

# معرفی و بررسی عملکرد یک سیستم جداساز لرزه‌ای ترکیبی با قابلیت مرکزگرایی

شبنم پرویزی<sup>۱</sup>، حامد خضرزاده<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران (سازه)، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

Email: \*khezrzhadeh@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۳/۳۱]

تاریخ دریافت: [۱۴۰۱/۱۱/۲۵]

## چکیده

در این پژوهش یک سیستم جداساز الاستومر با هسته سربی در ترکیب با اصطکاک معرفی شده که دارای قابلیت مرکزگرایی است. یک پوسته گنبدی روی سیستم جداساز الاستومر-سرب قرار گرفته و از اصطکاک آن پوسته با سطح زیرین سیستم نیروی اصطکاکی ایجاد می‌شود. به کار بردن عملکرد اصطکاک در ترکیب سیستم جداسازی الاستومری باعث افزایش ظرفیت میرایی آن شده و همچنین وجود این پوسته مانع از ضربه و برخورد ناگهانی اجزای سازه به سیستم جداسازی می‌شود. با توجه به رفتار فوق ارتجاعی آلیاژ حافظه‌شکلی، از این آلیاژ برای افزایش ظرفیت مرکزگرایی سیستم جداسازی استفاده شده است. راهبرد طراحی سیستم جداساز مرکزگرا در این پژوهش بر اساس چندین هدف که از جمله آن؛ ایجاد قابلیت مرکزگرایی، کنترل مقدار نیروی برشی و سختی جانبی سیستم در نظر گرفته شده است. عملکرد سیستم جداساز پیشنهاد شده نیز دوخطی بوده و بر اساس کرنشی که تغییر فاز آلیاژ در آن کرنش رخ می‌دهد، تعریف می‌شود. سیستم پیشنهادی به علت دارا بودن هندسه خاص و قرارگیری متقارن المان‌ها در سیستم نسبت هر راستای زلزله عکس‌العمل متناسب دارد. در این پژوهش یک نمونه آزمایشگاهی سیستم جداساز الاستومر-سرب در نظر گرفته شده و تاثیر رفتار آلیاژ حافظه‌شکلی و عملکرد اصطکاک بر آن بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است عملکرد سیستم جداساز ترکیبی مرکزگرا نسبت به سیستم جداساز الاستومر-سرب در ظرفیت استهلاک انرژی، مقدار نیروی برشی به ترتیب ۵۰ و ۱۵۰ درصد افزایش و در تغییرشکل پسماند تا حدود ۴۵ درصد کاهش یافته است. در پایان عملکرد این سیستم نسبت به مولفه‌های حساس بررسی شده و با توجه به نتایج نشان داده شده است که عملکرد سیستم پیشنهاد شده توسط این پژوهش نسبت به مولفه ضریب ابعادی، نسبت به سیستم جداساز الاستومر-سرب حساسیت کمتری دارد.

**کلید واژگان:** مرکزگرایی، سیستم جداساز الاستومر-سرب، آلیاژ حافظه‌شکلی، ظرفیت میرایی، روش اجزای محدود، نیروی اصطکاک قابل تنظیم

معروف‌ترین آن‌ها می‌توان به سیستم‌های جداساز الاستومر و سیستم‌های اصطکاکی اشاره کرد. با این حال چندین محدودیت در استفاده از این سیستم‌ها وجود دارد که از جمله آن می‌توان به زلزله‌های نزدیک به گسل، زلزله‌های عمودی، عدم اطمینان به مواد تشکیل دهنده، برخورد اجزای سازه به سیستم جداساز،

## ۱- مقدمه

یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای بهسازی سازه در برابر زلزله-های شدید، استفاده از سیستم‌های جداساز لرزه‌ای پایه‌ای است. سیستم‌های جداساز لرزه‌ای انواع متفاوتی دارند که از جمله

اصطکاکی با سطح صاف در ترکیب فنر از جنس آلیاژ حافظه شکلی را بررسی کرده است [6]. در هر دوی این سیستم‌ها ظرفیت مرکزگرایی ایجاد شده، و تغییرشکل‌های پسماند سیستم را به حداقل مقدار خود رسانده است اما با توجه به آنکه راستای زلزله مشخص نیست، ممکن است این فنرها در راستای عمود بر زلزله جایگذاری نشده و در حین وقوع زلزله عملکرد خوبی نداشته باشند. با توجه به آنکه سیم‌های آلیاژ حافظه شکلی در رفتار فوق ارتجاعی خود تحت کشش، بهترین عملکرد را دارد پژوهش [7] ترکیب سیستم جداسازی اصطکاکی با سیم‌های آلیاژ حافظه شکلی در عملکرد کشش را بررسی کرده و عملکرد سیستم جداسازی مرکزگرا را با عملکرد سیستم جداساز الاستومر-سرب مقایسه کرده است. نتایج حاکی از آن است که سیستم جداسازی مرکزگرا عملکردی به خوبی سیستم الاستومر-سرب داشته و در عین حال تغییرشکل پسماند آن کمتر است اما از آنجا که راستای زلزله مشخص نیست، وقوع زلزله‌های عمود بر راستای سیستم مرکزگرا عملکرد سیستم را مختل می‌کند. همچنین در پژوهش دیگری عملکرد سیم‌های آلیاژ حافظه شکلی در مقایسه با عملکرد سیستم جداساز الاستومر-سرب تحت نیروهای اعمالی بر پایه‌ی پل بررسی شده و نتایج حاکی از آن بود که عملکرد سیم‌های آلیاژ به تنهایی در استهلاک انرژی برابر سیستم الاستومر-سرب است [8]. در مرجع [9] یک سیستم ترکیبی برای کاهش تغییرشکل پسماند ارائه شده است، این سیستم ترکیبی از دو قسمت کاملاً مجزا تشکیل شده است؛ سیستم جداساز اصطکاکی به همراه کابل‌های پیش تنیده و سیستم متشکل از فنر مارپیچ و صفحه‌های فولادی که به صورت موازی با سیستم اول کار کرده و ظرفیت میرایی سیستم را افزایش می‌دهند. با توجه به تجهیزات به روز به کار برده شده در این سیستم به نظر می‌رسد این طرح مقرون به صرفه نبوده و در مقایسه عملکرد آلیاژ حافظه شکل بهتر و موثرتر است.

آلیاژهای حافظه شکلی بخاطر رفتار سوپرالاستیک و حافظه شکلی، یکی از رایج‌ترین مصالح در سیستم‌های مرکزگرا هستند. از آنجا که بهترین عملکرد این آلیاژ در رفتار محوری آن است، پس بیشتر سیستم‌های مرکزگرای معرفی شده از این آلیاژ در

پیچش و نیروهای دو محوری، نیروی قائم کششی و تغییرشکل پسماند اشاره کرد

یکی از بزرگترین محدودیت‌های سیستم‌های جداسازی اصطکاکی عدم بازگشت سازه به موقعیت اولیه خود پس از وقوع زلزله است. به منظور رفع این مشکل سیستم‌های جداسازی پاندول اصطکاکی معرفی شد که به علت هندسه کرووی سطح اصطکاکی، جابه‌جایی پسماند سیستم به حداقل مقدار خود می‌رسد. در دهه‌های اخیر ایجاد ظرفیت مرکزگرایی برای رفع جابه‌جایی پسماند یکی از رایج‌ترین موضوع‌های مورد بررسی در سیستم‌های جداسازی است اما در آیین‌نامه‌ها هیچ اشاره‌ای به سیستم‌های جداساز مرکزگرا نشده است. در مرجع [1] با استفاده از کماتش صفحه‌های فولادی، ظرفیت مرکزگرایی یک سیستم جداسازی روی پایه پل بررسی شده است. این عملکرد با عنوان سازوکار سختی منفی شناخته می‌شود و در کاهش تغییرشکل پسماند تاثیر به‌سزایی داشته است اما هندسه پیچیده‌ای دارد. همچنین در مراجع [2, 3] روی رفتار خمشی صفحه‌های فولادی به منظور افزایش ظرفیت میرایی بررسی شده است. سیستم‌های جداساز پاندول اصطکاکی به منظور کاهش در تغییرشکل پسماند سیستم‌های اصطکاکی معرفی شدند اما با توجه به آنکه دوره تناوب این سیستم‌ها تنها به شعاع سطح اصطکاک وابسته است، در اثر زمین لرزه‌های قوی سرعت لغزش افزایش یافته و همین عامل دلیل ناکارآمدی این سیستم‌ها در معرض زلزله‌های شدید است. مرجع [4] به منظور رفع این محدودیت کابل‌های آلیاژ حافظه شکلی را به موازات سیستم پاندول اصطکاکی قرار داده و عملکرد آن را تحت زلزله‌های نزدیک گسل بررسی کرده است. مرجع [5] عملکرد سیستم جداسازی اصطکاکی با سطح صاف در اتصال با یک فنر به شکل مخروط، برای افزایش ظرفیت مرکزگرایی را مورد بررسی قرار داده است. با توجه به هندسه خاص این فنر، سختی آن به صورت نمایی افزایش یافته و در برابر اعمال مقدار بار کم همچون باد سختی کم و در برابر وقوع زلزله مقدار سختی زیاد خواهد داشت. به این ترتیب فرکانس سازه از فرکانس بارگذاری باد و زلزله فاصله یافته و احتمال وقوع رزونانس در سازه در اثر بارگذاری، کم خواهد شد. پژوهش دیگری روی ظرفیت سیستم

به پوسته گنبدی و از سمت دیگر به سیستم جداساز الاستومر سرب متصل می‌شوند. با تکرار سیم‌های آلیاژ در زوایای مختلف این سیستم جداساز ترکیبی مرکزگرا در برابر همه راستاهای زلزله تاثیرگذار خواهد بود. در پایان تاثیر سیستم مرکزگرا بر سیستم جداساز ترکیبی مورد بررسی و حساسیت سنجی قرار گرفته است.

## ۲- مدل‌سازی عددی و راستی آزمایشی

سیستم الاستومر-سرب یکی از رایج‌ترین سیستم‌های بر پایه الاستومر است. سیستم الاستومر-سرب معرفی شده در این پژوهش بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی سیستم جداساز به کار رفته در جداسازی یک برج تاریخی بر اساس اطلاعات مرجع [16] است. از الاستومر با میرایی بالا در این سیستم استفاده شده است. ضریب برشی این الاستومر برابر  $0/4$  مگاپاسکال و درصد میرایی آن برابر ۱۰ درصد است. صفحه‌های فولادی با هدف افزایش سختی عمودی در این سیستم قرار می‌گیرند. از فولاد با مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون برابر  $0/25$  در این سیستم استفاده شده است. سرب در این پژوهش دارای تنش تسلیم ۱۰ مگاپاسکال، تنش نهایی ۱۵ مگاپاسکال، و ضریب پواسون  $0/42$  می‌باشد. فرض بر آن است که صفحه‌های فولادی و الاستومر توسط چسب به یکدیگر متصل شده‌اند و یکپارچه عمل می‌کنند اما بین این صفحه‌ها و هسته سربی لغزش با ضریب اصطکاک  $0/4$  عمل می‌کند. تعداد لایه‌های الاستومر برابر ۱۱ عدد با ضخامتی برابر ۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. قطر کلی این سیستم برابر ۳۵۰ میلی‌متر و قطر هسته سربی برابر ۶۰ میلی‌متر است. سختی موثر اسمی این سیستم برابر با  $0/49$  کیلونیوتن بر میلی‌متر و بیشینه جابه‌جایی و نیروی قائم به ترتیب برابر ۲۱۰ میلی‌متر و ۷۰۰ کیلونیوتن، و میرایی سیستم برابر ۲۶ است.

رفتار فوق ارتجاعی<sup>۲</sup> الاستومر بر اساس سری اوگدن<sup>۳</sup> و رفتار ویسکوالاستیک الاستیک بر اساس سری پرونی<sup>۴</sup> بر اساس مشخصات جدول‌های (۱ و ۲) به مدل معرفی شده است. برای

شکل کابل و یا سیم استفاده کرده‌اند. دزفولی<sup>۱</sup> در چندین پژوهش خود روی افزایش ظرفیت مرکزگرایی سیستم‌های جداسازی پایه‌ای بررسی انجام داده است. در این پژوهش‌ها سیستم‌های اصلاح کننده مرکزگرایی متشکل از آلیاژ حافظه شکلی بر اساس چند هدف طراحی، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در سال ۲۰۱۳ در مرجع [10]، دزفولی دو هندسه متقاطع و موازی متشکل از سیم‌های آلیاژ حافظه شکلی و سیستم جداسازی الاستومر معرفی کرد و بر اساس سعی و خطا بهترین عملکرد و هندسه از بین سیستم‌ها معرفی کرد. در مرجع [11] عملکرد این سیستم را در سیستم جداسازی الاستومر با میرایی بالا بررسی شده است. در مرجع [12] به رفتار موازی و عملکرد مجزا سیم‌های آلیاژ حافظه شکلی و سیستم الاستومری پرداخته و رفتار این سیستم بر اساس الگوریتم چند هدفه مورد بررسی قرار داده شده است. در مراجع [13 و 14] به بررسی عملکرد سیستم مرکزگرا در سیستم الاستومر-سرب در پل‌ها پرداخته شده که هندسه‌ای متفاوت از پژوهش‌های سابق خود دارد. در مرجع [15] با توجه به سیستم پژوهش [14]، به منظور به دست آوردن بهترین عملکرد از سیم‌های آلیاژ، بهینه‌سازی چند هدفه بررسی شده است. در این پژوهش سیم‌های آلیاژ ابتدا با کمک یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه و روش جمع وزنی بهینه‌سازی بررسی شده و در نهایت عملکرد آنها در کاهش تغییرشکل پسماند برای سیستم جداسازی الاستومر-سرب مورد بررسی قرار گرفته است.

در این پژوهش در ابتدا سیستم جداسازی الاستومر-سرب متداول ارائه شده است. سپس جزئیات مدل‌های استفاده شده برای هر ماده و چگونگی مدل‌سازی آنها به منظور اعتبارسنجی و راستی‌آزمایی نتایج عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی صورت گرفته است. پس از انجام اعتبارسنجی بررسی عملکرد سیستم الاستومر-سرب در ترکیب با سیستم اصطکاک بررسی شده است. با توجه به ظرفیت مرکزگرایی آلیاژ حافظه شکلی، از این آلیاژ در در سیستم جداسازی ترکیبی به منظور ایجاد ظرفیت مرکزگرایی استفاده شده است. برای تامین کرنش مورد نظر در سیستم مرکزگرا، سیم‌های آلیاژ از یک طرف

1 Hyperelastic  
2 Ogden  
3 Prony

1 Dezfuli

شکل ۱. نمودارهای هیستریزس سیستم جداسازی، مقایسه مدلسازی و نتایج آزمایشگاهی [16]

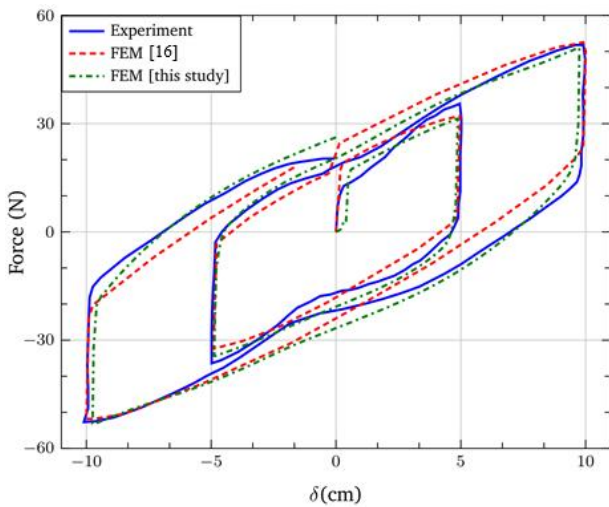


Fig. 1. Hysteresis curves of LRB, comparison of modeling and experimental results [16]

جدول ۳. مشخصه‌های اصلی نمودارهای هیستریزس سیستم جداسازی، مدلسازی و نتایج آزمایشگاهی در جابه‌جایی بیشینه سیستم [16]

	FEM [this study]	FEM [16]	Experiment [16]
$W_d$ (kJ)	8559	9115	8796
$K_{eff}$ (k N/m)	522	521	522
$\xi$ (%)	0.26	0.28	0.27

Table 3. The characteristics of hysteresis curves of LRB, modeling and experimental results in the maximum displacement of the system [16]

### ۳- سیستم جداساز الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده

در پژوهش [17] از یک سطح اصطکاک به عنوان اصلاح کننده رفتار میرایی در یک سیستم الاستومر-سرب استفاده شده است. این سطح اصطکاک در بالای سیستم جداساز الاستومر-سرب قرار گرفته و این سیستم را در برابر زلزله‌های نزدیک به گسل مقاوم‌تر می‌کند. با الهام از هندسه این پژوهش و در نظر گرفتن احتمال برخورد اجزای روسازه با سیستم جداسازی در هنگام زلزله، هندسه سیستم اصلاح کننده رفتار میرایی ارائه شده است. هندسه این سیستم با توجه به شکل (۲) پیشنهاد شده است.

مدلسازی لایه الاستومر از المان C3D8RH با تعداد المان برابر با ۲۲۰۸، برای مدلسازی لایه فولادی و هسته سربی از المان C3D8R و به ترتیب تعداد مش ۱۱۰۴ و ۲۹۷۵ استفاده شده است. اتصال صفحه‌های الاستومر و فولادی به صورت کاملاً مقید (tie) و اتصال مابین هسته سربی و صفحه‌ها با استفاده از قید اصطکاک (surface-to-surface) معرفی شده است. در تعریف قیدها به ترتیب صفحه فولادی و هسته سربی به عنوان (slave surface) در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. مشخصات رفتار فوق‌ارتجاعی الاستومر (مولفه C بر حسب مگاپاسکال) [16]

$C_{10}$	$C_{20}$	$C_{30}$	$D_1$	$D_2$	$D_3$
0.22	0.0044	0.00013	0.0021	0.000086	-0.000018

Table 1. Characteristics of the hyperelastic behavior of rubber (C in MPa) [16]

جدول ۲. مشخصات پارامترهای ویسکو الاستیک الاستومر [16]

$g_1$	$\tau_1$	$g_2$	$\tau_2$
0.2	0.4	0.075	0.2

Table 2 Characteristics of the viscoelastic parameters of rubber [16]

این سیستم جداسازی تحت فرکانس ۰/۵ هرتز، و نیروی قائم ۶۵۰ کیلونیوتن و جابه‌جایی به مقدار ۵ و ۱۰ سانتی‌متر قرار دارد.

راستی آزمایشی انجام شده بر اساس اطلاعات نمونه آزمایشگاهی و عددی پژوهش [16] در شکل (۱) انجام شده است. مشخصه‌های اصلی هر سه نمودار در جابه‌جایی بیشینه سیستم، در جدول (۳) نمایش داده شده است. به طور خلاصه، نتایج حاصل در مقایسه با نمودار آزمایشگاهی در دامنه بارگذاری ۱۰ سانتی-متر، با نمودار آزمایشگاهی ۰/۸ درصد و با نمودار تحلیلی ارائه شده توسط مقاله ۰/۷ درصد در بیشینه نیرو و تفاوت در سطح زیر منحنی هیستریزس با نمودار آزمایشگاهی ۳ درصد و با نمودار تحلیلی ارائه شده توسط مقاله ۶/۵ درصد است.

شکل ۲. شمای کلی سیستم جداساز الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده

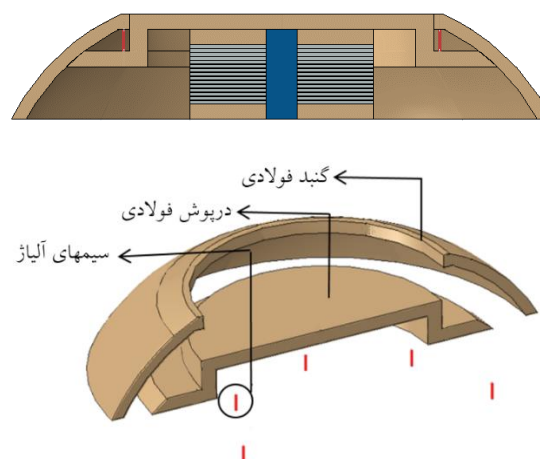


Fig. 2 . Sketch of modified damping LRB (MDLRB)

سرب ایجاد کند، می‌توان این مقدار افزایش نیرو برش را کنترل کرد. به همین علت به کمک چند سیم یک مسیر انتقال نیرو در نظر گرفته می‌شود تا مقدار نیرو به صورت کنترل شده به سطح اصطکاک انتقال پیدا کند. تعداد سیم‌ها، ۸ عدد در نظر گرفته شده است و با هندسه‌ای متقارن در سیستم قرار گرفته‌اند. به جای سیم می‌توان از پیچ‌های پر مقاومت نیز استفاده کرد اما در این پژوهش از سیم‌های آلیاژ حافظه شکی استفاده شده است.

در این پژوهش به علت کاهش نیروی قائم و انتقال آن به صفحه پوسته گنبدی، مقدار نیروی بیشینه برشی افزایش می‌یابد. بنابراین در سیستم جداساز الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده میزان افزایش برش هم در اثر اصطکاک و هم در اثر کاهش نیروی قائم روی سیستم جداساز رخ می‌دهد. در واقع نیروی قائم از طریق درپوش فولادی به سیم آلیاژ، سپس به پوسته فولادی منتقل می‌شود. از طریق سطح اصطکاک این گنبد با صفحه فولادی پایین سیستم جداسازی مقدار نیروی برشی برای مقابله با نیروی زلزله، از طریق اصطکاک ایجاد خواهد شد. با توجه به پژوهش آزمایشگاهی [18] مقدار ضریب اصطکاک فولاد روی فولاد برابر  $0.33$  در نظر گرفته شده و تاثیر قطره‌های مختلف سیم‌های آلیاژ مورد بررسی قرار گرفته است.

به منظور دستیابی به موثرترین عملکرد این دستگاه، تاثیر دو مولفه ضریب اصطکاک و قطر سیم آلیاژ در بخش‌های ۱-۳ و ۲-۳ مورد بررسی قرار گرفته است و در نهایت عملکرد این سیستم نسبت به مولفه‌های حساس، حساسیت سنجی شده است. عملکرد این سیستم نسبت به سیستم جداساز الاستومر-سرب در شکل (۳) نمایش داده شده است.

### ۳-۱ بررسی اثر میزان بار قائم انتقالی

در این بخش میزان انتقال نیروی قائم توسط سیم‌های آلیاژ مورد بررسی قرار می‌گیرد تا موثرترین عملکرد مشخص شود. نتایج حاصل بر اساس مولفه‌های اصلی سیستم در دامنه‌های بارگذاری برابر ۱۰ سانتی‌متر و فرکانس برابر  $0.5$  هرتر با توجه به جدول (۴) است. با توجه به نتایج حاصل از این آزمایش‌ها با هشت عدد سیم با شعاع  $5/7$  میلی‌متر می‌توان تا ۹۵ درصد کل بار قائم را به صفحه‌ی اصطکاک انتقال داد.

در سیستم پیشنهادی با قرار دادن پوسته گنبدی روی سیستم جداساز لرزه‌ای الاستومر-سرب، از اصطکاک آن با صفحه پایین سیستم جداسازی، انرژی بیشتری مستهلک شده و میرایی سیستم را افزایش می‌دهد. دلیل اصلی استفاده از هندسه کروی، تنها به این علت است که تماماً نیروی فشاری در این پوسته ایجاد شده و از کمانش آن جلوگیری شود.

سختی پوسته فولاد بسیار بیشتر از سختی قائم سیستم جداسازی و سرب است، این نیروی روسازه مستقیماً به پوسته گنبدی منتقل می‌شود. با توجه به آنکه میزان روباره سیستم قابل توجه است، این مقدار نیرو ایجاد یک نیروی افقی اصطکاک‌کی قابل توجهی می‌کند و در نتیجه مقدار بیشینه نیروی برشی سیستم جداسازی به صورت محسوس افزایش می‌یابد، این موضوع اصلاً مطلوب نیست و باعث افزایش مقدار سختی افقی در جابه‌جایی‌های کوچک می‌شود. انتقال این نیرو از پوسته گنبدی به صفحه اصطکاک باعث ایجاد افزایش در نیروی برشی و ظرفیت میرایی است، اما دو تاثیر نامطلوب خواهد داشت. اول آنکه برش پایه روسازه افزایش یافته و تاثیر زلزله روی روسازه و خرابی ناشی از آن بیشتر خواهد شد و دوم آنکه بار قائم سیستم جداساز الاستومر-سرب کاهش می‌یابد. در مجموع ظرفیت استهلاک انرژی در اثر عملکرد اصطکاک افزایش می‌یابد. اگر یک سختی به صورت سری با پوسته گنبدی فولادی عمل کرده و اتصال این صفحه را به سیستم جداساز الاستومر-

### ۳-۲ بررسی اثر ضریب اصطکاک سطح

با توجه به نتایج پژوهش [18] هر چه میزان بار قائم افزایش پیدا کند، مقدار سختی موثر و مدول برشی موثر سیستم جداسازی لرزه‌ای کاهش پیدا خواهد کرد و هر چه ضریب شکل لایه‌های الاستومر کوچکتر در نظر گرفته شود، اثر افزایش بار قائم بر کاهش این کمیت‌ها بیشتر می‌شود، با این حال با افزایش بار قائم، مساحت زیر منحنی و ضریب میرایی افزایش پیدا خواهد کرد و با کاهش ضریب شکل لایه‌های الاستومر، اثر افزایش بار قائم بر افزایش میرایی افزایش پیدا خواهد کرد.

شکل ۳. نمودارهای هیستریزس سیستم‌های جداسازی الاستومر-سرب با

میرایی اصلاح شده

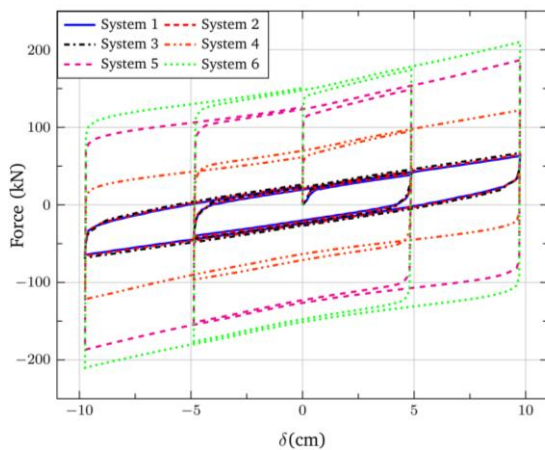


Fig. 4 . Hysteresis curves of the MDLRBs

اگر فقط اصلاح در عملکرد رفتار سیستم در جهت قائم مد نظر باشد، با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک برابر صفر و هندسه‌ای برابر شکل (۲) می‌توان نتایج حاصل از تحلیل را با نتایج آزمایشگاهی سیستم جداساز الاستومر-سرب مقایسه کرد.

جدول ۴. اثر قطر سیم روی عملکرد سیستم با میرایی اصلاح شده

System NO.	$\beta_{eff}$	$K_{eff}$ (kN/m)	$W_d$ (kJ)	Load (%)	A/l (mm)	D (mm)	$\mu$
System 1	0.29	654	8.38	0.89	0.02	1.00	0.33
System 2	0.30	671	8.88	1.94	0.04	1.50	0.33
System 3	0.31	693	9.56	3.36	0.08	2.00	0.33
System 4	0.36	1250	26.82	28.39	0.71	6.00	0.33
System 5	0.44	1917	50.76	62.54	1.58	9.00	0.33
System 6	0.47	2156	60.15	95.17	2.53	11.4	0.33

Table 4. The effect of wire diameter on the performance of MDLRB ( $\mu$ :Friction coefficient, D :Wire diameter, A/l :Area to length ratio)

شکل ۳. نمودارهای هیستریزس سیستم جداسازی الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده در مقایسه با سیستم جداسازی الاستومر-سرب

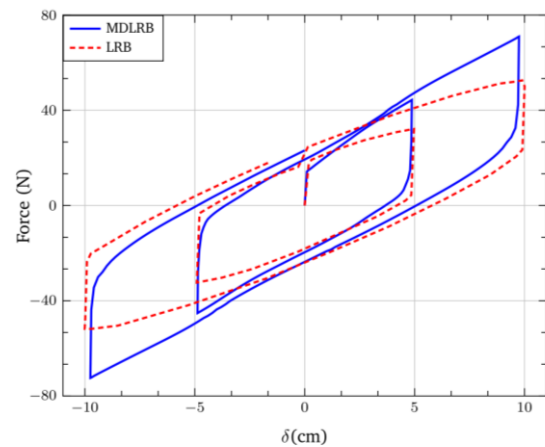


Fig. 3 . Hysteresis curves of MDLRB in comparison of LRB

شش سیستم با شرایط یکسان در نظر گرفته شد و تنها تفاوت این سیستم‌ها در قطر سیم‌ها است. همانطور که از نتایج مشخص است با افزایش قطر سیم، میزان انتقال بار قائم به صفحه اصطکاک بیشتر می‌شود. نسبت این نیرو به نیروی سربار سیستم که برابر ۶۵۰ کیلونیوتن است، در جدول (۴) ذکر شده است. همان طور که از نتایج مشخص است، با افزودن سیستم اصلاح کننده میرایی به سیستم الاستومر-سرب، ضریب میرایی از ۱۲ درصد الی ۸۰ درصد افزایش پیدا خواهد کرد. هر چه ضریب اصطکاک و سختی محوری این سیم‌های قائم بیشتر باشد این افزایش بیشتر خواهد شد. عملکرد این شش سیستم در شکل (۴) نمایش داده شده است. با توجه به آنکه تمرکز اصلی این مقاله روی مرکزگرایی سیستم جداسازی است، در مدل نهایی از قطر سیم برابر ۱/۵ میلی‌متر استفاده شده است.

بررسی روی رفتار دقیق سیستم‌ها اعمال بار به شکل سینوسی در نظر گرفته شد

در شکل (۵) مقدار نیروی برشی ایجاد شده در هر دو سیستم به ازای فرکانس‌های متفاوت نمایش داده شده است. به طور کلی با افزایش فرکانس و دامنه بارگذاری، مقدار نیروی برشی ایجاد شده در سیستم جداساز الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده بیشتر است، اما در فرکانس‌های پایین تفاوت محسوسی در عملکرد این جداسازها دیده نمی‌شود. همچنین هر دوی این سیستم‌ها نسبت به تعداد چرخه بارگذاری حساس نیستند.

مرجع [19] تاثیر ضریب ابعادی روی سیستم جداساز الاستومر-سرب بررسی کرده است. تعداد لایه‌های الاستومر، قطر هسته سربی و مشخصات مواد سرب از جمله این موارد هستند. از بین این موارد اثر تعداد لایه‌ها کمتر از دو مورد دیگر بوده و تاثیر قطر هسته سربی در افزایش نیروی برشی و استهلاک انرژی بسیار بیشتر از دو عامل دیگر است. در این پژوهش با ثابت نگه داشتن قطر هسته سربی و ضخامت لایه الاستومر، ارتفاع سیستم جداسازی به عنوان یک متغیر در نظر گرفته شده است.

شکل ۴. مقدار نیروی بیشینه برشی در دو سیستم جداساز الاستومر-سرب و

سیستم الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده

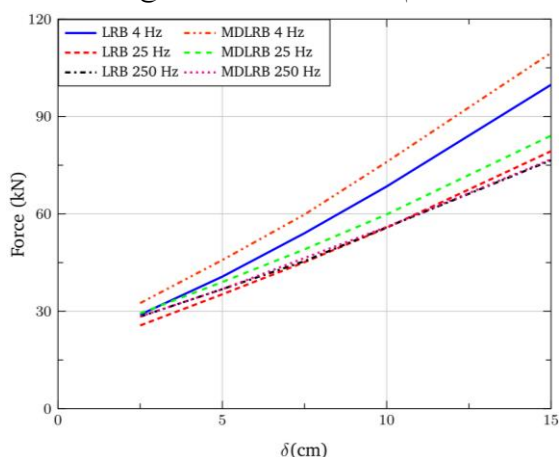


Fig. 5. The value of the maximum shear force in LRB and the modified damping LRB (MDLRB)

به منظور بررسی عملکرد سیستم در هندسه‌های متفاوت، در مجموع چهار سیستم در نظر گرفته شد. سیستم جداساز

در این پژوهش با فرض قطر ۲ میلی‌متر برای سیم آلیاژ تحلیل بر اساس ضریب اصطکاک‌های متفاوت برابر ۰/۲ و ۰/۳۳ انجام شده است که نتایج آن با توجه به جدول (۵) است. با توجه به این نتایج با افزایش سختی قائم، سطح زیر منحنی و ضریب میرایی کاهش و سختی موثر و مدول برشی موثر سیستم افزایش پیدا می‌کند. به همین علت ضریب اصطکاک برابر ۰/۳۳ انتخاب شده است.

جدول ۵. اثر ضریب اصطکاک بر روی عملکرد سیستم با میرایی اصلاح

شده (در جابه‌جایی ۱۰ سانتی‌متر و فرکانس بارگذاری برابر ۰/۵ هرتز)

	LRB	MDLRB $\mu = 0$	MDLRB $\mu = 0.2$	MDLRB $\mu = 0.33$
$W_d$ (kJ)	8.56	7.97	9.01	9.56
$K_{eff}$ (kN/m)	522	625	678	693
$\beta_{eff}$	0.26	0.20	0.22	0.31

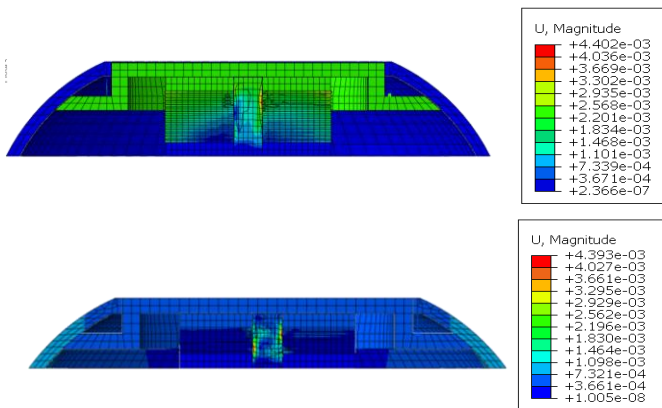
Table 5. The effect of friction coefficient on the performance of MDLRB (at displacement of 10 cm and frequency equal to 0.5 Hz)

### ۳-۳ حساسیت سنجی

به طور معمول برای سیستم‌های جداسازی لرزه‌ای یک بازه عملکرد معرفی می‌شود. این تغییرات ایجاد شده در عملکرد در اثر چندین عامل ایجاد می‌شود که از جمله آن می‌توان به حساسیت رفتاری مواد تشکیل دهنده سیستم جداسازی به شرایط متفاوت و بارگذاری اشاره کرد. به عنوان نمونه سرب و الاستومر نسبت به فرکانس بارگذاری و دما عملکردی متفاوت دارند. همچنین این تغییر در عملکرد می‌تواند در نتیجه چگونگی ساخت و پردازش آن مواد و حتی چگونگی ساخت سیستم جداسازی باشد. به طور معمول میزان این حساسیت سنجیده شده و شرکت‌های سازنده در کاتالوگ خود آن را به عنوان یک محدوده عملکرد برای سیستم جداسازی، معرفی می‌کنند. در این پژوهش عملکرد سیستم جداسازی نسبت به مولفه‌های فرکانس بارگذاری، دامنه بارگذاری، تعداد چرخه‌های بارگذاری و باربردی و ضریب شکل حساسیت سنجی شده است. حساسیت سنجی روی سیستم‌های جداساز الاستومر-سرب و سیستم جداساز الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده، تحت ۵ چرخه بارگذاری در بازه فرکانس‌های نزدیک به فرکانس زلزله، یعنی فرکانس‌های ۴، ۰/۲ و ۰/۰۲ هرتز بررسی شده است. به منظور

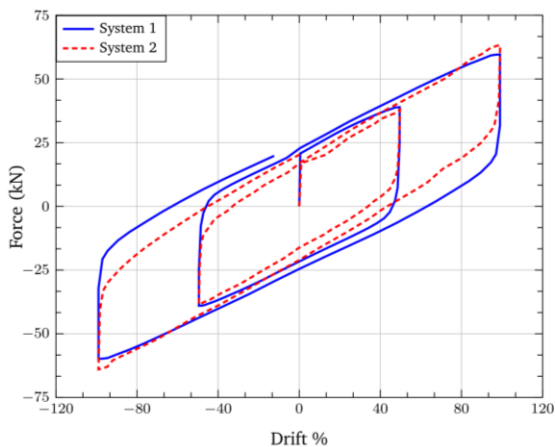
این آلیاژ به این سیستم، اگرچه باعث افزایش همزمان ظرفیت مرکزگرایی و میرایی شده اما در عین حال باعث افزایش نیروی برشی خواهد که این موضوع اصلا مطلوب نیست چرا که نیروی برش پایه سازه افزایش می‌یابد و این به معنی افزایش اثر نیروی زلزله روی سازه و به دنبال آن افزایش خرابی در روسازه است.

**شکل ۷.** تغییرشکل پسماند سیستم جداساز الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده، سیستم اول با ۱۱ لایه الاستومر و سیستم دوم با ۷ لایه الاستومر



**Fig. 8.** Residual deformation of MDLRB, system 1 with 11 layers of elastomers and system 2 with 7 layers of elastomers

**شکل ۸.** نمودار هیستریزس سیستم جداساز الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده، سیستم اول با ۱۱ لایه الاستومر و سیستم دوم با ۷ لایه الاستومر

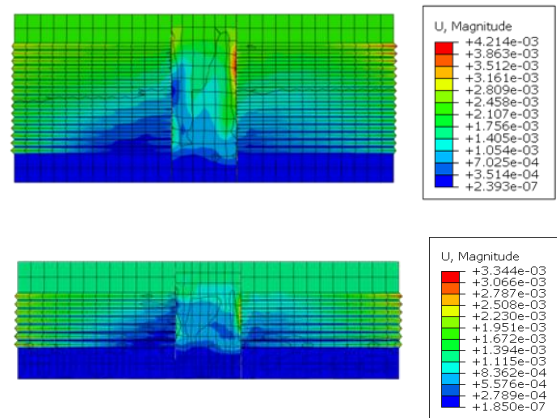


**Fig. 9.** The hysteresis curve of MDLRB, system 1 with 11 layers of elastomers and system 2 with 7 layers of elastomers

به همین دلیل برای افزایش ظرفیت مرکزگرایی و در عین حال کنترل نیروی برش و دستیابی به بهینه‌ترین عملکرد، باید سیم های آلیاژ به شکلی در سیستم قرار گیرند که هم قادر به ایجاد

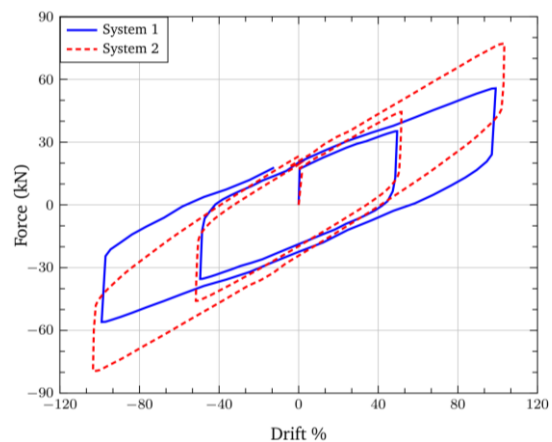
الاستومر- نمایشی از تغییرشکل پسماند در سیستم الاستومر-سرب و سیستم الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده در شکل های (۶ و ۸) و عملکرد آنها در شکل های (۷ و ۹) نمایش داده شده است. همان‌گونه که از نتایج مشخص است، عملکرد سیستم جداساز الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده حساسیت کمتری به تاثیر ابعاد دارد.

**شکل ۵.** تغییرشکل پسماند سیستم جداساز الاستومر-سرب، سیستم اول با ۱۱ لایه الاستومر و سیستم دوم با ۷ لایه الاستومر



**Fig. 6.** Residual deformation of LRB, system 1 with 11 layers of elastomers and system 2 with 7 layers of elastomers

**شکل ۶.** نمودارهای هیستریزس سیستم جداساز الاستومر-سرب، سیستم اول با ۱۱ لایه الاستومر و سیستم دوم با ۷ لایه الاستومر



**Fig. 7.** The hysteresis curve of LRB, system 1 with 11 layers of elastomers and system 2 with 7 layers of elastomers

#### ۴- سیستم جداساز پایه‌ای مرکزگرا پیشنهادی

به منظور ایجاد ظرفیت مرکزگرایی برای سیستم جداساز الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده از سیم‌های آلیاژ حافظه شکلی که قابلیت مرکزگرایی دارند، استفاده شده است. افزودن



نیروی برگرداننده سیستم به حالت اولیه خود، باشند و هم در جابه‌جایی‌های متفاوت به یک میزان نیروی برشی را افزایش دهند.

هندسۀ سیستم جداساز مرکزگرا در شکل (۱۰) و عملکرد سیستم مرکزگرا پیشنهادی نسبت به سیستم الاستومر-سرب در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.

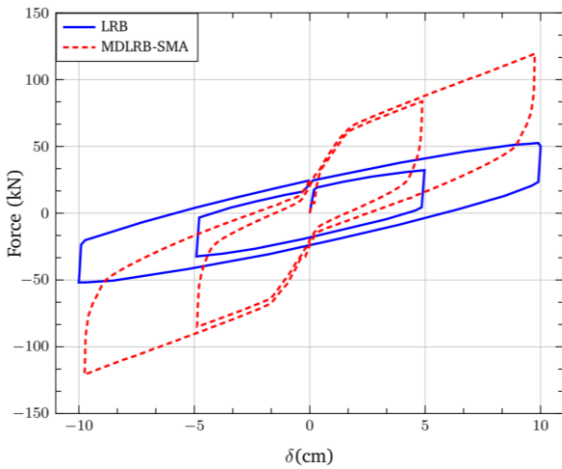


Fig. 11. The hysteresis curves of MDLRB-SMA compared to LRB

شکل ۱۱. نمودارهای هیستریزیس سیستم‌های مجزا سیستم جداساز الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده و سیستم مرکزگرا آلیاژ حافظه‌شکلی در جابه‌جایی‌های ۵ و ۱۰ سانتی‌متر

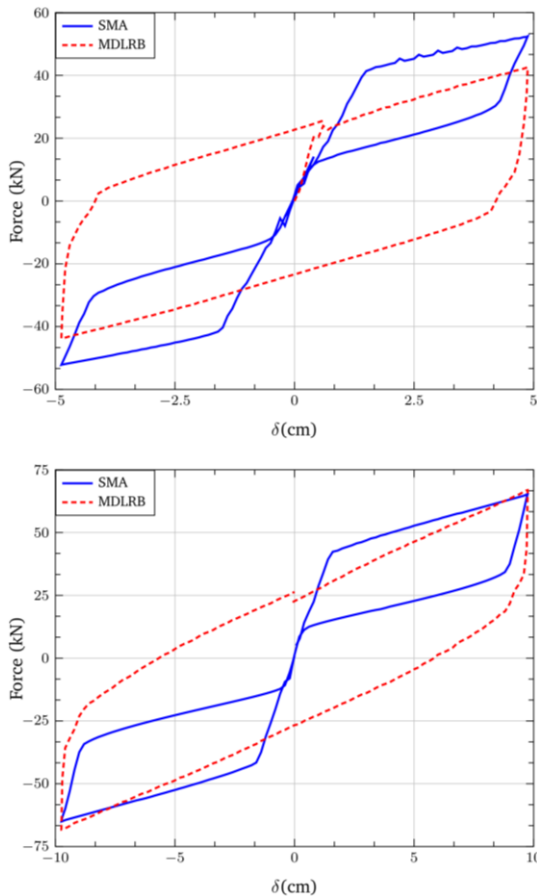


Fig. 12. The hysteresis curves of separate systems of MDLRB and re-centering system in the displacement of 5 and 10 cm

شکل ۹. هندسه سیستم جداساز مرکزگرا پیشنهادی

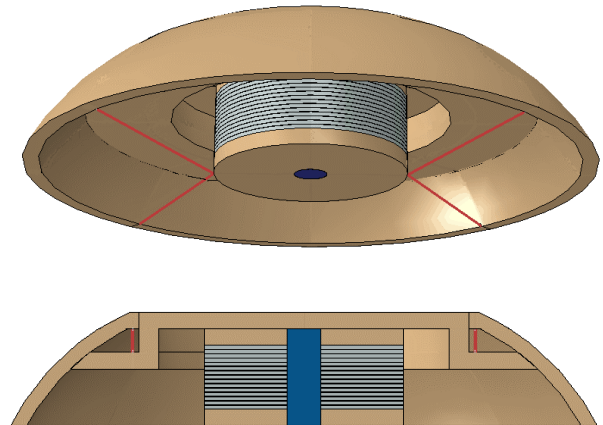


Fig. 10. The geometry of the proposed re-centering isolation system

عملکرد سیستم الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده به موازات عملکرد سیستم اصلاح‌کننده‌ی مرکزگرا است. به این معنی که در جابه‌جایی یکسان مقدار نیروی سیستم جداساز الاستومر-سرب-آلیاژ حافظه‌شکلی از جمع نیروهای ایجاد شده در این دو سیستم (یعنی سیستم‌های الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده و سیستم مرکزگرا) خواهد بود.

در شکل‌های (۱۲ و ۱۳) نتایج حاصل از تحلیل یک سیستم الاستومر-سرب-آلیاژ (تحت عنوان سیستم یکپارچه) در مقایسه با حاصل جمع نتایج سیستم‌های مرکزگرا و الاستومر-سرب (تحت عنوان سیستم غیریکپارچه) نمایش داده شده است. در سیستم جداسازی مرکزگرا پیشنهادی علاوه بر به حداقل رساندن تغییرشکل پسماند در سیستم و افزایش ۵۰ درصدی ظرفیت میرایی، میزان سختی افقی معادل و میزان نیروی برش پایه سیستم ۱/۵ برابر شده است.

شده و در هر مرحله ۰/۵ میلی‌متر به قطر افزوده می‌شود تا بهینه‌ترین قطر و هندسه مشخص شود.

مواد تشکیل دهنده آلیاژ حافظه‌شکلی بر اساس دو عامل انتخاب می‌شود، اول آنکه دمای آستنیت آن کمتر از دمای محیط باشد تا امکان تغییر فاز و تکمیل خاصیت سوپرلاستیک را داشته باشد و دوم آنکه تغییر شکل مورد نظر در محدود کرنش مشخصه آلیاژ باشد. آلیاژهای حافظه‌شکلی بر پایه نیکل معمولاً از مقاومت در برابر خزش خوبی برخوردار هستند و خاصیت فوق‌ارتجاعی خود را تا دمای ۶۲ درجه زیر صفر حفظ می‌کند و تغییر شکل قبل باز یابی قابل توجهی (بالای ۱۳ درصد) دارد. با توجه به آنکه آلیاژهای حافظه‌شکلی با ترکیبات متفاوت در صنعت موجود هستند و بسته به کارایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در این پژوهش از آلیاژ بر پایه آهن با نام اختصاری (FeNiCuAlTaB) استفاده شده است. کرنش مشخصه این آلیاژ با توجه به پژوهش‌های [20, 21] برابر ۱۸ درصد و تنش‌های مشخصه برابر ۷۵۳، ۱۰۸۶، ۵۲۸ و ۱۹۶ مگاپاسکال از جمله مشخصات مکانیکی آلیاژ FeNiCuAlTaB است.

#### ۱-۱-۴- حساسیت سنجی عملکرد سیستم اصلاح کننده مرکزگرایی

مانند روشی که در بخش ۳-۳ در نظر گرفته شد، در این سیستم نیز عملکرد سیستم اصلاح کننده مرکزگرایی نسبت به مولفه‌های فرکانس بارگذاری، دامنه بارگذاری، تعداد چرخه‌های بارگذاری و باربردی حساسیت سنجی شده است. حساسیت سنجی تحت ۵ چرخه بارگذاری با اعمال بار به شکل سینوسی و در فرکانس‌های ۴، ۰/۲ و ۰/۰۲ هرتز بررسی شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۴) حساسیت سیستم اصلاح کننده مرکزگرایی به تعداد چرخه بارگذاری مشهود است اما معمولاً بعد از ۳ چرخه بارگذاری عملکرد سیستم به ثبات می‌رسد. همچنین با توجه به این نتایج مشخص می‌شود که عملکرد سیستم اصلاح کننده مرکزگرایی نسبت به مولفه فرکانس حساس است. هر چه فرکانس بارگذاری بیشتر باشد حساسیت رفتاری بیشتر خواهد بود.

شکل ۱۲. نمودارهای هیستریزیس سیستم جداساز الاستومر-سرب-آلیاژ یکپارچه در مقایسه با مجموع سیستم‌ها در جابه‌جایی‌های ۵ و ۱۰ سانتی‌متر

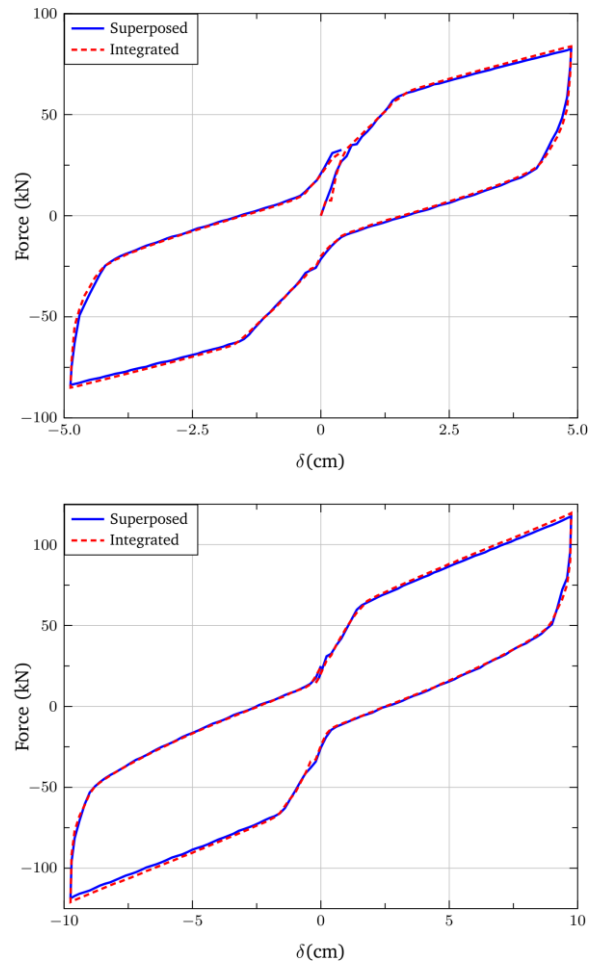


Fig. 13. The hysteresis curves of the integrated proposed isolation system compared to the superposed systems in the displacement of 5 and 10 cm

#### ۱-۱-۴- سیستم اصلاح کننده مرکزگرایی

به حداقل رساندن تغییر شکل پسماند، کنترل نیروی برشی، کنترل سختی اولیه و ثانویه هدف‌های طراحی برای سیستم پیشنهادی مرکزگرا هستند. برای طراحی این سیستم، لازم است که تحلیل چند هدفه انجام شود. برای نمونه طول سیم‌های آلیاژ باید بر اساس ظرفیت کرنش نهایی سیم‌های آلیاژ و کرنش مشخصه آن مشخص شود. ترکیبات آلیاژ بر اساس عملکرد رفتار حافظه‌شکلی آن در فاز مارتنزیت انتخاب شده و هندسه این سیستم بر اساس کنترل سختی و در نهایت قطر این سیم‌ها بر اساس نیروی بازگرداننده سیستم جداسازی در نظر گرفته شود. به منظور تعیین قطر سیم آلیاژ در ابتدا یک قطر اولیه در نظر گرفته

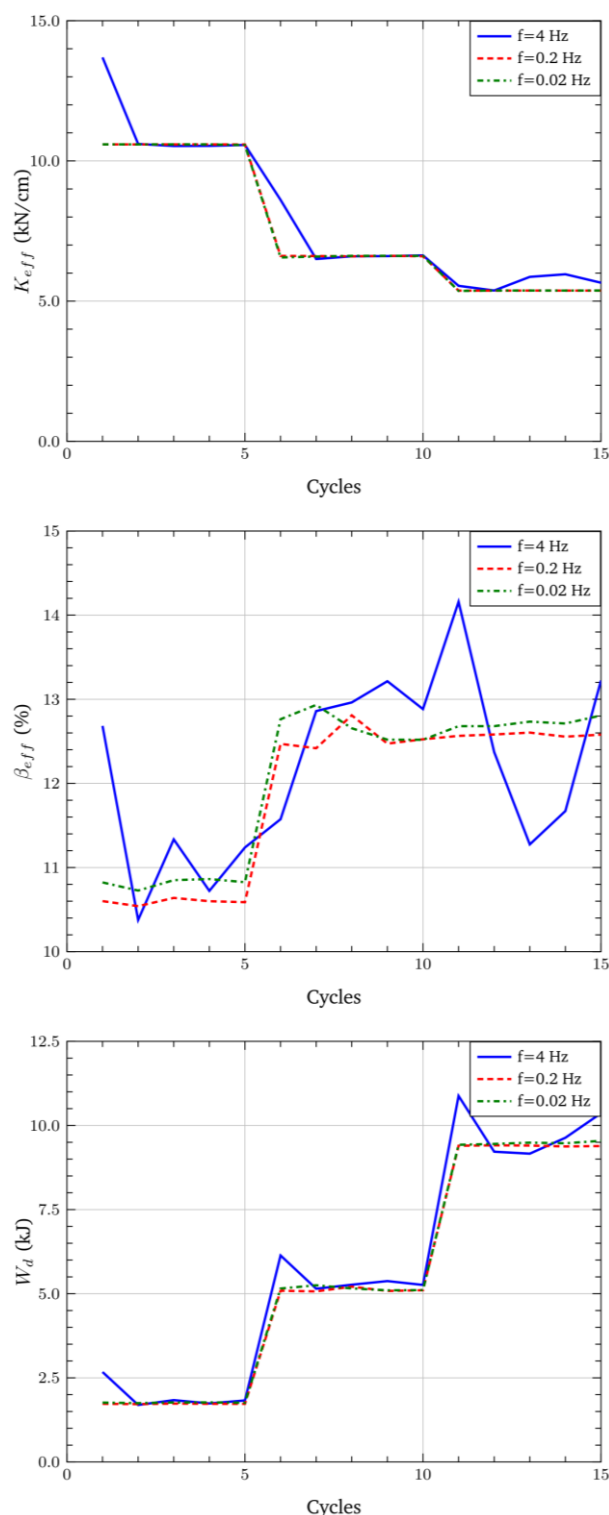
## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روی بهبود عملکرد و مرکزگرایی سیستم جداساز الاستومر-سرب پرداخته شده است. سیستم جداسازی در نظر گرفته شده بر اساس مدل آزمایشگاهی با روباره‌ای برابر ۶۵۰ کیلونیوتن است. سیستم جداساز ترکیبی مرکزگرای پیشنهادی از دو سیستم جداساز الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده و سیستم اصلاح کننده مرکزگرایی تشکیل شده است. سیستم جداساز الاستومر-سرب با میرایی اصلاح شده متشکل از سیستم جداساز الاستومر-سرب و یک پوسته گنبدی است و سیستم اصلاح کننده مرکزگرایی از سیم‌های آلیاژ حافظه شکیلی تشکیل شده است. از اصطکاک این پوسته گنبدی با سطح زیرین سیستم ظرفیت میرایی سیستم افزایش می‌یابد. با توجه به آنکه هندسه این سیستم ترکیبی به شکلی در نظر گرفته شده که مقدار نیروی قائم مورد نیاز در صفحه اصطکاک قابل تنظیم است، ظرفیت میرایی سیستم تا ۸۰ درصد نسبت به سیستم الاستومر-سرب می‌تواند افزایش داشته باشد. سیستم جداساز مرکزگرا پیشنهادی مقدار تغییرشکل پسماند را به حداقل مقدار رسانده است. با توجه به آنکه سیم‌های آلیاژ در سیستم اصلاح کننده مرکزگرایی، در راستاهای متفاوت قرار می‌گیرند، عملکرد این سیستم نسبت به راستای اعمال زلزله حساس نیست. به طور کلی عملکرد سیستم جداسازی لرزه‌ای ترکیبی مرکزگرا نسبت به سیستم جداسازی لرزه‌ای الاستومر-سرب در مقدار ظرفیت استهلاک انرژی به مقدار ۵۰ درصد و در مقدار بیشینه نیروی برشی آن تا ۱۵۰ درصد افزایش و در مقدار تغییرشکل پسماند تا ۴۵ درصد کاهش داشته است.

افزودن سیستم‌های اصلاح کننده به سیستم جداسازی باعث افزایش سختی افقی و به دنبال آن شتاب و برش پایه برای سیستم خواهد شد، پس راهبرد این پژوهش به حداقل رساندن تغییرشکل و کنترل برش پایه است. بنابراین هندسه سیستم‌های اصلاح کننده و مشخصات هندسی آن‌ها با توجه به این ۴ مولفه، معرفی شده است.

سیستم اصلاح کننده میرایی بر اساس ضریب اصطکاک ۰/۳۳ با روباره‌های متفاوت از کل نیروی قائم سیستم جداساز

شکل ۱۴. سختی موثر، میرایی موثر و انرژی مستهلک شده سیستم مرکزگرا در هر چرخه در بارگذاری با فرکانسهای مختلف



**Fig. 14.** The effective stiffness and damping ratio, and the dissipated energy for each cycle of the re-centering system subjected to load of different frequencies

- [9] Dang XZ, Yang HL, Yuan WC, Song DQ. Experimental investigation on composite seismic isolation system. In *Advanced Materials Research* 2013 (Vol. 743, pp. 146-149). Trans Tech Publications Ltd.
- [10] Dezfuli FH, Alam MS. Shape memory alloy wire-based smart natural rubber bearing. *Smart Materials and Structures*. 2013 Mar 11;22(4):045013.
- [11] Dezfuli FH, Alam MS. Performance-based assessment and design of FRP-based high damping rubber bearing incorporated with shape memory alloy wires. *Engineering Structures*. 2014 Mar 1;61:166-83.
- [12] Dezfuli FH, Alam MS. Hysteresis model of shape memory alloy wire-based laminated rubber bearing under compression and unidirectional shear loadings. *Smart Materials and Structures*. 2015 May 11;24(6):065022.
- [13] Dezfuli FH, Li S, Alam MS, Wang JQ. Effect of constitutive models on the seismic response of an SMA-LRB isolated highway bridge. *Engineering Structures*. 2017 Oct 1;148:113-25.
- [14] Dezfuli FH, Alam MS. Seismic vulnerability assessment of a steel-girder highway bridge equipped with different SMA wire-based smart elastomeric isolators. *Smart Materials and Structures*. 2016 Jun 24;25(7):075039.
- [15] Hosseini R, Rashidi M, Hedayati Dezfuli F, Karbasi Arani K, Samali B. Seismic assessment of a benchmark highway bridge equipped with optimized shape memory alloy wire-based isolators. *Applied Sciences*. 2019 Dec 23;10(1):141.
- [16] Habieb AB, Valente M, Milani G. Effectiveness of different base isolation systems for seismic protection: Numerical insights into an existing masonry bell tower. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019 Oct 1;125:105752.
- [17] Cancellara D, De Angelis F. A base isolation system for structures subject to extreme seismic events characterized by anomalous values of intensity and frequency content. *Composite Structures*. 2016 Dec 1;157:285-302.
- [18] Latour M, Piluso V, Rizzano G. Experimental analysis on friction materials for supplemental damping devices. *Construction and Building Materials*. 2014 Aug 29;65:159-76.
- [19] Ahmadipour M, Alam MS. Sensitivity analysis on mechanical characteristics of lead-core steel-reinforced elastomeric bearings under cyclic loading. *Engineering Structures*. 2017 Jun 1;140:39-50.
- [20] Tanaka Y, Himuro Y, Kainuma R, Sutou Y, Omori T, Ishida K. Ferrous polycrystalline shape-memory alloy showing huge superelasticity. *Science*. 2010 Mar 19;327(5972):1488-90.
- [21] Qiu CX, Zhu S. Characterization of cyclic properties of superelastic monocrystalline Cu-Al-Be SMA wires for seismic applications. *Construction and building materials*. 2014 Dec 15;72:219-30.
- الاستومر سرب در نظر گرفته شده است. البته لازم به ذکر است که این سیستم برخلاف سیستم جداساز الاستومر-سرب نسبت به فرکانس بارگذاری حساسیت از خود نشان نداده و همچنین نسبت به مولفه ضریب ابعادی نیز حساسیت کمتری دارد.
- با توجه به نتایج سیستم اصلاح کننده مرکزگرا عملکرد این سیستم نسبت به شدت بارگذاری، حداقل در محدوده شدت زمین لرزه‌های متداول، حساس نیست اما نسبت به تعداد چرخه بارگذاری حساس است و معمولاً در سومین چرخه بارگذاری به همگرایی می‌رسد. با افزایش جابه‌جایی و یا دامنه بارگذاری میزان انرژی جذب شده در سیستم افزایش پیدا می‌کند اما سختی موثر کاهش و ضریب میرایی در کرنش‌های برشی بیشتر از ۱۰۰ درصد، همگرا به یک مقدار می‌شود.

## ۶- مراجع

- [1] Kapasakalis KA, Antoniadis IA, Sapountzakis EJ. Performance assessment of the KDamper as a seismic absorption base. *Structural Control and Health Monitoring*. 2020 Apr;27(4):e2482.
- [2] Pachideh G, Kafi M, Gholhaki M. Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater. In *Structures* 2020 Dec 1 (Vol. 28, pp. 467-481). Elsevier.
- [3] Pachideh G, Gholhaki M, Kafi M. Experimental and numerical evaluation of an innovative diamond-scheme bracing system equipped with a yielding damper. *Steel and Composite Structures*. 2020;36(2):197-211.
- [4] Zheng WZ, Wang H, Li J, Shen HJ. Parametric study of SMA-based friction pendulum system for response control of bridges under near-fault ground motions. *Journal of Earthquake Engineering*. 2021 Jul 3;25(8):1494-512.
- [5] Chakraborty S, Roy K, Ray-Chaudhuri S. Design of re-centering spring for flat sliding base isolation system: Theory and a numerical study. *Engineering Structures*. 2016 Nov 1;126:66-77.
- [6] Liu Y, Wang H, Qiu C, Zhao X. Seismic behavior of superelastic shape memory alloy spring in base isolation system of multi-story steel frame. *Materials*. 2019 Mar 26;12(6):997.
- [7] Qiu C, Tian L. Feasibility analysis of SMA-based damping devices for use in seismic isolation of low-rise frame buildings. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2018 Jun 17;18(06):1850087.
- [8] Wilde K, Gardoni P, Fujino Y. Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges. *Engineering structures*. 2000 Mar 1;22(3):222-9.

# Introduction and performance investigation of a hybrid base isolation system with re-centering capability

Shabnam Parvizi <sup>1\*</sup>, Hamed Khezzadeh <sup>2</sup>

1,2 Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* khezzadeh@modares.ac.ir

## Abstract

Regarding the high cost of retrofitting and replacing the isolation system after an earthquake, re-centering seismic isolation systems have become one of the most popular research fields in the past decades. A new generation of seismic isolation is based on equipment with improved performance in terms of damping and re-centering capability. Since lead-rubber base isolation (LRB) is one of the most common seismic isolation systems, this paper focused on suggesting a re-centering LRB system with high damping capacity. The LRB isolation is based on an experimental study under a constant vertical load equal to 650 kN. The proposed combined system of LRB and friction yields a high damping capacity. A spherical shell is placed on the base isolation system, and the friction reaction emanates from this shell's sliding on the provided foundation. The primary purpose of this spherical shell is to increase the damping capacity of the isolation system. An adjustable friction reaction is reachable depending on the connection details of the spherical steel shell with the system's upper steel cap plate. The higher stiffness of this connection is provided greater friction force and, as a result, higher damping capacity. In short, this connection was performed as adjustable friction and can increase energy dissipation and maximum shear force, respectively, in the range of 12% to 80% and 6% to 230%. Increasing re-centering capacity is another goal of this study. It is of great interest to implement shape memory alloy (SMA) in the form of wires because of their re-centering capabilities. The axisymmetric design is implemented to reduce this hybrid system's vulnerability to earthquakes of arbitrary direction. The combined action of wires and the spherical steel shell provides the re-centering capacity of the system.

The final system, which is a combination of LRB, friction mechanism, and vertical load transfer through SMA wires (MDLRB-SMA), exhibits enhanced properties such as reduced residual deformation, controllable shear reaction at each stage of the deformation, and increased damping capacity. The energy dissipation capacity of the MDLRB-SMA is shown to be increased by 50%, with a decreased residual deformation of up to 45% compared to the LRB. A set of parametric studies are also performed to investigate the influence of frequency, displacement amplitude, loading rate, the wires' configuration and properties, and the aspect ratio of the system's performance.

**Keywords:** Re-centering Capability, LRB, Shape Memory Alloys, Damping Capacity, Finite Element Method, Adjustable Friction Reactio