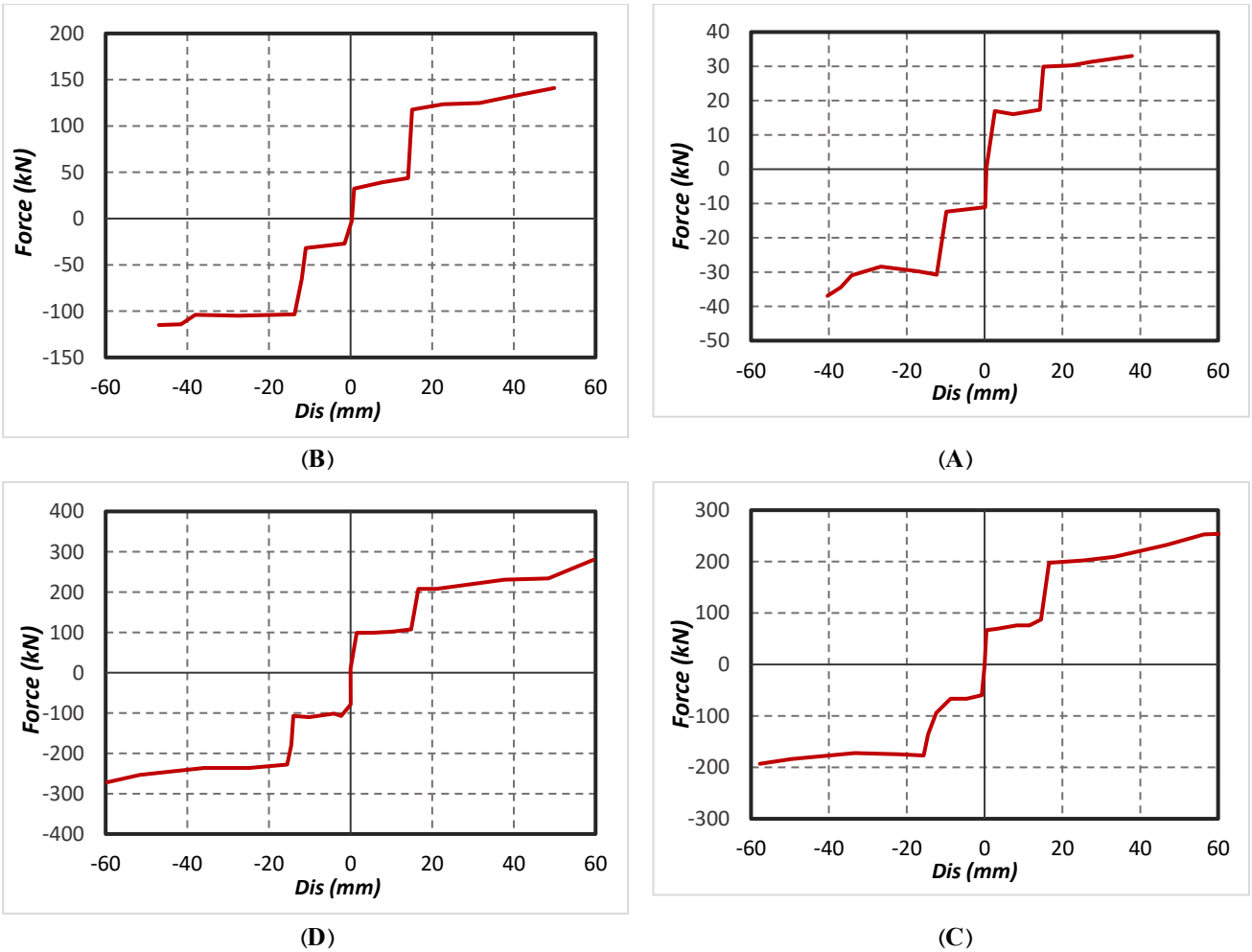
شکل ۸. تغییر نمودار نیرو – تغییر مکان نمونه های آزمایشگاهی (A,B,C,D) میراگر اصطکاکی HFD

Fig. 8. Detail of tested hybrid friction damper

تحت بارگذاری وابسته به تغییرمکان با دامنه ثابت ۴۰ میلی‌متر، نمودار نیرو-تغییر مکان برای میراگر دوسطحی اصطکاکی شکل ۸ به دست آمد. در این نمودار اتلاف انرژی تا مقدار تغییر مکان ۱۵ میلی متر توسط فیوز کمکی میراگر HFD انجام می‌شود و در ادامه پاسخ فاز دوم تا تغییر مکان‌های بیشتر ادامه می‌یابد. در آزمایش‌های بعدی برای دست یابی به اتلاف انرژی بیشتر توسط میراگر دوسطحی HFD، مقدار نیروی پیش‌تنیدگی در هر دو فاز کمکی و اصلی افزایش یافت. شکل ۸ نمودار چرخه‌ای نیرو-تغییر مکان را برای نمونه‌های آزمایشی A تا D نشان می‌دهد. بازه‌ی تغییر مکان ایجاد شده بر نمونه‌ها حداقل دو برابر مقدار تغییر مکان گپ انتخاب شد تا تأثیر اتلاف انرژی توسط فاز دوم در نمونه‌ها مشاهده شود. تغییر مکان‌های حداکثر وارده بر نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

در چرخه‌های بالاتر افت نیروی پیش تنیدگی پیچ‌ها باعث کاهش سطح نیرو در منحنی‌های به دست آمده شده است. مقدار کاهش در بخش‌های بعدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد اما با اضافه شدن فیوز اصلی به فیوز کمکی در تغییر مکان های بالاتر، افت نیرو در چرخه‌های متوالی کاهش می‌یابد. دلیل اصلی اصلاح افت سطح نیروی پیش‌تنیدگی در تغییر مکان‌های بزرگتر از تغییر مکان گپ، اضافه شدن قسمت دوم میراگر است که تحت بار چرخه‌ای قرار نگرفته و به عنوان منبع اتلاف انرژی جدیدی است که از ظرفیت آن استفاده نشده است.

برای هر نمودار چرخه‌ای نیرو- تغیر مکان، منحنی چند خطی [۱۴] استخراج شده و در شکل ۹ نشان داده شده است. منحنی‌های چند خطی به منظور نشان دادن دو سطح متفاوت نیروهای لغزش در میراگر ترکیبی ارائه شده اند. مقادیر نیرو در دو سطح مختلف بر اساس متوسط نیروهای لغزش در تغییر مکان‌های متناظر برآورد



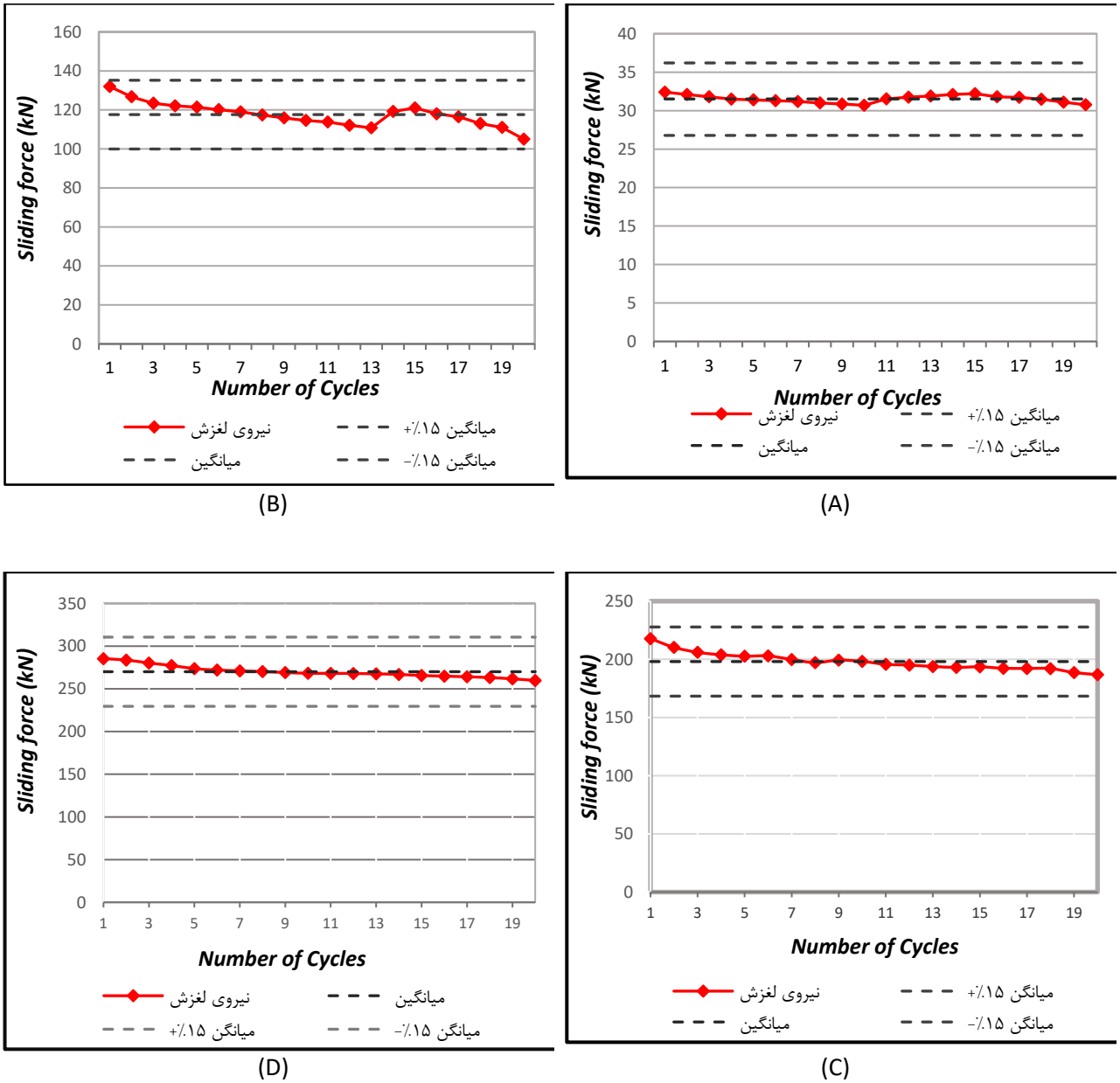
شکل ۹. منحنی چند خطی نمودار نیرو-تغییر مکان

Fig. 9. Multilinear curves of experimented samples

جدول ۲. خلاصه نتایج به دست آمده از مطالعه های آزمایشگاهی بر اساس منحنی‌های چندخطی

Table 2. Results of experimental study of samples based on multi linear force –displacement curves

		A	B	C	D
فیوز کمکی	نیروی لغزش P_{S1} ,	۱۸	۴۳	۷۲	۱۰۵
فیوز اصلی	نیروی لغزش P_{S2} ,	۳۴	۱۲۵	۲۱۷	۲۸۵



شکل ۱۰. انحراف از میانگین بار لغزش فیوز اصلی (Ps2) برای نمونه های آزمایشگاهی A تا D

Fig. 10. Slippage force standard deviation for the main fuse

شده است. بر اساس این منحنی‌ها پارامترهای تأثیرگذار از جمله نیروی لغزش برای هر دو قسمت فشاری و کششی در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر نیروهای گزارش شده با اندکی تفاوت نسبت به مقادیر بیشینه ی نیروهای ثبت شده در نتایج آزمایشگاهی به دست

آمده اند که علت اصلی تفاوت به وجود آمده افت سطح نیروی لغزش در چرخه‌های متوالی می‌باشد.

۶- ویژگی های نیرو – جابه جایی

۶-۱- نیروی لغزش

برای بررسی افت نیروهای اصطکاکی در طول چرخه‌های بارگذاری، بارهای لغزش برای هر چرخه به عنوان بیشینه ی نیرو در هر مرحله از جابه جایی (فاز یک و دو) محاسبه می‌شود. شکل ۱۰ تغییرات بار لغزش در چرخه‌های متوالی بارگذاری برای آزمون‌های A تا D نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، بار لغزش در طول چرخه‌ها کاهش می‌یابد؛ با این حال این کاهش در محدوده‌ی قابل قبول مطابق با الزامات ASCE/SEI41-06 [۱۵] است. این مشخصات نیازمند آن است که در هر آزمون، نیروی لغزش به دست آمده در هر چرخه‌ی کامل بارگذاری، بیش از ۱۵٪ از میانگین بار لغزش محاسبه شده برای تمامی چرخه‌های آن آزمون اختلاف نداشته باشد. بر اساس شکل ۸ بیشترین مقدار انحراف از معیار بار لغزش مربوط به چرخه اول از آزمون B و برابر با ۱۱٪ به دست آمد.

۶-۲- سختی مؤثر

برای موارد عملی ترجیح بر این است تا مشخصات میراگرها با میرایی ویسکوز معادل بیان شود. بر این اساس، برای یک سیستم یک درجه آزاد سختی مؤثر به شکل زیر بیان می‌شود [۱۶].

$$K_{eff} = \frac{|F^+|+|F^-|}{|\Delta^+|+|\Delta^-|} \qquad (۲)$$

نیروهای F+ و F– به ترتیب در حداکثر جابه جایی $+\Delta$ و $-\Delta$ به دست می‌آیند. مشابه نیروی لغزش، ASCE/SEI۴۱-۰۶ [۱۵] الزام می‌دارد که در هر آزمون، سختی مؤثر یک دستگاه اتلاف انرژی در هر چرخه به میرایی بیش از ٪۱۵± نسبت به سختی میانگین محاسبه شده بین کلیه چرخه‌های آن آزمایش تفاوت ننماید. در میزان تغییرات سختی مؤثر در چرخه‌های متوالی برای هر آزمون و در قیاس با آزمون‌های نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییرات سختی در هر آزمون در محدوده‌ی آیین نامه‌ی فوق الذکر قرار دارد، اما در مقایسه با آزمون‌های دیگر، میزان سختی مؤثر متناسب با نیروی پیش تنیدگی تغییرات فاحشی پیدا می‌کند. میراگر مورد آزمون A و D به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار سختی مؤثر را دارند.

۶-۳- اتلاف انرژی و میرایی لزج معادل

انرژی اتلافی در هر چرخه، W_D، باید به عنوان محدوده‌ی محصور شده توسط یک چرخه‌ی کامل پاسخ نیرو-جابه جایی در نظر گرفته شود. مطابق آیین نامه ASCE/SEI41-06 مساحت داخل چرخه هیسترزیس (W_D) یک دستگاه اتلاف انرژی به میزانی بیش از ٪۱۵± نسبت به میانگین مساحت زیر منحنی چرخه‌ی محاسبه شده بین کلیه چرخه‌های آن آزمایش نباید تفاوت داشته باشد که با توجه به نتایج آزمایش های انجام شده حداکثر انحراف از میانگین، مربوط به چرخه‌ی اول از آزمون B و برابر با ۱۰٪ به دست آمد.

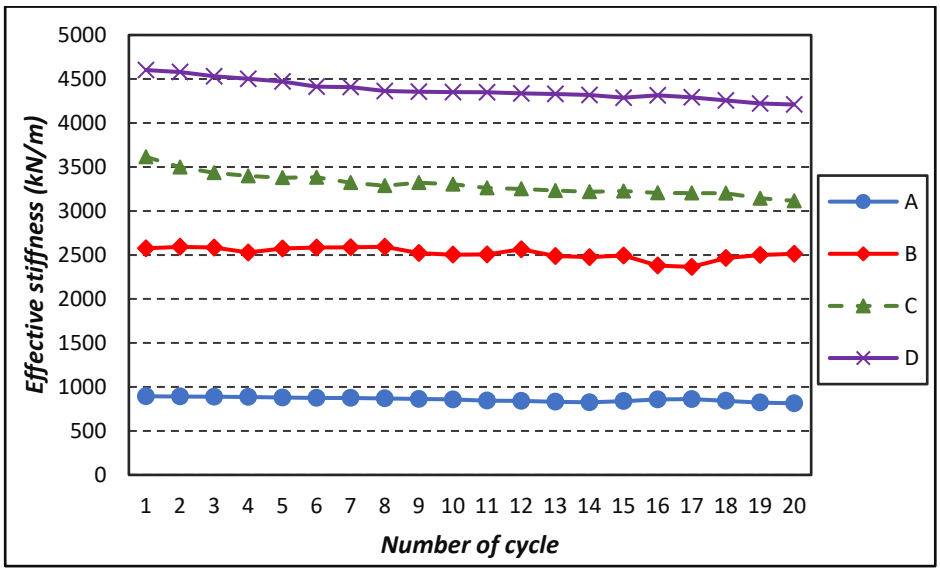
در شکل ۱۰ نمودار اتلاف انرژی تجمعی در مقابل چرخه ی بارگذاری برای آزمون‌های A تا D ارائه شده است. مشهود است با افزایش نیروی لغزش، شیب نمودار اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. از آنجا که دستگاه یونیورسال قابلیت ثبت بارگذاری فزآینده ندارد، روند افزایش اتلاف انرژی تجمعی به صورت صعودی تقریباً یکنواخت به دست آمده است.

شاخص میرایی ویسکوز معادل توسط آیین نامه FEMA356 [۱۶] برای تعیین میرایی لزج معادل برای اعضای سازه‌ای تعریف شده است. این ضریب از طریق معادله ی زیر بیان می‌شود.

$$\beta_{eff} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{1}{k_{eff}} \times \frac{w_D}{{\Delta_{avr}}^2} \qquad (۳)$$

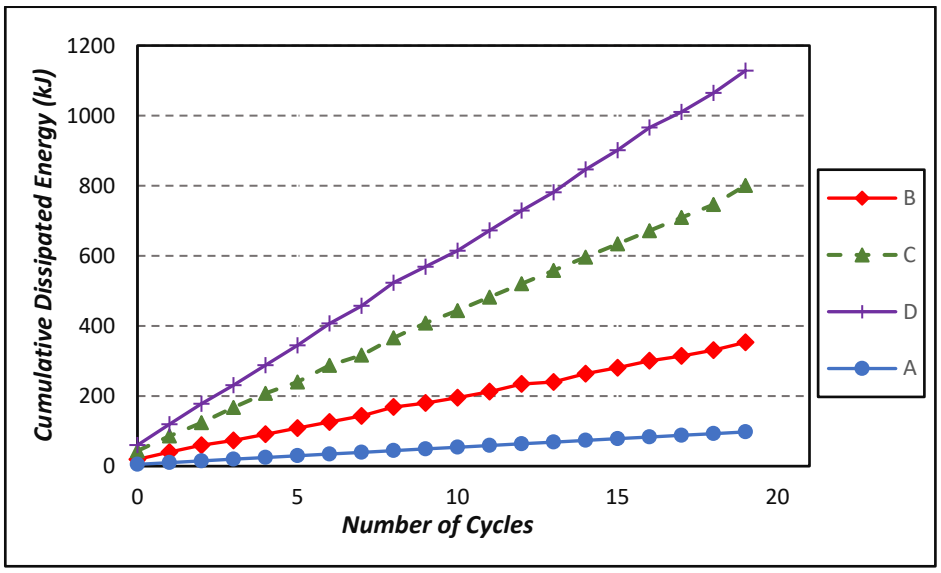
Δ_{avr} برابر با میانگین مقادیر مطلق جابه جایی $+\Delta$ و $-\Delta$ است. k_{eff} سختی مؤثر و w_D مقدار انرژی جذب شده است. لازم به ذکر است که این شاخص میرایی معادل ایده آل شده و کاملاً تقریبی برای سیستم‌های غیر خطی است [۱۷].

با محاسبه این شاخص نسبت میرایی برای تمام چرخه‌ها، یک شاخص میرایی میانگین می‌تواند برای هر یک از نمونه های A تا D محاسبه شود. این مقدار به طور تقریبی در حدود ۰/۵۵ برای همه نمونه ها محاسبه شده است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. مقایسه میزان سختی مؤثر در نمونه های آزمایشگاهی

Fig. 11. Calculated Effective stiffness for experimental samples

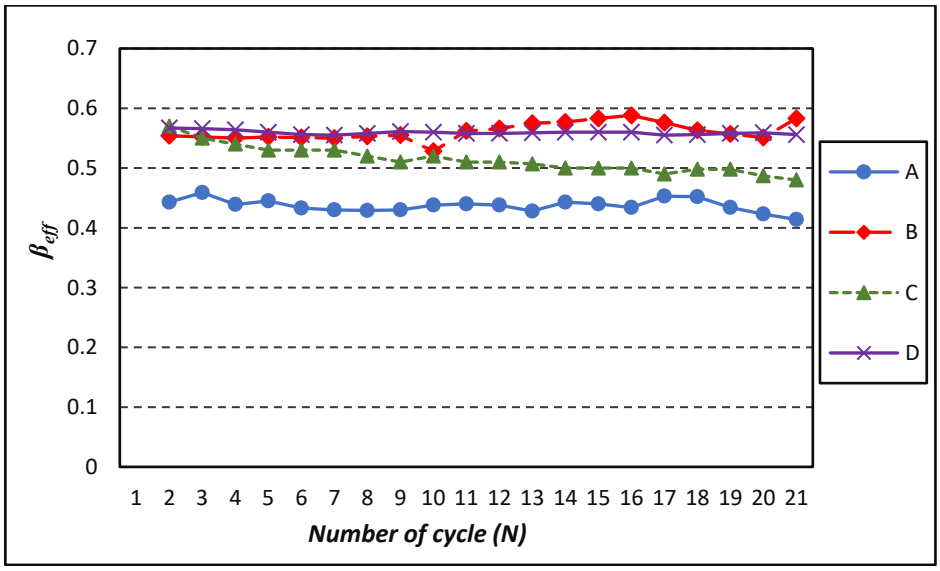


شکل ۱۲. اتلاف انرژی تجمعی در مقابل چرخه ی تجمعی

Fig. 12. Cumulative Dissipated Energy for tested samples of hybrid friction damper

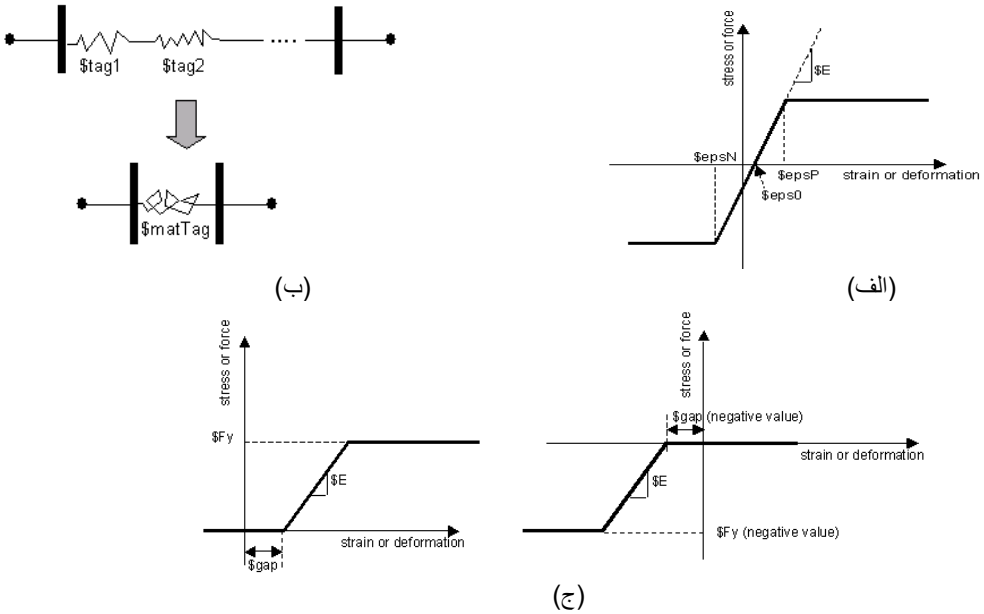
۷ – مدل سازی عددی

جهت بیان عددی رفتار چرخه ای میراگر اصطکاکی ترکیبی، تحلیل‌های عددی با استفاده از نرم افزار Open Sees انجام شد [۱۸]. رفتار هر بخش از میراگر با استفاده از المان لینک به صورت ترکیبی و رفتار الاستوپلاستیک کامل می‌تواند مدل سازی شود. ممکن است جذب انرژی اضافی از طریق منبع دیگری مانند پیچ‌های انتقال نیرو (که انتظار می رود الاستیک و صلب باقی بمانند) انجام شود که بایستی اثرات آن در مدل سازی اعمال شود. با توجه به مشاهدات انجام یافته هیچ تغییر شکل ماندگار مشهودی در پیچ‌های نگهدارنده مشاهده نشد، بنابراین المان‌های انتقال نیرو به صورت صلب و با



شکل ۱۳. مقایسه میرایی ویسکوز معادل در نمونه های آزمایشگاهی

Fig. 13. Equivalent viscous damping for tested samples of hybrid friction damper



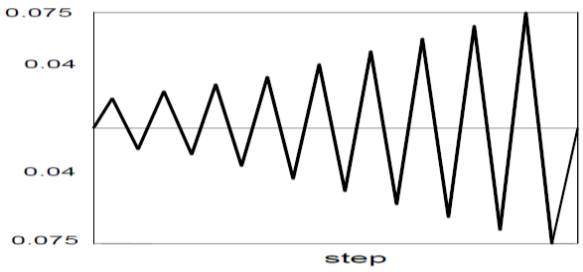
شکل ۱۴. المان‌های مورد استفاده در مدل عددی میراگر ترکیبی [۱۸] (الف) مصالح با مشخصات پلاستیک کامل (ب) ترکیب مصالح سری و (ج) مصالح با مشخصات Gap-Hook

Fig. 14. Used element for modelling the hybrid damper (a) perfectly plastic material (b) series combination of materials (c) Gap-Hook material properties

خاصیت مصالح الاستیک در نظر گرفته می‌شود.

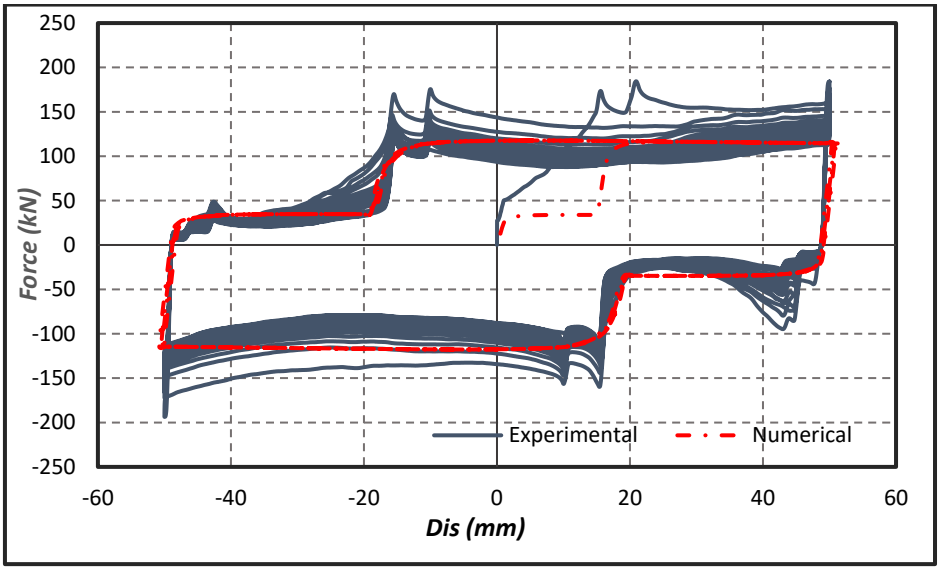
آل میراگرشکل ۱۴ المان های مورد استفاده در مدل عددی ایده ترکیبی را نشان می‌دهد [۱۸]. هر قسمت از میراگر هیبریدی با المان مدل سازی(EPP)به طول صفر [1] با مشخصات مصالح پلاستیک کامل شده است. رفتار نیرو جابه جایی المان، یک نمودار دو خطی است که با سه پارامتر سختی اولیه، سختی پس از جاری شدن (با تعریف نسبت سختی پس از جاری شدن به سختی اولیه) و بار لغزشی گردد. این پارامترها باید به گونه‌ای تنظیم گردند که شکل‌تعیین می های هیسترزیس میراگر اصطکاکی را ایجاد کنند.مستطیلی حلقه

1 Zero length element



شکل ۱۵. پروتکل بارگذاری اعمال شده در مدل های عددی

Fig. 15. The Loading protocols used in numercal study



شکل ۱۶. مطابقت نتایج آزمایشگاهی و عددی

Fig. 16. verification of numerical model

برای در نظر گرفتن عملکرد تأخیر تغییر مکانیGap-Hookالمان به صورت فشاری و کششی در دو جهت بارگذاری به کار رفته است. طول این المان ها به اندازه ی ۳۰ میلی متر در هر دو جهت فشاری باشند. المان‌های موردهای لوبیایی می‌ی سوراخو کششی مدل کننده استفاده با استفاده از ترکیب سری که در شکل ۱۴ (ب) نشان داده شده است ترکیب شده‌اند. نیروهای لغزش متفاوت فیوزهای اصلی و متفاوت برای دو مصالح باPyکمکی با در نظر گرفتن نیروی تسلیم ایجاد شده است.EPPمشخصات

در بررسی پارامتری از بارگذاری با الگوی متفاوتی نسبت به مطالعه های آزمایشگاهی استفاده شده است. شکل ۱۵ دامنه‌ی تغییر شکل‌های اعمالی را بر مدل های عددی نشان می‌دهد. دامنه‌ی فزآینده تغییر مکان‌ها در مطالعه های عددی با دلیل نشان داده اثرات فیوز اول به تنهایی انتخاب شده است.

صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی با مدل ترکیبی توضیح داده شده برای نمونه ی B در نرم افزار Open sees انجام شد. سختی اولیه از شیب مماسی در شاخه‌ی بار برداری برابر N/m ۱۰۰۰۰ و N/m ۲۰۰۰۰ به ترتیب برای فیوز کمکی و اصلی در نظر گرفته شد.

شکل ۱۶ نتایج نیرو-تغییر مکان به دست آمده از مدل ترکیبی را در نرم افزار در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نمونه‌ی B نشان می‌دهد. منحنی چرخه‌ای پله‌ای به دست آمده حاکی از این مطلب است که ترکیب المان های انتخاب شده در شکل ۱۱ می‌تواند به خوبی رفتار دوسطحی میراگر ترکیبی اصطکاکی را مدل سازی کرده باشد. مقایسه

جدول ۳. مشخصات مدل های میراگر اصطکاکی ترکیبی

Table 3. Properties of Numerical models of hybrid damper

مدل	P_{S1} (kN)	P_{S2} (kN)	δ_{gap} (mm)	δ_{max}^{+} (mm)	δ_{max}^{-} (mm)	P_{S1}/P_{S2}	P_{S2}/P_{S1}
a	۹۳	۱۷۲	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۵۴	۱/۸۵
b	۷۴	۱۶۵	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۴۵	۲/۲۳
c	۷۰	۲۰۰	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۳۵	۲/۸۶
d	۵۵	۲۳۰	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۲۴	۴/۱۸
e	۴۵	۲۶۸	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۱۷	۵/۶
f	۳۵	۲۹۷	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۱۲	۸/۵
g	۹۳	۳۴۵	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۲۷	۳/۷
h	۷۰	۲۷۰	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۲۶	۳/۸۶
i	۵۰	۱۸۵	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۴۳	۳/۷
j	۳۵	۱۴۳	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۲۴	۴/۱

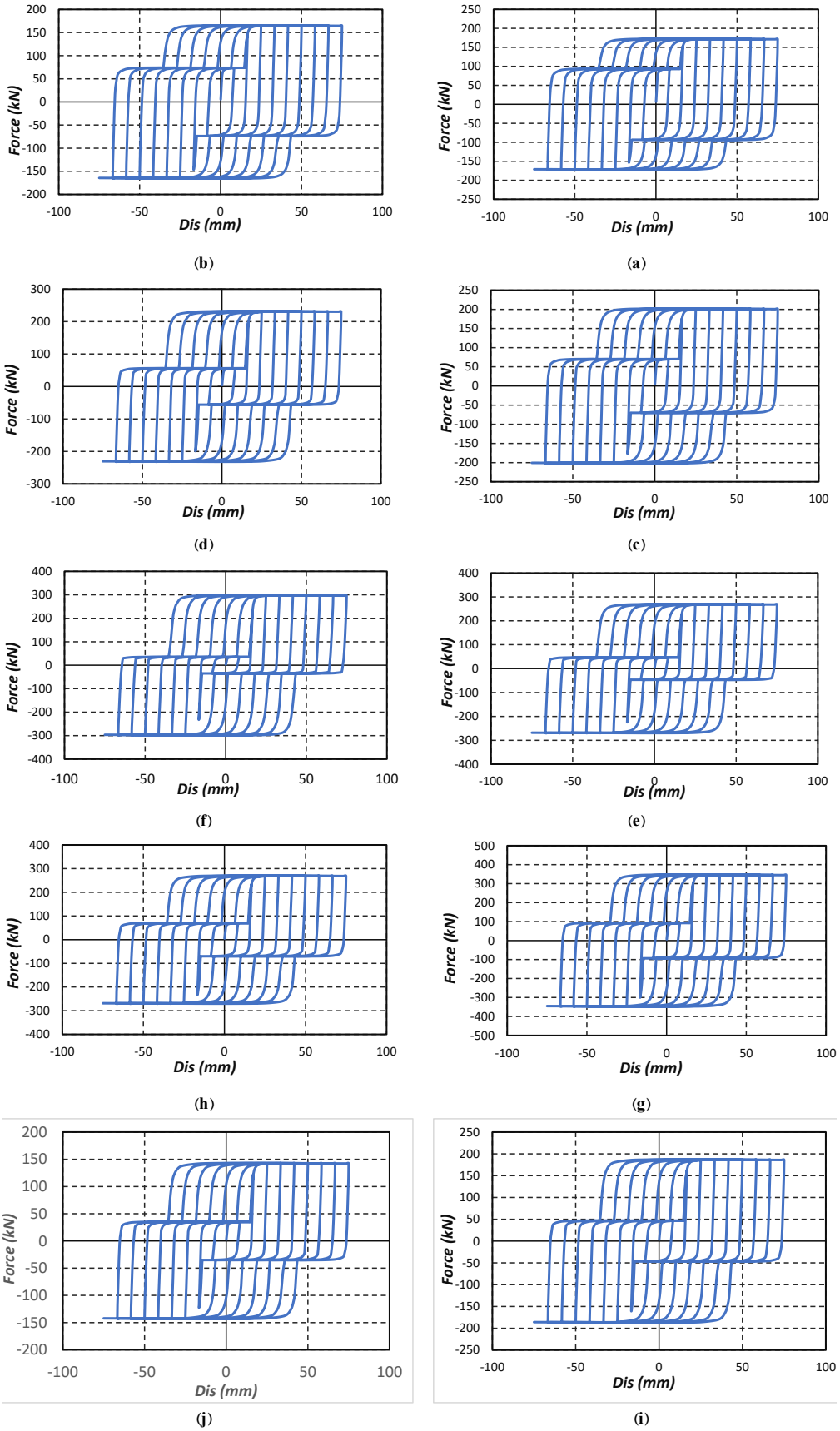
نتایج به دست آمده برای مدل B با مقادیر نیروی لغزش ۴۳ و ۱۲۵ کیلونیوتن با نتایج به دست آمده از مدل عددی در Open Sees انطباق مناسبی نشان می‌دهد. هر چند که افت سطح نیروی پیش‌تنیدگی در مدل‌های عددی دیده نمی‌شود. مشخصاً سختی‌های اختصاص داده شده به فیوز اول برابر۱۰ و فیوز دوم برابر ۲۰ کیلونیوتن بر متر است که باعث شده است که شیب شاخه‌های بار برداری در هر دو فیوز با مدل آزمایشگاهی منطبق شود.

۷-۱- مطالعه های پارامتری مدل المان محدود

برای مدل سازی رفتار چرخه‌ای میراگرهای دوسطحی اصطکاکی، مدل المان محدود میراگر با استفاده از نرم افزار Open sees ارائه شده است. نمونه مدل المان محدودی ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ای فزآینده منطبق بر پروتکل بارگذاری نشان داده شده در شکل ۱۵ تا دامنه ۷۵ میلی متر بارگذاری شده است. در جدول ۳ مشخصات پارامتری از جمله Δ_{gap} (تأخیر تغییر مکانی فیوز اصلی)، P_S نیروهای لغزش، نسبت آن ها و δ_{max} تغییر مکان نهایی اعمال شده به میراگر نشان داده شده است. نیروهای لغزش به نحوی انتخاب شده است تا بازه های متنوعی از نسبت های نیرو لغزش در دو فاز برای بررسی تأثیر این پارامتر بر روند جذب انرژی یا مقدار میرایی معادل ایجاد شود.

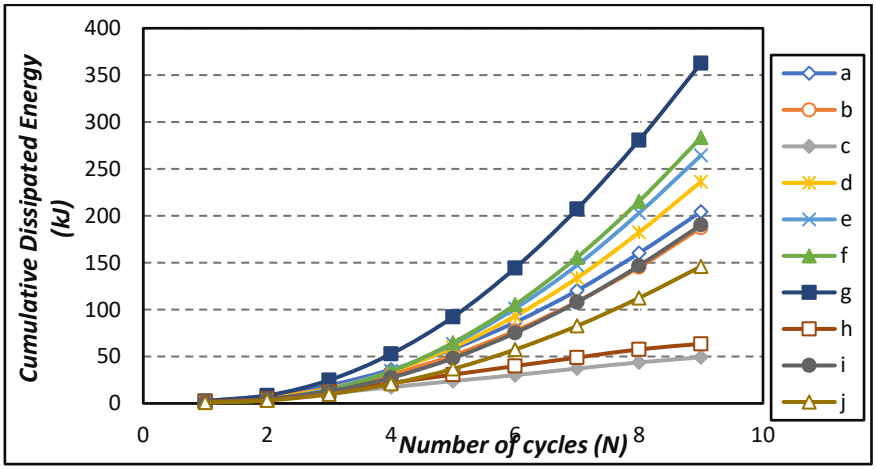
شکل ۱۷ نتایج به دست آمده از مدل سازی های عددی با بارهای لغزش متفاوت برای مدل های a-i را تحت بارگذاری چرخه‌ای با دامنه ی فزآینده را ارائه می‌کند. در شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ مقادیر اتلاف انرژی تجمعی، سختی مؤثر و میرایی ویسکوز معادل برای مدل‌های عددی بالا مقایسه شده است. از آنجا که روند افزایش دامنه‌ی تغییر مکانی برای همه آزمون‌ها یکسان می‌باشد، میزان اتلاف انرژی تجمعی بسته به نیروی لغزش در هر آزمون تغییر کرده است. در چرخه های اول به دلیل کم بودن دامنه‌ی تغییر مکان، اتلاف انرژی در همه مدل‌ها نزدیک هم می‌باشد. ولی با افزایش دامنه در چرخه‌های بالاتر، مقدار اتلاف انرژی (نرخ افزایش اتلاف انرژی) با افزایش نیروی لغزش بیشتر می‌شود. مدل (g) با نیروی لغزش بیشتر، بیشینه ی اتلاف انرژی را برای چرخه‌های متوالی دارد (شکل ۱۸) .

روند تغییرات سختی مؤثر در تمامی مدل‌ها نشان می‌دهد که در ابتدای ورود به فاز دوم به دلیل افزایش نیروی لغزش و تغییرات ناچیز دامنه‌ی جابه جایی، میزان سختی افزایش پیدا می‌کند اما در چرخه‌های بعدی با افزایش دامنه‌ی جابه جایی، کاهش در میزان سختی را در پی خواهد داشت. این تغییرات بیانگر این است که سختی القایی میراگر به سازه با شروع لغزش و با افزایش دامنه‌ی



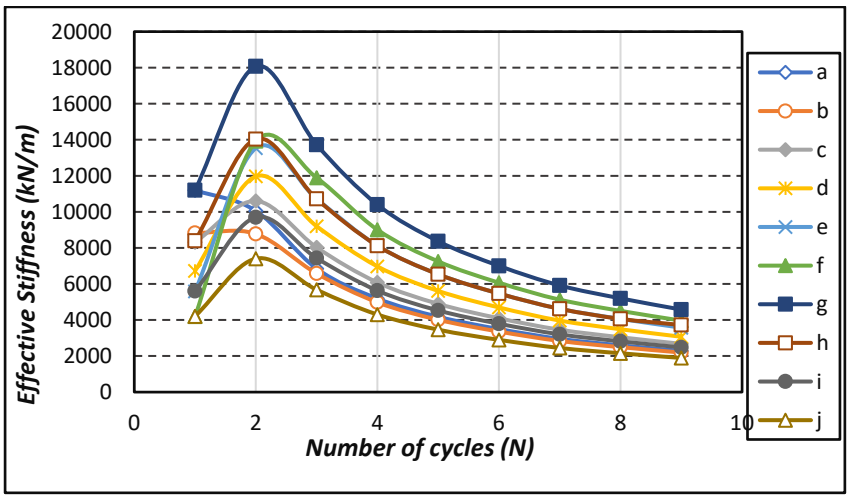
شکل ۱۷. نمودار نیرو-تغییر مکان مدل های عددی

Fig. 17. Force displacement cyclic curve of numerical component models a to j



شکل ۱۸. تغییرات اتلاف انرژی تجمعی در مقابل چرخه تجمعی

Fig. 18. Cumulative dissipated energy versus number of cycles in component numerical models



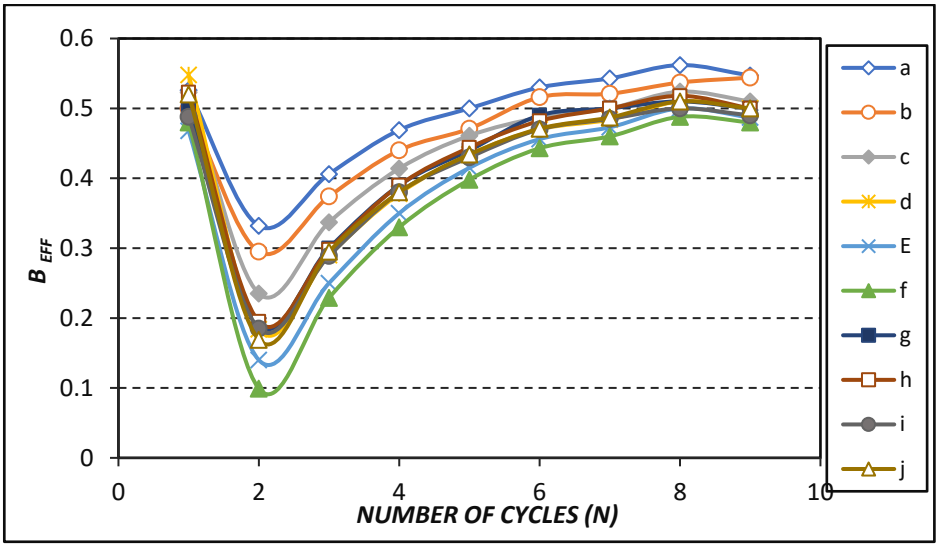
شکل ۱۹. تغییرات سختی مؤثر در نمونه های مدل‌سازی شده

Fig. 19. Effective stiffness variation versus number of cycles in cycles in component numerical models

جابه‌جایی‌های تجربه شده توسط میراگر، کاهش پیدا می‌کند (شکل ۱۹). همچنین افزایش میرایی در چرخه‌های اول بارگذاری مشهود است. پس از چرخه ی ۶ تقریباً تمام نمونه‌ها با نیروهای لغزش متفاوت، به یک مقدار میرایی در حدود ۰/۵۱ می‌رسند.

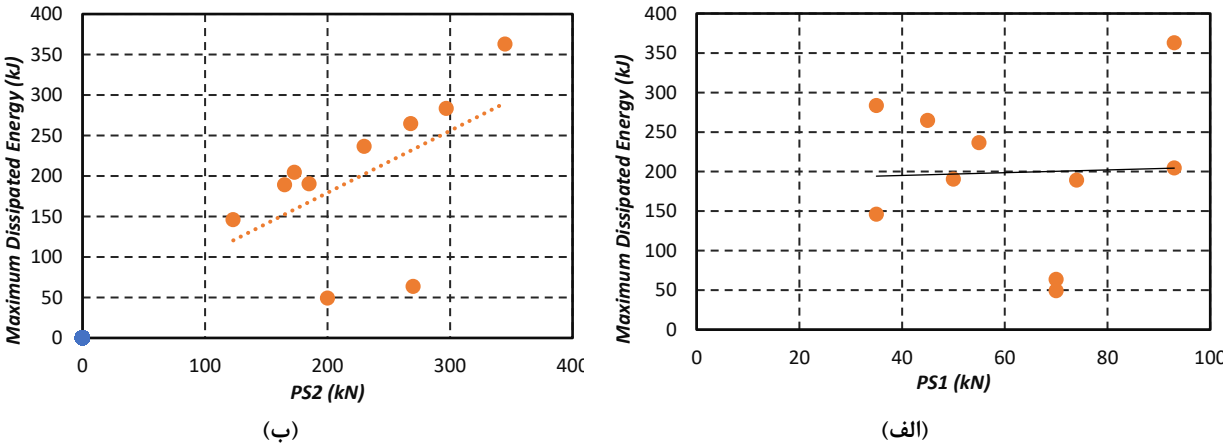
میرایی معادل برای هر چرخه در مدل‌های عددی با توجه به مساحت نیرو-تغییر مکان محاسبه شده است. شکل ۲۰ نشان دهنده‌ی تغییرات میرایی معادل در مدل های مختلف عددی و با نیروی‌های پیش تنیدگی متفاوت در مقابل چرخه های بارگذاری می‌باشد. در چرخه های اولیه به دلیل کم بودن بازه‌های تغییر مکان وارد شده، مساحت نیرو – تغییر مکان محاسبه شده قابل ملاحظه نیست ولی با افزایش دامنه در چرخه های بالاتر و اضافه شدن نیروی پیش تنیدگی در فیوز اصلی، مقدار میرایی معادل به خصوص در تغییر مکان‌های بزرگ تر از ۱۵ میلی متر افزایش مناسبی نشان می‌دهد. مقدار میرایی در چرخه‌های آخر بارگذاری به مقدار ۰/۵۱ رسیده است.

تأثیرات افزایش نیروی لغزش در هر دو فیوز بر روی مقادیر انرژی جذب شده در شکل ۲۱ نشان داده شده است. دو نمودار جداگانه مقدار ماکزیمم انرژی جذب شده بر اساس نیروی لغزش در فیوز اصلی و کمکی را نشان می دهد. روند به دست آمده نشان می‌دهد به دلیل تعداد چرخه های بالای اعمال شده در فیوز اصلی با دامنه‌ی تغییر مکان زیاد، مقدار نیروی لغزش در فیوز اصلی تأثیر بیشتری در انرژی جذب شده دارد. بر این اساس، تغییرات انرژی جذب شده در برابر تغییرات نسبت نیروهای پیش‌تنیدگی در شکل



شکل ۲۰. تغییرات میرایی ویسکوز معادل در نمونه های مدل سازی شده

Fig. 20. Effective equivalent damping versus number of cycles in cycles in component numerical models



شکل ۲۱. تغییرات انرژی جذب شده بر اساس تغییرات نیروی‌لغزش در (الف) فیوز کمکی (ب) فیوز اصلی

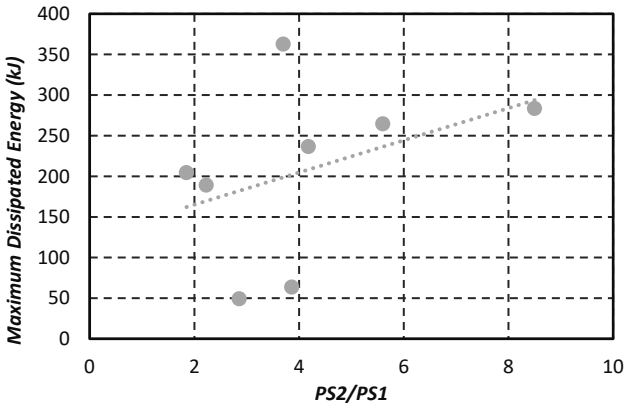
Fig. 21. Dissipated energy versus variation of fuse forces (a) Ps1 (b) Ps2

۲۲ ارائه شده است. روند کلی مشاهده شده در این نمودار بیانگر این نکته است که با افزایش نسبت نیروی پیش تنیدگی فیوز اصلی به کمکی، مقدار جذب انرژی افزایش می‌یابد. قضاوت در این مورد با در نظر گرفتن میراگر به تنهایی امکان پذیر نیست و باید مقدار جذب انرژی جذب شده توسط میراگر در سازه‌های مجهز به میراگر دوسطحی با میراگرهای معمول به خصوص در زمین لرزه‌های متوسط مقایسه شود.

۸- نتیجه گیری

یک میراگر اصطکاکی دوسطحی معرفی گردید. در این میراگر بار لغزش مربوط به هر یک از سطوح لغزشی با تنظیم نیروی پیش‌تنیدگی در فازهای متفاوت میسر گردید. برخورداری از مزیت‌های عمده‌ای نظیر هزینه ساخت وساز، تعمیر و نگهداری پایین نسبت به سایر میراگرها از وجوه تمایز میراگر اصطکاکی پیشنهادی به شمار می‌رود. همچنین این میراگرها به آسانی می‌توانند در سامانه ی مهاربندی قاب خمشی نصب گردند. از مهم ترین نتایج حاصله از این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- در تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی هدف آزمایش یعنی عملکرد دوسطحی میراگرها حاصل شده است. فیوز اول برای بازه‌هایی با دامنه‌ی کمتر از تأخیر تغییر مکانی بدون درگیر کردن فیوز دوم وارد



شکل ۲۲. تغییرات انرژی جذب شده بر اساس نسبت نیروهای لغزش

Fig. 22. Effect of first and second fuse slip force ratio on maximum dissipated energy

مرحله‌ی غیرخطی شده‌اند. پس از افزایش تغییر مکان اعمالی، انتقال نیرو از طریق رابط‌ها (پیچ‌ها) به فیوز دوم امکان پذیر شده است.

- مطالعات تجربی میراگر دوسطحی نشان می‌دهد که عملکرد دستگاه قابل پیش‌بینی است، از آنجایی که نیروی نرمال در پیچ‌ها به آسانی قابل اندازه‌گیری است. همچنین قابل اعتماد است به جهت اینکه زوال بار لغزشی در طول چرخه در محدوده‌ی قابل قبولی از آیین نامه ASCE/SEI41-06 می‌باشد. خصوصیات نیرو-جابه جایی HFD مانند بار لغزش، انرژی مستهلک شده، سختی مؤثر و میرایی ویسکوز معادل برای چرخه‌های متوالی بارگذاری بر اساس الزامات ASCE/SEI41-06 محاسبه گردید. نتایج نشان داد که این مقادیر در چرخه‌های متوالی بارگذاری در محدوده‌ی ۱۵٪ انحراف از معیار قرار دارند و در بحرانی‌ترین حالت که مربوط به چرخه‌ی اول از نمونه B می‌باشد، مقادیر بار لغزش و انرژی اتلافی به ترتیب ۱۰و ۱۱ درصد از مقدار میانگین انحراف داشتند.
- اضافه شدن فیوز اصلی در بازه تغییرمکان‌های بیشتر از گپ باعث می‌شود افت نیروی پیش تنیدگی در پیچ‌ها به دلیل وارد شدن منبع جدید اتلاف انرژی بدون بارگذاری اولیه (فیوز اصلی) کاهش یابد. نتایج مطالعه‌های عددی نشان می‌دهد مدل ساخته شده با استفاده از ترکیب المان‌های لینک در نرم افزار Open Sees به خوبی قادر است رفتار دوسطحی نیرو-تغییر مکان به دست آمده از آزمایش را مدل سازی کند. همچنین بررسی انرژی تلف شده در طول بارگذاری نشان می‌دهد با اضافه شدن فیوز اصلی به سیستم اتلاف انرژی، مقادیر میرایی و اتلاف انرژی افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند که مقدار افزایش متناسب با نیاز سازه در زمین‌لرزه‌های با شدت بالا می‌باشد.

فهرست علایم

F^+	نیروی بیشینه
F^-	نیروی کمینه
k_{eff}	سختی موثر
P_{s1}	نیروی لغزش در فیوز اول
P_{s2}	نیروی لغزش در فیوز دوم
w_D	انرژی هیسترزیس
β_{eff}	میرایی معادل ویسکوز
Δ_{avr}	میانگین تغییر مکان
Δ^+	تغییر مکان بیشینه
Δ^-	تغییر مکان کمینه
δ_{gap}	تغییر مکان گپ

مراجع

[1] ASCE. 2010. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE Standard ASCE/SEI 7-10. American Society of Civil Engineers: Reston, Virginia.

[2] T. Soong, B. Spencer Jr, Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice, Engineering structures, 24(3) (2002) 243-259.

[3] M. Symans, F. Charney, A. Whittaker, M. Constantinou, C. Kircher, M. Johnson, R. McNamara, Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments, Journal of structural engineering, 134(1) (2008) 3-21.

[4] R.J. Smith, M.R. Willford, The damped outrigger concept for tall buildings, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 16(4) (2007) 501-517.

[5] D.H. Kim, Y.K. Ju, M.H. Kim, S.D. Kim, Wind-induced vibration control of tall buildings using

hybrid buckling-restrained braces, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 23(7) (2014) 549-562.

[6] C. Christopoulos, M. Montgomery, Viscoelastic coupling dampers (VCDs) for enhanced wind and seismic performance of high-rise buildings, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 42(15) (2013) 2217-2233.

[7] C. Christopoulos, M. Montgomery, Viscoelastic coupling dampers (VCDs) for enhanced wind and seismic performance of high-rise buildings, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 42(15) (2013) 2217-2233.

[8] Y.E. Ibrahim, J. Marshall, F.A. Charney, A visco-plastic device for seismic protection of structures, Journal of Constructional Steel Research, 63(11) (2007) 1515-1528

[9] J.D. Marshall, F.A. Charney, A hybrid passive control device for steel structures, I: Development and analysis, Journal of Constructional Steel Research, 66(10) (2010) 1278-1286.

[10] D.H. Kim, Experimental Study on the Seismic Performance of Hybrid Buckling-Restrained Braces, Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 13(4) (2013) 23-29

[11] C.-H. Lee, J. Kim, D.-H. Kim, J. Ryu, Y.K. Ju, Numerical and experimental analysis of combined behavior of shear-type friction damper and non-uniform strip damper for multi-level seismic protection, Engineering Structures, 114 (2016) 75-92.

[12] A. Cheraghi, S.M. Zahrai, Innovative multi-level control with concentric pipes along brace to reduce seismic response of steel frames, Journal of Constructional Steel Research, 127 (2016) 120-135

[13] B. Hosseini Hashemi, E. Moaddab, Experimental study of a hybrid structural damper for multi-seismic levels, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 170(10) (2017) 722-734.

[14] F. Prestandard, commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA356), Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 7 (2000).

[15] ASCE 41-06, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, American So16ciety of Civil Engineers, Virginia(USA), (2007).

[16] S.J. Venture, State of the art report on systems performance of steel moment frames subject to earthquake ground shaking, FEMA 355C, (2000).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Moaddab, B. Shahbazi, Experimental and Numerical Study of Hybrid Friction Damper, Amirkabir J. Civil Eng., 52(1) (2020) 53-72.

DOI: 10.22060/ceej.2018.14589.5700