نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۲ شماره ۳، سال ۱۳۹۹، صفحات ۵۸۱ تا ۶۰۰
DOI: 10.22060/ceej.2018.14747.5731

بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد جداساز لرزه‌ای هسته سربی مجهز به آلیاژ حافظه‌دار

راحله محمودی، حسین تاجمیر ریاحی *، محمدرضا زارع

دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

خلاصه: در این پژوهش به بررسی تحلیلی و عددی سیستم جداساز ترکیبی هسته سربی با آلیاژ حافظه دار و بررسی پارامترهای مختلف مؤثر بر آن پرداخته شده است. پارامترهای مورد بررسی عبارتند از ابعاد جداساز، نوع آلیاژ حافظه‌دار و سطح مقطع سیم‌های آن، قطر هسته سربی، ضخامت لایه لاستیک و تنش فشاری. در این جداساز از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به عنوان واحد بازگرداننده و از هسته سربی به عنوان واحد اتلاف‌کننده انرژی استفاده شده است. بدین منظور یک مدل اجزای محدود از جداساز با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مدل سازی شده و تأثیر پارامترهای مختلف ذکر شده بر عملکرد جداساز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد لرزه‌ای این جداساز، نسبت به سایر جداسازها بهتر بوده و در نهایت با توجه به اینکه چه نوع عملکردی از جداساز مدنظر است، می‌توان پارامترهای مورد مطالعه را به صورت بهینه به دست آورد. به عنوان مثال اگر اتلاف انرژی بیشتر مد نظر باشد به ۴ طریق می‌توان عمل کرد: افزایش ابعاد جداساز، افزایش شعاع سیم‌های SMA، افزایش قطر هسته سربی و یا افزایش ارتفاع جداساز. از بین موارد ذکر شده، افزایش شعاع سیم SMA و افزایش قطر هسته بیشترین اثرگذاری را دارا هستند. به طور مثال، در کرنش برشی ۱۵۰٪ اتلاف انرژی در شعاع ۲/۵ mm و ۴ mm به ترتیب از J ۵۰۸۰/۲ به J ۸۳۷۶ افزایش پیدا می کند.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۰۲-۰۵-۱۳۹۷
بازنگری: ۰۴-۰۸-۱۳۹۷
پذیرش: ۰۶-۰۸-۱۳۹۷
ارائه آنلاین: ۲۴-۰۹-۱۳۹۷

کلمات کلیدی:
جداساز پایه
تکیه‌گاه لاستیکی هسته سربی
آلیاژهای حافظه‌دار شکلی
عملکرد لرزه‌ای
سیستم کنترل غیرفعال

۱- مقدمه

روش‌های طراحی و فن‌آوری‌های اجرای ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله در سال‌های اخیر پیشرفت چشم گیری داشته است. در این میان سیستم‌های کنترلی و مستهلک کننده‌ی انرژی مانند جداساز لرزه‌ای در ساختمان‌ها و پل‌ها، عملکرد مناسبی را در برابر خطرات لرزه‌ای از خود نشان داده و از این رو مورد توجه محققان و مهندسان واقع شده اند. جداسازی پایه، یکی از برترین روش ها در مهندسی زلزله است که مربوط به فناوری‌های کنترل لرزه‌ای غیرفعال است. جداساز لرزه‌ای یکی از راه‌های کاهش اثر زلزله بر سازه‌هاست که از طریق غیر درگیر کردن حرکت افقی سازه از زمین انجام می‌شود. این جداسازی از طریق اضافه کردن دو عامل انعطاف‌پذیری افقی و میرایی در پایه‌ی سازه صورت می‌گیرد.

برای مقاوم‌سازی سازه، چگونگی به حداقل رساندن تغییر مکان بین طبقه‌ای و شتاب طبقات مهم است. تغییر مکان بین طبقه‌ای سبب خسارت دیدن اجزای غیر سازه‌ای و تجهیزات متصل‌کننده‌ی طبقات می‌شود. با افزایش سختی سازه می‌توان تغییر مکان بین طبقه‌ای را کاهش داد، اما این عمل سبب تشدید حرکت زمین می‌شود که به نوبه‌ی خود سبب افزایش شتاب طبقات شده و منجر به خسارت دیدن تجهیزات حساس داخلی می‌شود. شتاب طبقات را می‌توان با نرم‌تر کردن سیستم کاهش داد که این عمل موجب افزایش تغییر مکان می‌شود. تنها راه عملی کاهش هم زمان تغییر مکان طبقه‌ای و شتاب طبقات استفاده از جداساز لرزه‌ای است که با متمرکز کردن تغییر مکان‌های حاصله در تراز جداساز، شکل پذیری مورد نیاز سازه

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: tajmir@eng.ui.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.

را فراهم می‌کند [۱]. در کشور ما نیز با توجه به روند رو به رشد ساخت و ساز از یک سو و لرزه خیزی زیاد و احتمال وقوع خسارات فراوان از سوی دیگر، لزوم به کارگیری این فناوری احساس می شود.

رابینسون[1] و همکاران در سال ۱۹۸۱ جداساز لاستیکی هسته سربی (LRB[2]) را معرفی کردند. این جداساز از لایه‌های لاستیک و فولاد و همچنین هسته سربی تشکیل شده است [۴-۲]. جداساز لاستیکی هسته سربی به عنوان یکی از متداول ترین انواع جداساز، انعطاف پذیری را به وسیله‌ی لاستیک‌هایش و میرایی را به وسیله‌ی هسته‌ی سربی افزایش می‌دهد. اما مشکلاتی از جمله طول عمر، پیچیدگی نصب، تعمیر و نگهداری و ایجاد تغییر شکل دایمی بعد از وقوع زلزله دارد که موجب می‌شود بعد از مدتی جداساز نیاز به تعویض پیدا کند.

آلیاژهای حافظه‌دار (SMA[3]) موادی هستند که امروزه مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند و دارای خصوصیاتی از جمله ظرفیت میرایی بالا، مقاومت بالا در برابر خستگی و تحت کرنش‌های چرخه‌ای بزرگ، دوام بالا، مقاومت در برابر خوردگی و بازگردانندگی هستند. استفاده از این آلیاژ در جداساز به دلیل خاصیت بازگردانندگی آن، باعث می‌شود که جداساز بعد از اتمام زلزله به شکل اولیه‌ی خود بازگردد و طول عمر بیشتری داشته باشد و حتی بعد از زلزله‌های قوی نیاز به تعویض نداشته باشد. علاوه بر این، این مواد باعث افزایش میرایی و اتلاف انرژی می‌شوند [۵]. در بین آلیاژهای حافظه دار شکلی، نیتینول که ترکیبی از نیکل و تیتانیوم است و آلیاژهای بر پایه‌ی آهن و مس، بیشترین کاربرد را دارا هستند. این آلیاژها به علت ویژگی فوق الاستیک، قادر به تحمل کرنش های بزرگ، بدون ایجاد کرنش پسماند هستند [۶].

محققین بسیاری کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار را در سیستم‌های جداساز پایه، مورد بررسی قرار داده‌اند. دولچه[4] و همکاران [۷] عملکرد یک دستگاه جداساز پایه مجهز به آلیاژ حافظه دار را برای حفاظت لرزه‌ای از سازه های بتن آرمه با انجام آزمایش میز لرزان بررسی کردند. سپس عملکرد سیستم‌های جداساز مجهز به آلیاژ حافظه دار را با جداساز لاستیکی، مقایسه کردند که نتایج حاصل نشان داد این جداسازها نسبت به جداساز لاستیکی، ارتعاشات سازه ناشی از زلزله را به مقدار بیشتری، کاهش می‌دهند و محافظت بیشتری از سازه و ملحقات آن می‌کنند. همچنین آن ها جابه‌جایی پایه و برش پایه را بیشتر کاهش می‌دهند و عملکرد بسیار بهتری از خود نشان می‌دهند. چوی[5] و همکاران [۸] برای حفاظت لرزه‌ای از پل، یک سیستم جداساز ترکیبی لاستیکی و SMA ارائه دادند. آن ها در این پژوهش بر روی یک پل فولادی چند دهانه مطالعات تحلیلی انجام دادند و نشان دادند که جداساز لاستیکی مجهز به آلیاژ حافظه دار در مقایسه با جداساز هسته سربی، به طور مؤثر جابه‌جایی نسبی بین عرشه و پایه را کاهش می‌دهد. کاسکیاتی[6] و همکاران [۹] یک دستگاه جداساز شامل یک سیستم کشویی به همراه میله‌های SMA از جنس مس، آلومینیوم و بریلیوم (برای اتلاف انرژی و اهداف بازگردانندگی) مطرح کردند که باعث اتلاف انرژی بیشتر و بازیابی تغییرشکل ایجادشده ی جداساز شد. این میله ها وظیفه فراهم کردن سختی در برابر تحریکات با شدت کم، جلوگیری از جابه جایی‌های بسیار بزرگ، خاصیت بازگردانندگی و اتلاف انرژی را بر عهده دارند. ازبالت[7] و هرلی‌باس[8] [۱۲-۱۰] عملکرد یک سیستم جداساز سوپر الاستیک- اصطکاکی را که ترکیبی از یک جداساز کشویی و یک دستگاه سوپر الاستیک SMA است، مورد مطالعه قرار دادند. سپس اثرات تغییر حرارت را بر روی این سیستم مورد بررسی قرار دادند و این سیستم را با یک جداساز لاستیکی مجهز به آلیاژ حافظه دار مقایسه کردند. سیستم پیشنهادی آن ها مقدار جذب انرژی ورودی کمتری دارد و اتلاف انرژی در آن از طریق اصطکاک است، اما در جداساز لاستیکی مجهز به آلیاژ حافظه دار، اتلاف انرژی از طریق SMA است. پاسخ حداکثر جابه جایی نسبی در هر دو تقریباً برابر است، اما شتاب حداکثر عرشه و برش پایه حداکثر در جداساز پیشنهادی کمتر است.

دزفولی و آلام[9] [۱۳] دو نوع جداساز لاستیکی با لایه‌های فولادی را به‌همراه دو آرایش متفاوت سیم‌های SMA، صاف و متقاطع (ضربدری) مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها از سیم SMA به عنوان المان مکملی که عملکرد جداساز لاستیکی با لایه‌های فولاد را در اتلاف انرژی و جابه جایی‌های باقی مانده در کرنش‌های بزرگ بهبود

1 Rabinson et al.
2 Lead Rubber Bearing
3 Shape Memory Alloy
4 Dolce
5 Choi
6 Casciati
7 Ozbulut
8 Hurlebaus
9 Alam

می‌دهد، استفاده کردند. آن‌ها اثر پارامترهای دامنه کرنش برشی، نوع SMA، نسبت ابعاد جداساز، قطر سیم‌ها و سطح پیش‌کرنش برشی سیم‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که وقتی جداساز لاستیکی مجهز به آلیاژ حافظه دار تحت دامنه کرنش‌های برشی بزرگ قرار می‌گیرد، سیم SMA از نوع FeNiCuAlTaB با کرنش سوپرالاستیک ۱۳/۵ درصد و دمای آستنیت بسیار پایین ۶۲- درجه سانتی‌گراد بهترین انتخاب است. نتایج نشان می‌دهد که شکل متقاطع سیم‌ها مؤثرتر است و با پیش‌کرنش برشی ۲ درصد، اتلاف انرژی تا ۷۴ درصد افزایش و تغییرشکل باقی‌مانده تا ۱۵ درصد کاهش خواهد یافت. دزفولی و آلام [۱۴] یک مدل ساختاری از جداساز الاستومری LRB-SMA را با توجه به آرایش سیم‌ها به صورت تئوری ارائه دادند. نتایج نشان می‌دهد که خاصیت بازگردانندگی SMA، تغییرشکل باقی‌مانده در LRB را کاهش می‌دهد.

در این مقاله سعی بر آن است که ابتدا بررسی تحلیلی سیستم جداساز هسته سربی همراه با آلیاژ حافظه‌دار به کمک نرم‌افزار آباکوس[1] انجام شود و سپس تأثیر پارامترهایی از جمله اضافه شدن SMA به جداساز LRB، ابعاد جداساز، قطر سیم‌های SMA، قطر هسته سربی، نوع سیم‌های SMA، ارتفاع جداساز، ضخامت لاستیک و تنش فشاری بر رفتار سیستم جداساز ترکیبی LRB-SMA بررسی گردد. در نهایت پارامتر هایی مانند سختی افقی، جابه جایی باقی مانده، اتلاف انرژی، میرایی ویسکوز حاصل از تمامی تحلیل ها محاسبه شده و عملکرد جداساز ترکیبی مذکور و LRB مورد مقایسه قرار گرفته است. در پژوهش های مشابه نظیر پژوهش دزفولی و آلام [۱۴] تنها برخی از پارامترهای ذکرشده مد نظر قرار گرفته است و آرایش سیم ارائه شده در این پژوهش متفاوت از آرایش قرارگیری سیم در پژوهش های مشابه است.

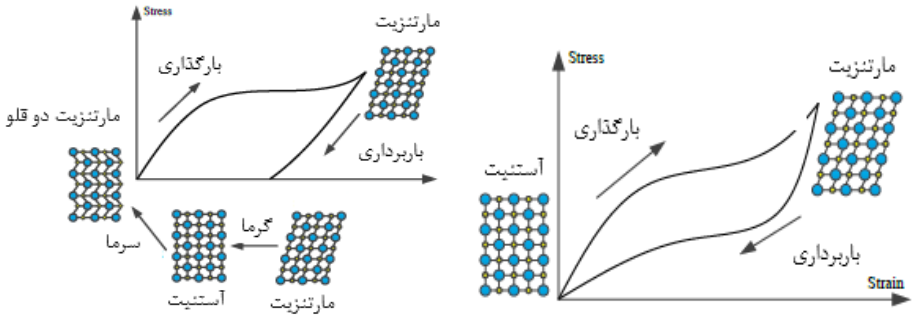
۲- آلیاژ حافظه دار شکلی

آلیاژهای حافظه‌دار دارای دو فاز ثابت آستنیت[2] و مارتنزیت[3] هستند. فاز آستنیت حالت اصلی با تقارن بالا بوده و در دماهای بالا و تنش های پایین پایدار است و فاز مارتنزیت حالت محصول با تقارن کمتر و در دماهای پایین و تنش های بالا پایدار است. این دو فاز می توانند با اعمال بارگذاری های حرارتی و یا مکانیکی به یکدیگر تبدیل شوند. نکته مهم این است که آلیاژهای حافظه دار شکلی در فاز آستنیت قابلیت بازگشت کامل به شکل اول خود را دارند (فوق الاستیک)، در حالی که در فاز مارتنزیت این قابلیت تا حدود زیادی کاهش می‌یابد (حافظه دار شکلی) [۶]. با حرکت از سمت فاز آستنیت به سمت فاز مارتنزیت، ظرفیت اتلاف انرژی افزایش خواهد یافت، ولی با افزایش درصد مارتنریت از یک حد مشخص، قابلیت بازگردانندگی از بین خواهد رفت.

اعمال تنش به یک ماده حافظه دار شکلی که در حالت اولیه آستنیت قرار دارد و دمای آن بالاتر از دمایی پایانی آستنیت است، موجب می شود که آستنیت به مارتنزیت تبدیل شود، چرا که آستنیت در تنش های بالا پایدار نیست. این تبدیل منحنی تنش – کرنش، ماده را به صورت غیر خطی در می آورد. در انتها تمام آستنیت ها به مارتنزیت تبدیل خواهد شد و تبدیل پایان خواهد پذیرفت. لذا ماده دچار سخت شدگی می‌شود. در هنگام باربرداری، مارتنزیت ناپایدار می‌شود و تبدیل معکوس رخ می‌دهد. تبدیل معکوس از روی یک مسیر متفاوت، ماده را به مکان اولیه می رساند، چرا که هیچ کرنش پسماندی بر روی ماده باقی نمی ماند. این آلیاژها، قادر به بازگشت به شکل اولیه خود در تغییرشکل‌های بزرگ هستند. آلیاژهای حافظه‌دار دارای دو فاز ثابت آستنیت و مارتنزیت هستند. فاز آستنیت ساختمانش مکعبی بوده و به علت دارا بودن تقارن بالا محکم تر است. فاز مارتنزیت می‌تواند به حالت دوقلویی و غیر دوقلویی وجود داشته باشد. شکل آن منوکلینیک بوده و نسبت به آستنیت تقارن کمتری دارد. فاز مارتنزیت از نوع فاز ترموالاستیک بوده که دو خصوصیت لغزنده بودن و انرژی کم را دارا است که با تغییر کوچک دما و تنش، تغییر می‌کند. به محض سرد کردن آلیاژ در نبود بارگذاری، تغییر فاز از آستنیت به مارتنزیت صورت می‌پذیرد که نتیجه این تغییر فاز، قابل مشاهده ماکروسکوپیک نیست. به محض گرم کردن ماده در فاز مارتنزیت، برگشت فاز اتفاق می‌افتد. این تغییر فاز در شکل ۱ رفتار فوق الاستیک و حافظه دار شکلی نشان داده شده است.

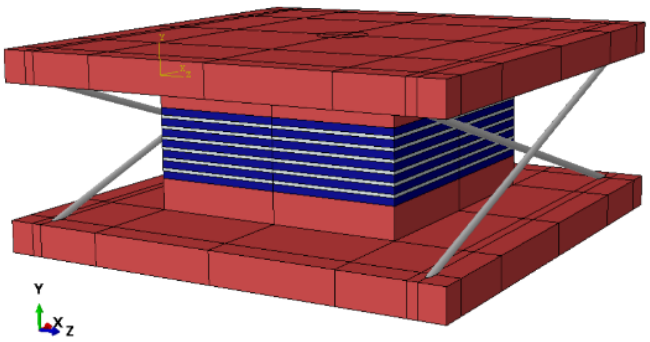
در این پژوهش جداساز هسته سربی به همراه آلیاژ حافظه دار مورد مطالعه قرار گرفته است که آلیاژهای حافظه دار به صورت سیم های ضربدری در دو سمت مقابل هم، مطابق شکل ۲ قرار گرفته اند. در

1 Abaqus
2 Austenite
3 Martensite



ب الف

شکل ۱. الف) رفتار سوپرالاستیک ب) رفتار حافظه‌دار شکلی [۱۷]
Fig. 1. a) Superelastic behavior b) Shape memory-behavior



شکل ۲. جداساز ترکیبی مدل شده در پژوهش حاضر
Fig. 2. Hybrid base isolation in this study

بخش بعد نحوه مدل سازی این جداساز آورده شده است.

۳- صحت سنجی

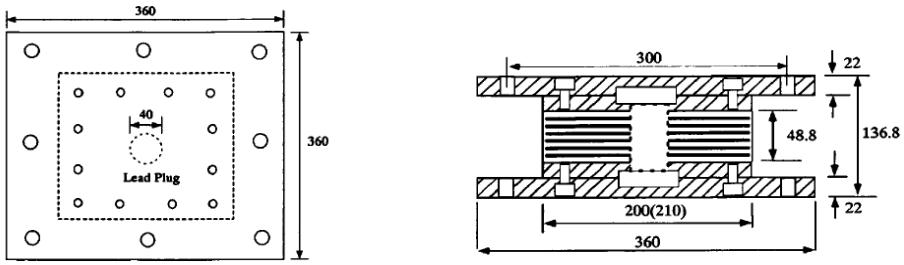
به منظور انجام تحلیل های عددی بر روی جداساز لرزه‌ای هسته سربی مجهز به آلیاژ حافظه‌دار، لازم است ابتدا از صحت مدل عددی اطمینان یافت. بدین منظور با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، مدل های عددی صحت سنجی می شوند. اما تاکنون جداساز این مطالعه به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا با توجه به عملکرد ترکیبی این جداساز، صحت سنجی برای جداساز لاستیکی با هسته سربی و میله آلیاژ حافظه دار به صورت جداگانه انجام شده است.

۳-۱- جداساز LRB

آبه[1] و همکاران [۱۵] مطالعاتی پیرامون نمونه‌ی آزمایشگاهی جداساز LRB انجام داده اند. شکل ۳ نمایی از جداساز و جدول ۱ ابعاد اجزای تشکیل‌دهنده را نشان می‌دهد.

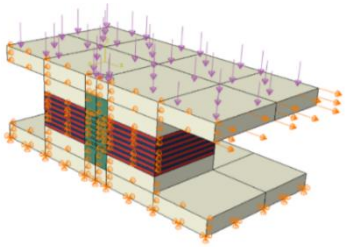
شکل ۳-ب جداساز مدل شده در نرم افزار آباکوس را نشان می‌دهد. لاستیک‌های به کار رفته در این جداساز دارای میرایی کم ۲ تا ۳ درصد بوده که از مدل Neo hook [۱۶] جهت مدل‌سازی در نرم افزار استفاده شده است. لاستیک‌ها به صورت المان هایبرید C3D8RH مدل شده اند. سرب به کار رفته در جداساز دارای مدول یانگ ۱۶ مگاپاسکال و تنش تسلیم ۱۰ مگاپاسکال بوده که به صورت یک مدل دو خطی با رفتار پلاستیک کینماتیک در نظر گرفته شده است. صفحات فولادی به صورت یک ماده ایزوتروپیک با مدول یانگ ۲۱۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ فرض شده است. المان حجمی C3D8R برای صفحات فولادی لحاظ شده است. در ادامه با فرض اعمال فشار قائم ۷ مگاپاسکال بر جداساز، رفتار نیرو-جابه جایی جداساز برای کرنش های برشی ۵۰ و ۱۵۰ درصد لاستیک به دست آمده است. مقایسه رفتار نیرو-جابه جایی مدل عددی با نمونه آزمایشگاهی در شکل ۴ بیانگر صحت نتایج عددی است.

1 Abe



پلان مقطع

الف



ب

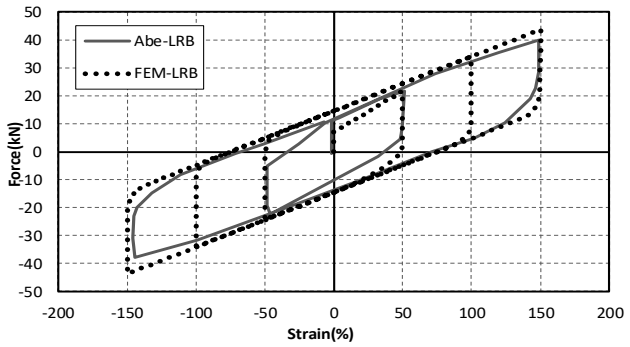
شکل ۳. الف) اندازه صفحات لاستیکی و فولادی به کار رفته در نمونه جداساز آزمایش شده بر حسب میلی متر [۱۵] ب) جداساز هسته سربی مدل شده در آباکوس

Fig. 3. a) Dimensions of rubber and steel plates in the experimental study in millimeters [15] b) Abaqus lead rubber bearing model

جدول ۱. مشخصات اجزای تشکیل دهنده‌ی جداساز LRB

Table 1. Specifications of the lead rubber bearing

نوع جداساز	جداساز لاستیکی هسته سربی
ابعاد مقطع(mm)	200×200
مدول برشی (MPa)	0.78
تعداد لایه لاستیک	7
ضخامت لایه های لاستیک (mm)	5
تعداد لایه های فولاد	6
ضخامت یک لایه فولاد (mm)	2.3
قطر هسته سربی (mm)	40



شکل ۴. مقایسهٔ نمودار نیرو–جابه جایی برای جداساز در این تحقیق با مدل آزمایشگاهی Abe و همکاران

Fig. 4. Comparison of the force-displacement curve of the numerical model and experimental results of Abe et al.

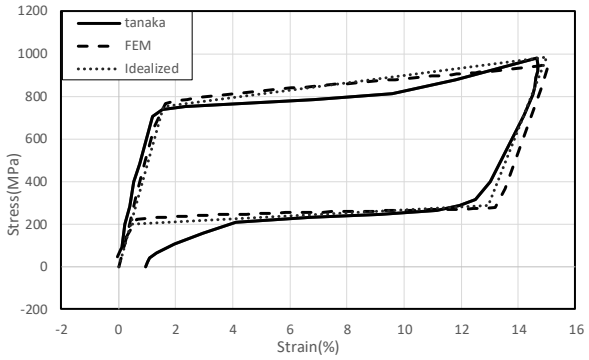
۳-۲- آلیاژ حافظه دار

در این پژوهش جهت صحت سنجی، از سه نوع آلیاژ حافظه‌دار استفاده شده است که بهترین عملکرد را نوع FeNiCuAlTaB از خود نشان می‌دهد. این نمونه با توجه به مقاله ارائه شده توسط تاناکا[1] [۱۷] صحت‌سنجی شده است. مشخصات آلیاژ حافظه‌دار مورد ارزیابی در جدول ۲ آورده شده است. شکل ۵ نتایج منحنی تنش- کرنش ایده‌آل، آزمایشگاهی تاناکا و مدل شده در آباکوس را نشان می‌دهد. نتایج، تطابق مناسب مدل های عددی با آزمایشات تاناکا را نشان می دهد. مدل‌سازی آلیاژ حافظه‌دار به کمک مواد تعریف شده توسط کاربر در آباکوس مشابه پژوهش کانتی و همکاران [۱۸]، انجام شده است. برای تعریف آلیاژهای حافظه دار در آباکوس نیاز به ۱۴ پارامتر

1 Tanaka

جدول ۲. مشخصات آلیاژ حافظه‌دار
Table 2. Specifications of shape-memory alloy

مدول کشسانی فاز آستنیت(MPa)	۴۶۹۰۰
ضریب پواسون آستنیت	۰/۳۳
مدول کشسانی فاز مارتنزیت(MPa)	۳۵۰۰۰
ضریب پواسون مارتنزیت	۰/۳۳
کرنش برشی حاصل از تبدیل فاز	۰/۱۳۵
نسبت تنش به دما در حالت بارگذاری(MPa/T)	۶
تنش آغاز تبدیل فاز مستقیم(MPa)	۷۵۰
تنش پایان تبدیل فاز مستقیم(MPa)	۹۸۳/۵
دما(°C)	۲۰
نسبت تنش به دما در حالت باربرداری(MPa/T)	۶
تنش آغاز تبدیل فازمعکوس(MPa)	۲۸۲
تنش پایان تبدیل فازمعکوس(MPa)	۲۱۰
تنش فشاری بحرانی برای آغاز تحول فازی(MPa)	۰
کرنش برشی حجمی ایجاد شده در اثر تبدیل فاز	۰/۱۳۵



شکل ۵. نمودار تنش-کرنش برشی آلیاژ حافظه‌دار واقعی و ایده‌آل و مدل شده در آباکوس
Fig. 5. Shear stress-strain curve of actual and idealized shape memory alloy compared with numerical results

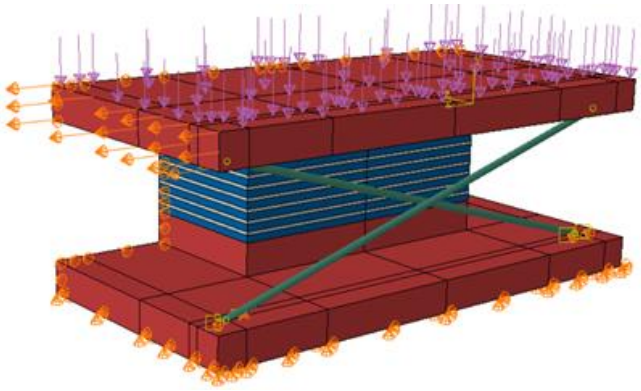
است که این پارامترها در جدول ۲ ذکر شده است.

المان های مورد استفاده در مدل سازی، المان‌های C3D8R، C3D8RH و C3D8I هستند. المان C3D8R (المان شش وجهی هشت گره‌ای با انتگرال کاهش یافته) برای مدل سازی صفحات فولادی و هسته سربی استفاده شده است. المان C3D8RH (۸ گرهی با سه درجه آزادی با فرض المان تراکم ناپذیر) که نرم‌افزار پیشنهاد می‌کند که از این المان برای مصالح تراکم ناپذیر و یا تقریباً تراکم ناپذیر استفاده گردد. لذا برای مدل کردن لاستیک از این نوع المان استفاده شده است. از المان C3D8I (المان ۸ گره‌ای مرتبهٔ اول با مودهای ناسازگار[1]) برای جلوگیری از پدیده قفل شدگی برشی[2] در مود خمش خالص استفاده شده است. این المان سیزده درجه ی آزادی اضافی به عنوان گرادیان میدان جابه جایی دارد. از این نوع المان برای مدل سازی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار استفاده گردیده است.

۴- مشخصات مدل

جداساز LRB معرفی شده در قسمت قبل مبنای مطالعات عددی این پژوهش قرار گرفته است. به عبارت دیگر اثر افزودن SMA بر روی جداساز LRB ذکر شده مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق ۲۵ نمونه جداساز ترکیبی LRB-SMA به کمک نرم افزار آباکوس با روش تحلیل استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته اند. در مدل اجزاء محدود، سرب استفاده شده دارای جرم حجمی $11340\ kg/m^3$ و مدول یانگ ۱۶ GPa و تنش تسلیم ۱۰ MPa است. لاستیک‌های به کار رفته در مدل دارای میرایی کم ۲ تا ۳ درصد است. در میان انواع مدل‌های غیرخطی موجود در نرم افزار از یک مدل غیرخطی متداول جهت مدل نمودن رفتار لاستیک تحت اثر هم زمان بار فشاری قائم و جابه جایی‌های رفت و برگشتی استفاده شده است. در این مدل اجزاء محدود، مدول برشی لاستیک ۰/۷ MPa و چگالی آن kg/m^3 ۱۲۰۰ انتخاب شده است. لاستیک‌ها به کمک مدل Neo Hooke و ضرایب c_{10}=250000 MPa و $D_1=10^{-9}$ 1/MPa در نرم‌افزار مدل شده اند. صفحات فولادی به عنوان ماده ایزوتروپی با چگالی kg/m^3 ۷۸۵۰، مدول الاستیسیته ۲۱۰ GPa و نسبت پواسون ۰/۳ در نظر گرفته شده است. تنش تسلیم فولاد ۲۴۰ MPa و نسبت سخت شوندگی پس از تسلیم آن ۵٪ است. شرایط مرزی بدین گونه است که صفحه فولادی پایین در تمام جهات بسته شده است. به دلیل تقارن جداساز، نصف جداساز مدل شده و در قسمت تقارن، مدل در جهت قائم بسته شده است. شرایط بارگذاری به این صورت است که بار فشاری در وجه بالایی صفحه بالا برای اعمال بار قایم و جابه جایی افقی به همان صفحه برای ایجاد تغییر مکان جانبی، اعمال می‌گردد (شکل ۶). مشخصات نوع المان در جدول ۳ نمایش داده شده است. پارامترهای مورد نیاز برای تعریف کردن آلیاژ SMA در نرم افزار آباکوس، مطابق جدول ۴ است. در این جدول مشخصات سه نوع آلیاژ مورد استفاده در این پژوهش آورده شده است. مشخصات پارامترهای

1 Incompatible
2 Shear Locking



شکل ۶. نحوه اعمال بار و تغییر مکان بر جداساز LRB-SMA
Fig. 6. Applying force and displacement to the hybrid base isolation

جدول ۳. مشخصات نوع المان
Table 3. Specifications of the elements

لاستیک	فولاد	سرب	SMA
C3D8RH	C3D8R	C3D8R	C3D8I

جدول ۴. مشخصات سه نوع SMA مورد استفاده در پژوهش
Table 4. Specifications of three shape-memory alloys used in this study

پارامتر	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳
مدول کشسانی فاز آستنیت (MPa)	۴۶۹۰۰	۳۵۸۷۷	۴۵۰۰۰
ضریب پواسون آستنیت	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳
مدول کشسانی فاز مارتنزیت (MPa)	۳۵۰۰۰	۲۴۴۶۲	۳۸۰۰۰
ضریب پواسون مارتنزیت	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳
کرنش برشی حاصل از تبدیل فاز	۰/۱۳۵	۰/۰۵۵۵	۰/۰۵۵
نسبت تنش به دما در حالت بارگذاری (MPa/T)	۶	۷/۶	۷/۶
تنش آغاز تبدیل فاز مستقیم (MPa)	۷۵۰	۴۸۹	۵۹۰
تنش پایان تبدیل فاز مستقیم (MPa)	۹۸۳/۵	۵۷۲	۶۴۰
دما(°C)	۲۰	۲۲	۳۷
نسبت تنش به دما در حالت باربرداری(MPa/T)	۶	۷/۶	۷/۶
تنش آغاز تبدیل فازمعکوس(MPa)	۲۸۲	۲۳۰	۳۰۰
تنش پایان تبدیل فازمعکوس(MPa)	۲۱۰	۱۴۷	۲۷۰
تنش فشاری بحرانی برای آغاز تحول فازی(MPa)	۰	۰	۰
کرنش برشی حجمی ایجاد شده در اثر تبدیل فاز	۰/۱۳۵	۰/۰۵۵۵	۰/۰۵۵

۲۵ مدل در جدول ۵ آورده شده است. تغییرات ابعادی اعمال شده در این پژوهش مطابق با تغییراتی است که آلام و احمدی پور در پژوهش خود انجام داده اند [۱۸]. به دلیل به هم چسبیده شدن صفحات فولادی و لاستیکی جداساز و فرض جدا نشدن آن ها از یکدیگر،

جدول ۵. مشخصات مدلهای جداساز ترکیبی LRB-SMA
Table 5. Specifications of numerical models of hybrid base isolation

مشخصات جداساز	نحوه تغییرات			
ابعاد (D)(mm×mm)	۲۰۰×۲۰۰	۲۵۰×۲۵۰	۳۰۰×۳۰۰	–
قطر هسته (r lead)(mm)	۴۰	۷۰	۱۰۰	–
قطر سیم (r SMA)(mm)	۲/۵	۵	۸	–
تعداد لایه لاستیک (Nr)	۷	۸	۹	۱۱
تعداد لایه فولاد	۶	۷	۸	۱۰
ضخامت لاستیک (hr)(mm)	۵	۴/۰۸۷	۳/۳۷۷	-
ضخامت فولاد(mm)	۲/۳	۲/۳	۲/۳	-
نوع SMA	۱	۲	۳	
فشار عمودی (P) (MPa)	۷/۸۴	۳/۴۵۶	۴/۹۷	۱۱

تمامی این صفحات با یکدیگر ادغام شده اند. با فرض اینکه سیم‌ها در انتها به صفحات فولادی بالا و پایین جداساز متصل هستند، انتهای سیم ها و صفحات به یکدیگر مقید شده اند.

۴-۱- محاسبه پارامترهای رفتاری جداساز با استفاده از منحنی هیسترزیس

منحنی های هیسترزیس، اطلاعات کاملی از رفتار چرخه ای مصالح، قطعات، اتصالات و موارد دیگر را در اختیار محققین قرار می دهند. رفتار سیستم پیش از تسلیم، پس از تسلیم، رفتار در چرخه های متناوب و میزان استهلاک انرژی از جمله مواردی است که از این منحنی ها حاصل می شود. پارامترهای مختلف رفتاری را نیز می توان به کمک این منحنی ها به دست آورد. در این بخش، نحوه محاسبه این پارامترها بیان شده است. در شکل ۷ یک حلقهٔ هیسترزیس و پارامترهای معمولی که از روی آن محاسبه می شود، نشان داده شده است. انرژی تلف شده در چرخه‌های بارگذاری، سختی معادل k_{eff} و نسبت میرایی ویسکوز معادل از جمله پارامترهایی است که معمولاً مورد بررسی قرار می گیرند.

در این شکل F_{max} نیروی حداکثر، $|F_{min}|$ نیروی حداقل، D_{max} جابه جایی حداکثر، D_{min} جابه جایی حداقل و $E_{D(F-D)}$ انرژی مستهلک شده در هر چرخه که در شکل معادل سطح داخل حلقهٔ هیسترزیس است. همچنین $E_{SO(F-D)}$ انرژی ذخیره شده در یک فنر الاستیک تحت شرایط استاتیکی و با سختی k_{eff} و جابه جایی D_{max} است.

سختی مؤثر و نسبت میرایی برای سیستم معادل مطابق روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند:

$$k_{eff(F-D)} = \frac{F_m}{D_m} \quad (۱)$$

$$\xi_{eq(F-D)} = \frac{1}{4\pi}\frac{E_{D(F-D)}}{E_{SO(F-D)}} \quad (۲)$$

که در آن F_m میانگین نیروهای حداکثر و حداقل، D_m میانگین جابه جایی های حداکثر و حداقل و E_{SO} طبق روابط (۳)، (۴) و (۵) به دست می آیند.

$$F_m = \frac{|F_{max}| + |F_{min}|}{2} \quad (۳)$$

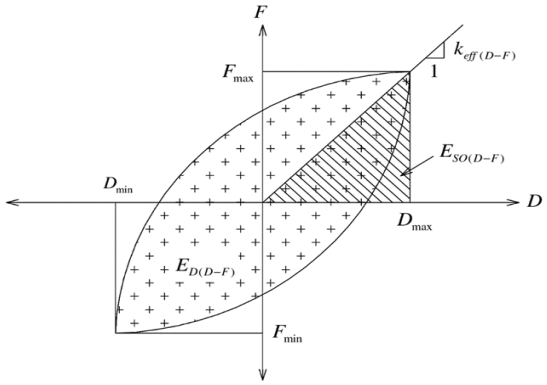
$$D_m = \frac{|D_{max}| + |D_{min}|}{2} \quad (۴)$$

$$E_{SO(F-D)} = \frac{1}{2}.k_{eff(F-D)}.D_m^{\,2} = \frac{F_m.D_m}{2} \quad (۵)$$

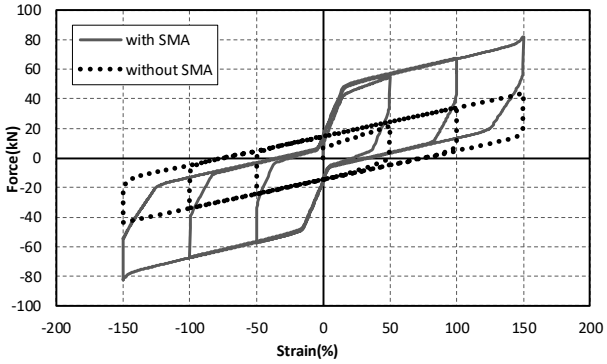
۵- بررسی اثر افزودن SMA بر رفتار جداساز LRB

در این بخش تأثیر اضافه شدن SMA به عنوان آلیاژی جدید بر تغییر پارامترهای سختی افقی مؤثر، جابه جایی باقی‌مانده، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل مورد بحث قرار می گیرد. شکل ۸ نمودار هیسترزیس مدل جداساز LRB و جداساز ترکیبی این پژوهش را در کنار هم نشان می دهد. همان‌طور که از این شکل می توان فهمید با اضافه شدن SMA به جداساز هسته سربی، به‌عنوان یک المان جدید، سختی افزایش پیدا کرده است. در جدول ۶ مقادیر پارامترهای معرفی شده در بخش قبل برای دو جداساز LRB و LRB-SMA با یکدیگر مقایسه شده اند. به عنوان مثال، سختی در کرنش برشی ۵۰٪ در LRB، ۱/۲۴ کیلو نیوتن بر میلی متر و در LRB-SMA، ۳/۱ کیلو نیوتن بر میلی متر است. به دلیل خاصیت برگشت‌پذیری SMA، جابه جایی باقی‌مانده یعنی میزان جابه جایی که در انتهای هر کرنش برشی با نیروی صفر باقی می‌ماند، کاهش پیدا می‌کند. با توجه به جدول ۶ در کرنش برشی ۱۵۰٪ میزان جابه جایی باقی‌مانده در مدل LRB، ۲۶/۳ mm و در مدل LRB-SMA، ۱۲/ mm۳ است و این به معنی کاهش به میزان ۴۷٪ است.

نیروی تسلیم مدل ترکیبی نسبت به مدل هسته سربی بیشتر



شکل ۷. پارامترهای موجود در یک حلقهٔ هیسترزیس
Fig. 7. Different parameters in a hysteresis loop



شکل ۸. نمودار هیسترزیس مدل LRB و LRB-SMA
Fig. 8. Hysteresis curves of LRB and LRB-SMA

است و همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است مدل هسته سربی دارای دو فاز رفتاری قبل از تسلیم و بعد از تسلیم است. اما در مدل ترکیبی چون دو ماده SMA و سرب هر دو تسلیم می شوند، مدل دارای سه فاز رفتاری است و سطح تسلیم نهایی بالاتر از مدل هسته سربی است. این موضوع باعث افزایش اتلاف انرژی (مساحت نمودار هیسترزیس) می‌گردد. به عنوان مثال، در کرنش برشی ۱۵۰٪ اتلاف انرژی درLRB، ۳۰۵۴/۹ J و در LRB-SMA، ۵۰۸۰/۲ J است. در صورتی که سختی مؤثر هر دو جداساز برابر فرض شود، به دلیل خاصیت برگشت پذیر بودن، میزان اتلاف انرژی تغییر چندانی نخواهد کرد. با توجه به نتایج جمع آوری شده در جدول ۶، میرایی ویسکوز معادل با اضافه شدن SMA، اندکی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، در کرنش برشی ۱۵۰٪ ، میرایی ویسکوز از ۲۱٪ به ۱۹٪ تغییر می‌کند.

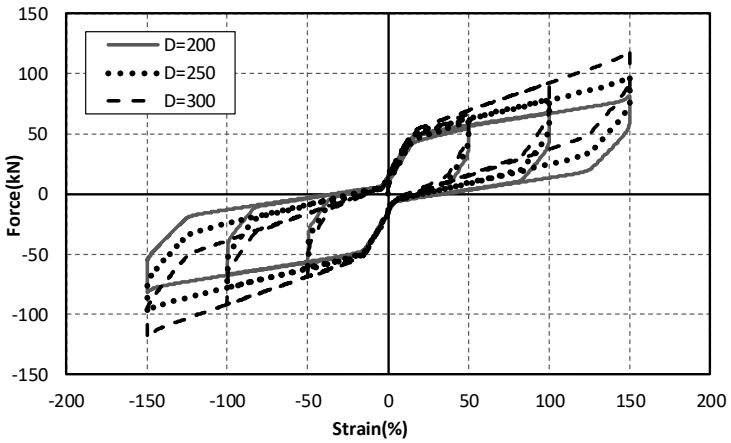
۶- بررسی اثر ابعاد جداساز ترکیبی

با بزرگ کردن ابعاد جداساز از ۲۰۰ mm تا ۳۰۰ mm مطابق قبل، تغییر پارامترهای سختی افقی مؤثر، جابه جایی باقی‌مانده، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل به دست آورده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به ثابت بودن طول سیم‌های SMA و مکان آنها و همچنین با توجه به اینکه ورق های بالا و پایین تقریباً صلب هستند و در نتایج مدل تأثیری ندارند، ابعاد آن ها بدون تغییر باقی‌مانده و تنها لایه‌های لاستیکی و فولادی قسمت وسط تغییر اندازه داده شده‌اند.

شکل ۹ نمودار هیسترزیس مدل‌های ذکر شده در بالا را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش ابعاد جداساز ترکیبی LRB-SMA، از ۲۰۰ mm تا ۳۰۰ mm و ثابت ماندن قطر سیم‌های SMA (۵ mm)، به ترتیب در کرنش های برشی، ۵۰ ٪، ۱۰۰ ٪ و ۱۵۰٪، با توجه به افزایش ابعاد لاستیک، نقطه تسلیم بالاتر می‌رود و سختی افقی مؤثر جداساز، افزایش می‌یابد. تغییر پارامترهای مورد مطالعه در این پژوهش، درجدول ۷ نمایش داده شده است. به طور مثال، در کرنش برشی ۱۵۰٪، سختی با افزایش ابعاد از ۱/ kN/mm۵۵ به۲۷ kN/mm / ۲افزایش می‌یابد و جابه جایی باقی‌مانده کاهش پیدا می‌کند. به عنوان مثال، در کرنش برشی ۱۰۰٪، مقدار جابه جایی باقی‌مانده D-200، ۱۱/۵ mm، D-250، mm ۴/ ۷و D-300 به مقدار ۵/۲ mm تغییر پیدا کرده است. میرایی ویسکوز معادل نیز کاهش پیدا کرده است. به عنوان مثال، در کرنش ۱۵۰٪، میرایی ویسکوز در D-200، ۱۹٪ و در D-300، ۱۳٪ است.

جدول ۶. مقایسه نتایج مدل LRB و مدل LRB با اضافه کردن سیمهای SMA
Table 6. Comparison of LRB models with and without SMA wires

γ (%) / Case	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
With SMA	3.1	1.92	1.55	8.79	11.5	12.3	1503.2	3308.1	5080.2	25.1	22.4	18.9
Without SMA	1.2	0.97	0.83	17.38	26.3	26.3	993.5	2037.1	3054.9	41.4	27.1	21.2



شکل ۹. نمودار هیسترزیس با تغییر ابعاد جداساز
Fig. 9. Hysteresis curves for different base isolation dimensions

۷- بررسی اثر قطر سیم‌های SMA بر جداساز ترکیبی

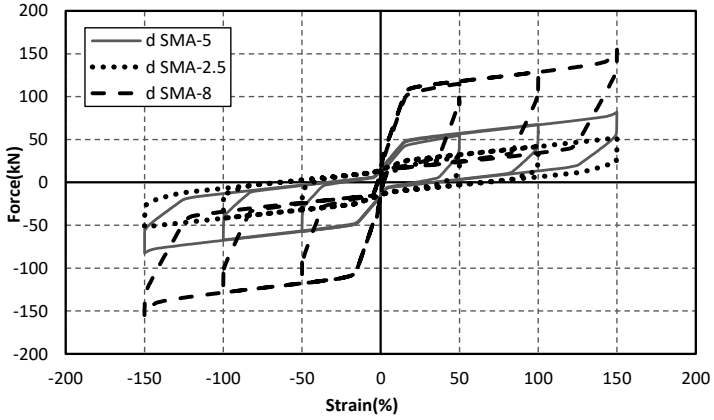
با افزایش قطر سیم‌های SMA از ۲/۵ mm تا ۸ mm همانند قبل پارامترهای سختی افقی مؤثر، جابه جایی باقی‌مانده، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل به دست آورده شده است. شکل ۱۰ نمودار هیسترزیس با تغییر قطر سیم ها را نشان می‌دهد. با ثابت ماندن ابعاد جداساز و تغییر قطر سیم‌های SMA، با توجه به زیاد شدن سطح مقطع سیم های SMA، که موجب افزایش سختی و بالا رفتن نقطه تسلیم می‌گردد، اتلاف انرژی و سختی افقی مؤثر افزایش پیدا کرده است. به طور مثال، با توجه به جدول ۸، در کرنش برشی ۱۵۰٪ اتلاف انرژی در قطر ۵ mm و ۸ mm به ترتیب از ۵۰۸۰/۲ J به ۸۳۷۶/۰ J و سختی افقی مؤثر به ترتیب از ۱/۵۵ kN/mm به ۲/۹۶ kN/mm افزایش پیدا کرده است. جابه جایی باقی‌مانده کاهش چشمگیری پیدا کرده است. به‌طور مثال، جابه جایی باقیمانده در کرنش برشی ۱۵۰٪ در قطر ۵ mm و ۸ mm به‌ترتیب ۱۲/۳۲ mm و ۰/۵۴ mm است. میرایی ویسکوز معادل نیز با افزایش قطر، کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در کرنش برشی ۱۵۰٪ ، مقدار میرایی ویسکوز در قطر ۵ mm، ۱۸/۹٪ و در قطر ۸ mm به ۱۶/۳٪ کاهش یافته است.

۸- بررسی اثر قطر هسته سربی بر جداساز ترکیبی

با بزرگ کردن قطر هسته سربی جداساز از ۴۰ mm تا ۱۰۰ mm تغییر پارامتر های سختی افقی مؤثر، جابه جایی باقی مانده، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل به دست آورده شده است. شکل ۱۱ نمودار هیسترزیس ناشی از تغییر قطر هسته سربی را نشان می‌دهد. با افزایش قطر هسته سربی، سختی افقی مؤثر، اتلاف انرژی و

جدول ۷. تأثیر تغییر ابعاد جداساز بر مشخصات رفتاری آن
Table 7. Effect of base isolation dimensions on its performance

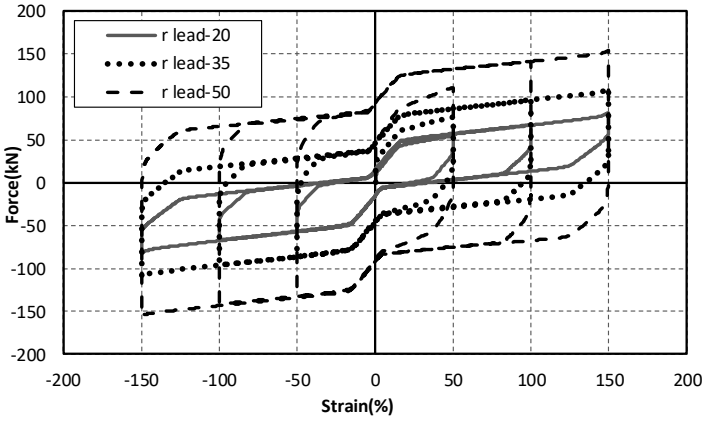
γ (%) / Case	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
D-200	3.10	1.92	1.55	8.79	11.5	12.3	1503.2	3308.1	5080.2	25.2	22.4	18.9
D-250	3.42	2.24	1.87	6.41	7.4	7.7	1513.9	3312.6	5057.4	23.1	19.2	15.5
D-300	3.81	2.63	2.27	4.30	5.2	5.5	1529.5	3300.3	5033.9	20.9	16.3	12.8



شکل ۱۰. نمودار هیسترزیس با تغییر قطر سیمها
Fig. 10. Hysteresis curves for different SMA wire diameters

جدول ۸. تأثیر تغییر قطر سیمهای SMA بر مشخصات رفتاری جداساز
Table 8. Effect of SMA wire diameters on the performance of base isolation

γ (%) / Case	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
dSMA-2.5	1.68	1.20	0.98	14.93	22.6	22.49	1104.9	2314.8	3513.7	34.1	24.9	20.5
dSMA-5	3.10	1.92	1.55	8.79	11.5	12.32	1503.2	3308.1	5080.2	25.2	22.4	18.9
dSMA-8	6.58	3.67	2.96	0.74	0.5	0.54	2315.2	5426.5	8376	18.3	19.2	16.3



شکل ۱۱. نمودار هیسترزیس با تغییر قطر هسته سربی
Fig. 11. Hysteresis curves for different lead core diameters

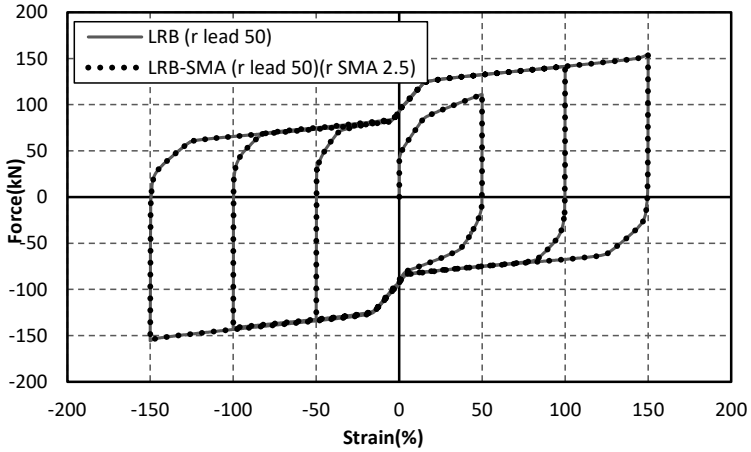
جابه جایی باقی مانده به دلیل افزایش نقطه تسلیم سرب، افزایش پیدا می‌کند. به عنوان مثال، میزان اتلاف انرژی در کرنش برشی ۱۵۰٪، در مدل با قطر هسته سربی ۴۰ میلی متر، J ۵۰۸۰/۲۲ و در مدل با قطر هسته سربی ۱۰۰ میلی متر J ۲۱۱۴۰/۵ است. با توجه به جدول ۹، میرایی ویسکوز معادل نیز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در کرنش برشی ۱۵۰٪، میرایی ویسکوز از ۱۸/۹۱٪ در کمترین قطر هسته سربی به ۴۱/۴۰٪ در بیشترین قطر هسته سربی افزایش پیدا می‌کند.

همان گونه که در شکل ۱۱ مشخص است با افزایش قطر هسته سربی، رفتار هیسترزیس جداساز ترکیبی به رفتار جداساز LRB نزدیک شده و خاصیت بازگردانندگی SMA کمتر مشاهده می شود. برای بررسی این موضوع به صورت دقیق تر، رفتار دو مدل جداساز LRB و جداساز ترکیبی با قطر هسته سربی ۱۰۰ میلی متر با یکدیگر مقایسه شده اند. شکل ۱۲ نمودار هیسترزیس این دو مدل را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۱۲ و جدول ۱۰ پیداست با افزایش قطر هسته سربی، نقش سیم‌های SMA کمرنگ‌تر می‌شود تا جایی که رفتار این دو جداساز هیچ گونه تفاوتی با یکدیگر نداشته و سیم‌های SMA با قطر mm ۵ کاملاً بی اثر شده اند. به عبارت دیگر در صورتی که سختی جانبی سیم های SMA در مقابل سختی جانبی هسته سربی بسیار پایین باشد، رفتار هسته سربی حاکم شده و سیم های SMA بی اثر می شوند. اما با افزایش قطر سیم های SMA از mm ۵ به mm ۸ مطابق شکل ۱۲، حضور سیم‌های SMA احساس می‌گردد.

شکل ۱۳ و جدول ۱۱ گویای نتایج به دست آمده از تحلیل مدل جداساز ترکیبی با قطر هسته mm ۱۰۰ و قطر سیم SMA، mm ۵ و مدل جداساز ترکیبی با قطر هسته mm ۱۰۰ و قطر سیم SMA، mm ۸ است. همان‌طور که در جدول ۱۱ مشخص است با افزایش

جدول ۹. تأثیر تغییر قطر هسته سربی بر مشخصات رفتاری جداساز
Table 9. Effect of lead core diameters on the performance of base isolation

γ (%) / Case	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
r-20	3.10	1.92	1.55	8.8	11.5	12.32	1503.22	3308.14	5080.22	25.16	22.36	18.91
r-35	4.39	2.74	2.09	16.7	33.4	47.13	3323.1	7525.23	11419.8	39.31	35.64	31.41
r-50	6.35	4.04	2.95	17.4	34.9	52.37	6084.7	14015.04	21140.5	49.75	45.09	41.40



شکل ۱۲. نمودار هیسترزیس جداساز LRB و جداساز ترکیبی با قطر هسته سربی ۱۰۰ میلیمتر و قطر SMA ۵ میلیمتر
Fig. 12. Hysteresis curves for LRB and LRB-SMA with lead core diameter of 100 mm and SMA wire diameter of 5 mm

قطر سیم‌های SMA، سختی افقی و اتلاف انرژی افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه جابه جایی باقی‌مانده و میرایی ویسکوز معادل کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در کرنش برشی ۱۵۰٪، میزان جابه جایی باقی مانده از ۵۲/۴ mm به ۴۷/۳ mm کاهش پیدا می‌کند.

۹- بررسی تغییر نوع سیم‌های SMA در جداساز ترکیبی

شکل ۱۴ نمودار هیسترزیس ناشی از تغییر نوع SMA (مطابق جدول ۴) را نشان می‌دهد. با تغییر نوع سیم‌های SMA، همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود مدل شماره ۱ با توجه به کرنش سوپرالاستیک ۱۳/۵٪ هنوز در محدوده سوپرالاستیک باقی مانده است، اما در دو مدل دیگر با کرنش سوپرالاستیک ۵/۵٪، بعد از کرنش برشی ۵۰٪ سختی نمودار به صورت ناگهانی افزایش پیدا می‌کند. با توجه به رفتار SMA دو نکته را در مورد این آلیاژ می‌توان مورد توجه قرار داد:

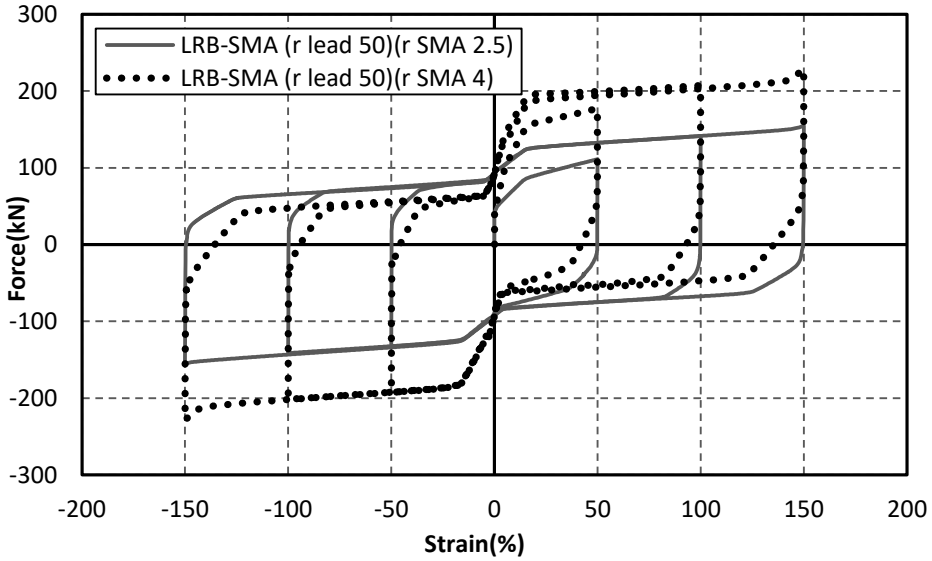
نکته اول کرنش سختی است که با افزایش تغییر شکل در جداساز اتفاق می‌افتد و دوم هم زمان با این اتفاق، تغییر فاز آستنیت به مارتنزیت است که علاوه بر افزایش دما، باعث ایجاد تنش (تنش ناشی از فاز مارتنزیت) نیز می شود. به عبارت دیگر مشابه اتفاقی که در حالت حافظه‌دار شکلی اتفاق می‌افتد این بار تحت تأثیر تنش رفتار ماده تغییر می کند.

در جدول ۱۲ تغییرات سختی افقی، جابه جایی باقی‌مانده، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل برای انواع سیم های SMA نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در کرنش های برشی بالا نوع SMA مدل اول، با کرنش سوپر الاستیک ۱۳/۵٪ و دمای پایانی آستنیت ۶۲- درجه، بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد. میزان اتلاف انرژی و سختی افقی مؤثر جداساز ترکیبی با SMA نوع اول از دو جداساز ترکیبی دیگر بیشتر است. به‌عنوان مثال اتلاف انرژی

جدول ۱۰. مقایسه مشخصات رفتاری جداساز LRB و جداساز ترکیبی با قطر هسته سربی ۱۰۰ میلیمتر و قطر SMA ۵ میلیمتر

Table 10. Comparison of the performance of LRB and LRB-SMA with lead core diameter of 100 mm and SMA wire diameter of 5 mm

γ (%) / Case	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
LRB (r lead 50)	6.36	4.04	2.95	17.4	34.9	52.4	6084.7	14015.1	21140.5	49.7	45.1	41.4
LRB-SMA(r lead 50)(r SMA 2.5)	6.36	4.04	2.95	17.4	34.9	52.4	6084.7	14015.1	21140.5	49.7	45.1	41.4



شکل ۱۳. نمودار هیسترزیس جداسازهای ترکیبی با قطر هسته سربی ۱۰۰ میلیمتر و قطر SMA ۵ و ۸ میلیمتر

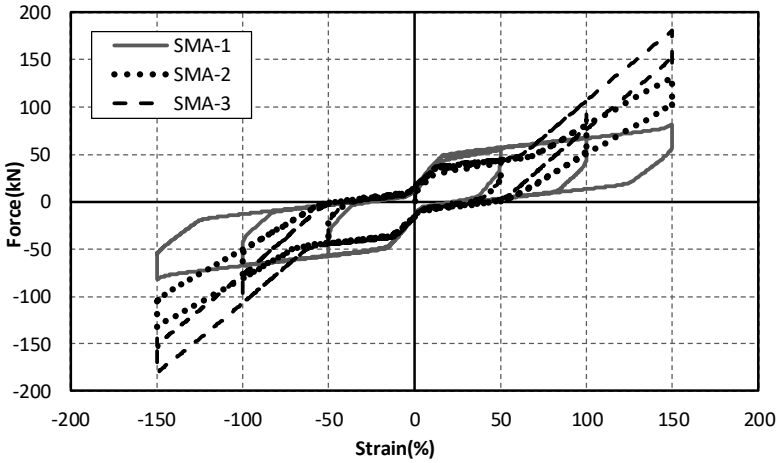
Fig. 13. Hysteresis curves for LRB and LRB-SMA with lead core diameter of 100 mm and SMA wire diameters of 5 and 8 mm

جدول ۱۱. مقایسه مشخصات رفتاری جداسازهای ترکیبی با قطر هسته سربی ۱۰۰ میلیمتر و قطر SMA ۵ و ۸ میلیمتر

Table 11. Comparison of the performance of LRB and LRB-SMA with lead core diameter of 100 mm and SMA wire diameters of 5 and 8 mm

γ (%) / Case	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
LRB-SMA(r lead 50) (r SMA 2.5)	6.36	4.04	2.95	17.4	34.9	52.4	6084.7	14015.1	21140.5	49.7	45.1	41.4
LRB-SMA(r lead 50) (r SMA 4)	10.12	5.92	4.36	16.23	33.3	47.3	6938.4	16260.9	24455.5	35.6	35.7	32.4

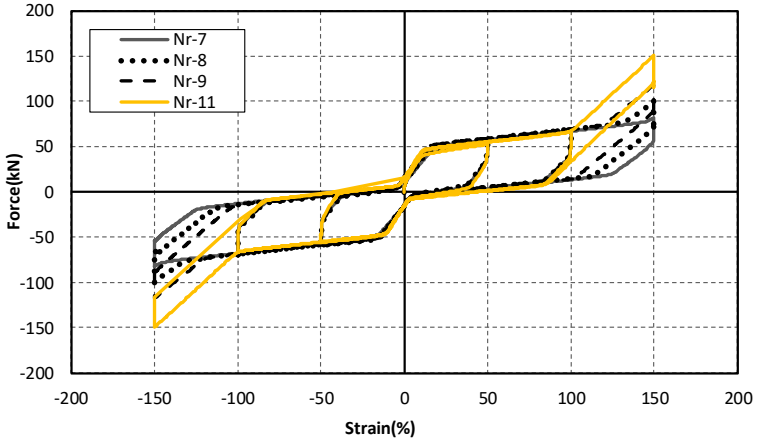
جداساز با SMA نوع اول در کرنش ۱۵۰٪، ۵۰۸۰/۲ J است اما در جداساز با SMA نوع سوم به ۳۵۲۰/۶ J کاهش پیدا می‌کند. میزان جابه جایی باقی‌مانده نیز افزایش پیدا می‌کند که مطلوب نیست. به عنوان مثال، جابه جایی باقی‌مانده مدل با SMA نوع اول در کرنش ۵۰٪ معادل ۹mm است در حالی که در مدل با SMA نوع دوم به ۱۳mm افزایش پیدا کرده است.



شکل ۱۴. نمودار هیسترزیس با تغییر نوع سیمهای SMA
Fig. 14. Hysteresis curves for different SMA types

جدول ۱۲. تأثیر تغییر نوع سیم SMA بر مشخصات رفتاری جداساز
Table 12. Effect of SMA types on the performance of base isolation

γ (%) / Case	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
SMA-1	3.10	1.92	1.55	8.79	11.5	12.32	1503.2	3308.1	5080.2	25.2	22.4	18.9
SMA-2	2.36	2.30	2.51	13.03	16	16.37	1306.4	2492	3525.1	28.6	14	8.1
SMA-3	2.45	3.05	3.44	12	13.4	13.94	1335.5	2486.5	3520.6	28.3	10.6	5.9



شکل ۱۵. نمودار هیسترزیس جداساز ترکیبی با تعداد لایه‌های لاستیک ۷، ۸، ۹ و ۱۱
Fig. 15. Hysteresis curves of hybrid base isolation with 7, 8, 9 and 11 rubber layers

۱۰- بررسی اثر افزایش ارتفاع جداساز ترکیبی

با تغییر تعداد لایه‌های لاستیک با ضخامت لاستیک برابر (به‌ترتیب دارای تعداد لایه‌های لاستیک ۷، ۸، ۹ و ۱۱)، پارامترهای سختی افقی مؤثر، جابه جایی باقی‌مانده، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل مورد بررسی قرار گرفته است. محل اتصال سیم‌ها ثابت است و با توجه به افزایش ارتفاع، طول سیم‌های SMA تغییر پیدا کرده است. شکل

جدول ۱۳. تأثیر تغییر تعداد لایه‌های لاستیک بر مشخصات رفتاری جداساز ترکیبی
Table 13. Effect of number of rubber layers on the performance of hybrid base isolation

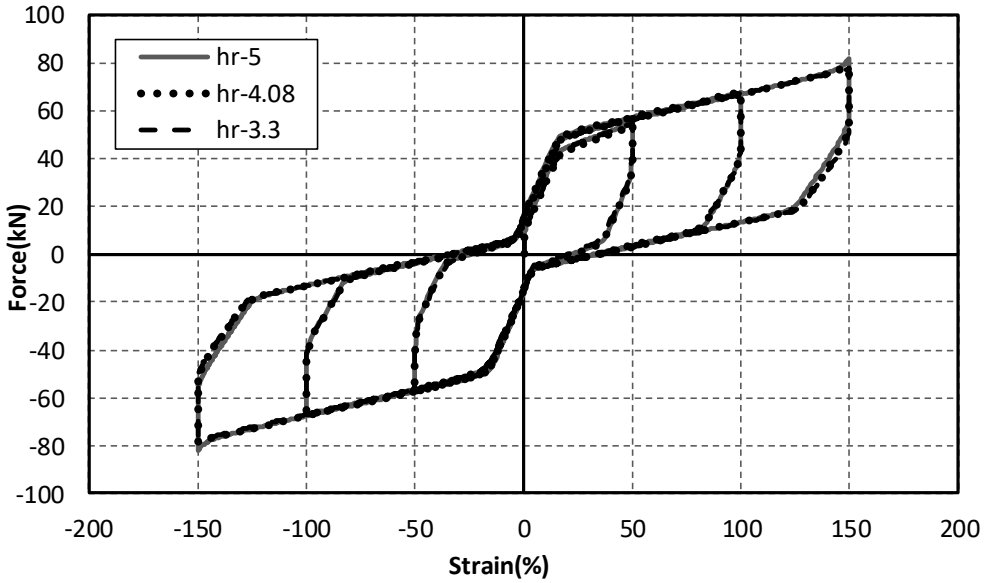
γ (%) / Case	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
Nr-7	3.10	1.92	1.55	8.79	11.5	12.32	1503.2	3308.1	5080.2	25.2	22.4	18.9
Nr-8	2.82	1.71	1.66	6.57	8.9	9.75	1737.3	3787.3	5577.4	24.5	21.2	14.8
Nr-9	2.48	1.53	1.75	7.96	10.4	11.65	1960.7	4300.4	6077.6	24.8	22	12.1
Nr-11	1.90	1.21	1.82	17.9	20.6	20.7	2375.8	5427.4	7412.3	26.2	23.5	9.5

۱۵ نمودار هیسترزیس این مدل‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۵ در کرنش برشی بیشتر از ۱۰۰٪ مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع جداساز، سختی افقی به‌صورت ناگهانی افزایش پیدا می‌کند. با توجه به جدول ۱۳، در کرنش برشی ۱۵۰٪ سختی افقی در مدل با تعداد لایه های لاستیک برابر ۷، ۱/۵۵ kN/mm و مدل با تعداد لایه های لاستیک برابر ۱۱، ۱/۸۲ kN/mm است. این در حالی است که در کرنش های برشی پایین تر، سختی افقی با افزایش تعداد لایه های لاستیک کاهش می یابد. این افزایش و کاهش سختی، به دو دلیل قابل توجیه است. دلیل اول این است که زیاد شدن لایه های لاستیک و ارتفاع جداساز باعث کاهش سختی افقی می شود، اما با توجه به اینکه با زیاد شدن ارتفاع جداساز، جابه جایی اعمال شده به جداساز افزایش پیدا می‌کند (به عنوان مثال، جابه جایی در کرنش برشی ۱۵۰٪ از ۵۲/۵ mm تا ۸۲/۵ mm تغییر می‌کند)، تنش و کرنش محوری به وجود آمده در سیم‌ها افزایش می‌یابد و این باعث کرنش سختی و ایجاد تنش ناشی از فاز مارتنزیت می‌شود. میزان اتلاف انرژی نیز با افزایش ارتفاع جداساز افزایش پیدا می‌کند. به عنوان مثال، در کرنش برشی ۱۵۰٪ میزان اتلاف انرژی در مدل با کمترین تعداد لایه، ۵۰۸۰/۲ J و در مدل با بیشترین تعداد لایه J ۷۴۱۲/۳ است. لازم به ذکر است که میزان میرایی ویسکوز معادل و جابه جایی باقی‌مانده به صورت نامنظم تغییر پیدا کرده است.

۱۱- بررسی اثر ضخامت لاستیک در جداساز ترکیبی

با تغییر ضخامت لایه‌های لاستیک با ارتفاع ثابت جداساز پارامترهای سختی افقی مؤثر، جابه جایی باقی‌مانده، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل مورد بررسی قرار گرفته است. مجدداً محل اتصال سیم‌ها ثابت است و با توجه به عدم افزایش ارتفاع، طول سیم‌های SMA تغییر پیدا نکرده است. شکل ۱۶ نمودار هیسترزیس جداساز با ضخامت‌های مختلف لاستیک را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد با ثابت گرفتن ارتفاع جداساز ((تعداد لایه لاستیک × ضخامت یک لایه لاستیک) + (تعداد لایه فولاد × ضخامت یک لایه فولاد)) و تغییر تعداد و ضخامت لایه های لاستیک با ضخامت ثابت فولاد ۲/۳ mm، پارامترهای مطالعه مطابق با نتایجی که آلام و احمدی پور [۱۷]در پژوهش خود به دست آوردند، تغییرات کمی می‌کنند.

مطابق جدول ۱۴، سختی افقی مؤثر با کاهش ضخامت لایه‌های لاستیک (افزایش تعداد لایه لاستیک) افزایش پیدا می‌کند. به عنوان مثال در کرنش ۵۰٪ میزان سختی افقی در مدل با ضخامت لاستیک ۵ میلی متر، ۳/۱۰ kN/mm و در مدل با ضخامت لاستیک ۳/۳ میلی متر، ۳/۵۸ kN/mm است. جابه جایی باقی‌مانده، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل نیز با کاهش ضخامت لاستیک، کاهش می‌یابند. به عنوان مثال، جابه جایی باقی‌مانده در کرنش ۵۰٪ در مدل با بیشترین ضخامت لاستیک، ۳/۱۰ mm و در مدل با کمترین ضخامت لاستیک، ۳/ mm۵۸ است. اتلاف انرژی نیز در کرنش ۵۰٪ در این دو مدل به ترتیب، ۱۵۰۳/۲ J و ۱۲۳۵ J است. در نهایت تغییر ضخامت لاستیک با ارتفاع کل ثابت، در تغییر نتایج تأثیر ناچیزی دارد.



شکل ۱۶. نمودار هیسترزیس جداساز ترکیبی با ضخامت‌های مختلف لاستیک و ارتفاع ثابت جداساز

Fig. 16. Hysteresis curves of hybrid base isolation for different rubber layer thicknesses with a constant base isolation height

جدول ۱۴. تأثیر تغییر ضخامت لاستیک بر مشخصات رفتاری جداساز ترکیبی

Table 14. Effect of rubber layer thickness on the performance of hybrid base isolation

γ (%) / Case	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
hr-5	3.10	1.92	1.55	8.79	11.5	12.32	1503.2	3308.1	5080.2	25.2	22.4	18.9
hr-4.08	3.29	2.07	1.59	7.77	10.5	11.17	1362.3	3097.8	4797.2	24.6	22.2	19.9
hr-3.3	3.58	2.21	1.70	7.17	10	10.52	1235	2839.7	4415.4	23.7	22.1	19.8

۱۲- بررسی تنش فشاری بر رفتار جداساز ترکیبی

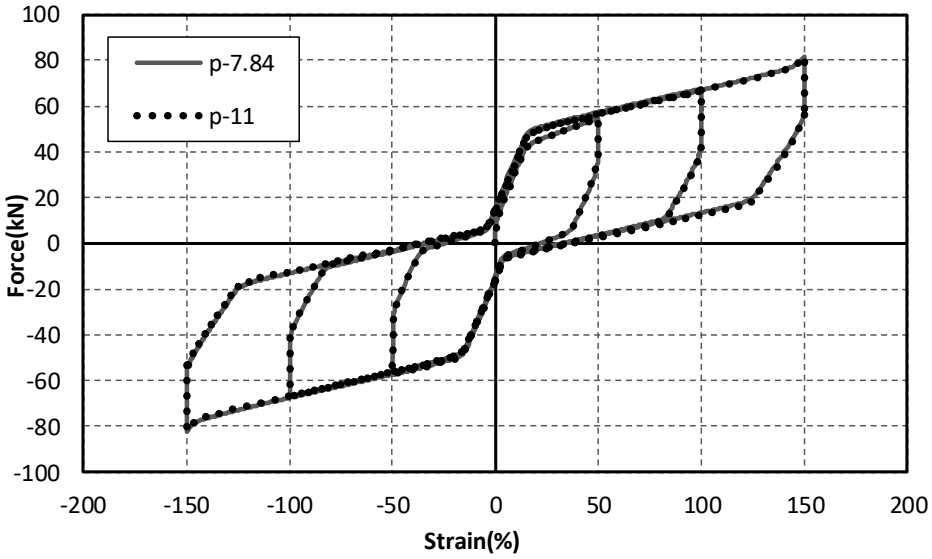
در این قسمت تأثیر تنش فشاری روی جداساز مورد ارزیابی قرار گرفته است. جداساز با طول و عرض مساوی به اندازه mm ۲۰۰، ۲۵۰ mm و ۳۰۰ mm تحت بارهای فشاری مختلف که تنش های حداکثر را طبق آیین نامه‌های ۵۲۳ [۱۹] و آشتو [۲۰] اعمال کنند، قرار داده شده است. تنش فشاری مجاز طبق آیین نامه ۵۲۳، MPa۸۴ و طبق آیین نامه آشتو (رابطه (۶)) MPa۱۱ / ۷ به دست می‌آید.

$$\sigma \le 1.6GS \le 1.6ksi \qquad (۶)$$

شکل ۱۷ تأثیر تنش فشاری را بر رفتار جداساز با ابعاد mm ۲۰۰ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکل حاکی از تغییرات ناچیز در رفتار چرخه ای تحت تنش های فشاری مختلف است. همین رفتار برای جداسازهای با ابعاد دیگر نیز مشاهده می شود.

۱۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مطالعه پارامتری کامل بر روی رفتار جداساز ترکیبی LRB-SMA انجام شده و رفتار این جداساز با جداساز LRB مقایسه شده و تأثیر عوامل مؤثر بر رفتار این جداساز ترکیبی مورد بحث قرار گرفته است. این کار با ساخت ۲۵ مدل المان محدود در نرم



شکل ۱۷. نمودار هیسترزیس جداساز با تنش های فشاری مختلف
Fig. 17. Hysteresis curves of base isolation for different axial stress

افزار آباکوس انجام شده است. تغییرات پارامترهای اضافه شدن SMA به جداساز LRB، ابعاد جداساز ترکیبی، قطر سیم‌های SMA، قطر هسته سربی، نوع سیم‌های SMA، ارتفاع جداساز، ضخامت لاستیک و تنش فشاری بر رفتار جداساز ترکیبی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. خلاصه ای از نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- با اضافه شدن SMA به جداساز هسته سربی سختی، نیروی تسلیم و میزان اتلاف انرژی افزایش و جابه جایی باقی‌مانده کاهش می یابد. رفتار جداساز ترکیبی نیز بر خلاف جداساز هسته سربی که به صورت دو خطی است، فرمی سه خطی داشته و هسته سربی و سیم های SMA هر دو در رفتار چرخه ای سیستم نقش آفرینی می کنند.
- با افزایش ابعاد جداساز ترکیبی سختی و نیروی تسلیم افزایش و جابه جایی باقی‌مانده و میرایی ویسکوز معادل کاهش پیدا می‌کند.
- با افزایش سطح مقطع سیم‌های SMA سختی، نیروی تسلیم و میزان اتلاف انرژی افزایش و جابه جایی باقی‌مانده کاهش می یابد.
- با افزایش قطر هسته سربی سختی، میزان اتلاف انرژی، جابه جایی باقی مانده و میرایی ویسکوز معادل افزایش پیدا می‌کند. به تعبیر دیگر با افزایش قطر هسته سربی، رفتار هیسترزیس جداساز ترکیبی به رفتار جداساز LRB نزدیک شده و خاصیت بازگردانندگی SMA کمتر مشاهده می شود. در نتیجه برای رسیدن به رفتاری ترکیبی که هم بتوان از ظرفیت جذب انرژی مناسب سرب و هم از خاصیت بازگردانندگی SMA استفاده نمود لازم است تعادل مناسب بین سختی هسته سربی و سیم های SMA برقرار شود.
- در سیم های SMA که کرنش سوپرالاستیک آن ها بالاتر باشد خاصیت بازگردانندگی بهتری در رفتار جداساز ترکیبی مجهز به آن ها به چشم می خورد. ولی در سیم های SMA که کرنش سوپرالاستیک پایین تری دارند، در کرنش های برشی نسبتاً پایین، سختی نمودار چرخه ای جداساز ترکیبی به صورت ناگهانی افزایش پیدا می‌کند. دلیل این امر خاصیت کرنش سختی و تغییر فاز آستنیت به مارتنزیت سیم های SMA است.
- با افزایش ارتفاع جداساز ترکیبی، رفتار جداساز در کرنش های برشی کم و زیاد متفاوت خواهد بود. به عبارت دیگر در کرنش های برشی زیاد به علت تغییر طول زیاد سیم های SMA، رفتار کرنش سختی و تغییر فاز آستنیت به مارتنزیت در آن ها مشاهده می شود که باعث افزایش سختی می شود، ولی در کرنش های برشی پایین این قضیه برعکس است.
- تغییر در ضخامت لایه های لاستیکی با ثابت نگه داشتن ارتفاع کل جداساز و تغییر در تنش فشاری اعمالی به جداساز، تغییر چندانی در رفتار چرخه ای جداساز به وجود نمی آورد.
- در نهایت با توجه به اینکه چه نوع عملکردی از جداساز مورد

توجه است، می‌توان پارامترهای مورد مطالعه را به صورت بهینه به دست آورد. به عنوان مثال، اگر سختی مؤثر کمتر مورد نظر باشد، با زیاد کردن ارتفاع جداساز می‌توان به آن هدف رسید و اگر جابه جایی باقی‌مانده کمتر به عنوان هدف قرار گیرد، می‌توان از طریق افزایش ابعاد و یا افزایش قطر سیم‌های SMA اقدام کرد؛ از بین این دو گزینه، افزایش قطر سیم‌های SMA مؤثرتر است. به عنوان مثال در کرنش برشی ۱۵۰٪ با افزایش قطر سیم‌ها، جابه جایی باقی‌مانده ۹۸٪ کاهش می‌یابد. اگر اتلاف انرژی بیشتر مدنظر باشد به ۴ طریق می‌توان عمل کرد: افزایش ابعاد جداساز یا افزایش شعاع سیم‌های SMA یا افزایش قطر هسته سربی و یا افزایش ارتفاع جداساز. از بین موارد ذکر شده، افزایش شعاع سیم SMA و افزایش قطر هسته بیشترین اثر گذاری را دارا هستند. مثلاً با افزایش شعاع سیم از ۱/۲۵ mm به ۴ mm در کرنش ۱۵۰٪، اتلاف انرژی ۱۳۸٪ افزایش می‌یابد.

۱۴- فهرست علائم

Af	دمای پایانی آستنیت، °c
BI	جداساز لرزه‌ای
SMA	آلیاژ حافظه‌دار
LRB	جداساز لاستیکی هسته سربی
NRB	جداساز لاستیکی طبیعی
RB	جداساز لاستیکی
S-FBI	جداساز اصطکاکی
E_A	مدول کشسانی فاز آستنیت، MPa
v_A	ضریب پواسون آستنیت
E_M	مدول کشسانی فاز مارتنزیت، MPa
v_M	ضریب پواسون مارتنزیت
ε^L	کرنش حاصل از تبدیل فاز
$(\frac{\delta_\sigma}{\delta_T})_L$	نسبت تنش به دما در حالت بارگذاری، MPa/T
σ_L^S	تنش آغاز تبدیل فاز مستقیم، MPa
σ_L^E	تنش پایان تبدیل فاز مستقیم، MPa
T_0	دما، °c
$(\frac{\delta_\sigma}{\delta_T})_U$	نسبت تنش به دما در حالت باربرداری، MPa/T
σ_U^S	تنش آغاز تبدیل فازمعکوس، MPa
σ_U^E	تنش پایان تبدیل فازمعکوس، MPa
σ_{CL}^S	تنش فشاری بحرانی برای آغاز تحول فازی، MPa
ε_V^L	کرنش حجمی ایجاد شده در اثر تبدیل فاز
σ	تنش فشاری، MPa
G	مدول برشی لاستیک، MPa
S	ضریب شکل

مراجع

[1] F. Naeim and J. M. Kelly, *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. John Wiley & Sons, 1999.

[2] W. R. a. L. Greenbank, "n extrusion energy absorber suitable for the protection of structures during an earthquake," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics,* vol. 4, pp. 251-259, 1976.

[3] T. Kelly, "Base Isolation of Structures," *Design guidelines. Auckland: Holmes Consulting Group Ltd,* 2001.

[4] W. H. Robinson, "Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics,* vol. 10, pp. 593-604, 1982.

[5] M. Shinozuka, S. R. Chaudhuri, and S. K. Mishra, "Shape-memory-alloy supplemented lead rubber bearing (SMA-LRB) for seismic isolation," *Probabilistic Engineering Mechanics,* vol. 41, pp. 34-45, 2015.

[6] R. DesRoches and M. Delemont, "Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys," *Engineering Structures,* vol. 24, no. 3, pp. 325-332, 2002.

[7] M. Dolce, D. Cardone, and F. C. Ponzo, "Shaking-table tests on reinforced concrete frames with different isolation systems," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics,* vol. 36, no. 5, pp. 573-596, 2007.

[8] E. Choi, T. Nam, J. Oh, and B. Cho, "An isolation bearing

for highway bridges using shape memory alloys," *Materials Science and Engineering: A,* vol. 438, pp. 1081-1084, 2006.

[9] F. Casciati, L. Faravelli, and K. Hamdaoui, "Performance of a base isolator with shape memory alloy bars," *Earthquake Engineering and Engineering Vibration,* vol. 6, no. 4, pp. 401-408, 2007.

[10] O. E. O. a. S. Hurlebaus, "Performance evaluation of shape memory alloy/rubber-based isolation systems for seismic response mitigation of bridges," *in SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring,* pp. 76473X-76473X-12, 2010.

[11] O. E. O. a. S. Hurlebaus, "Evaluation of the performance of a sliding-type base isolation system with a NiTi shape memory alloy device considering temperature effects," *Engineering Structures,* vol. 32, pp. 238-249, 2010.

[12] O. E. O. a. S. Hurlebaus, "Seismic assessment of bridge structures isolated by a shape memory alloy/rubber-based isolation system," *Smart Materials and Structures,* vol. 20, pp. 15-30, 2010.

[13] F. H. Dezfuli and M. S. Alam, "Shape memory alloy wire-based smart natural rubber bearing," *Smart Materials and Structures,* vol. 22, no. 4, p. 045013, 2013.

[14] F. H. Dezfuli and M. S. Alam, "Hysteresis model of shape memory alloy wire-based laminated rubber bearing under compression and unidirectional shear loadings," *Smart Materials and Structures,* vol. 24, no. 6, p. 065022, 2015.

[15]M. Abe, J. Yoshida, and Y. Fujino, "Multiaxial behaviors of laminated rubber bearings and their modeling. I: experimental study," *Journal of Structural Engineering,* vol. 130, pp. 1119-1132, 2004.

[16] M. J. Asl, M. Rahman, and A. Karbakhsh, "Numerical Analysis of Seismic Elastomeric Isolation Bearing in the Base-Isolated Buildings," *Open Journal of Earthquake Research,* vol. 3, no. 01, p. 1, 2014.

[17] Y. Tanaka, Y. Himuro, R. Kainuma, Y. Sutou, T. Omori, and K. Ishida, "Ferrous polycrystalline shape-memory alloy showing huge superelasticity," *Science,* vol. 327, no. 5972, pp. 1488-1490, 2010.

[18] M. Conti, M. De Beule, P. Mortier, D. Van Loo, P. Verdonck, F. Vermassen, P. Segers, F. Auricchio and B. Verhegghe, "Nitinol embolic protection filters: design investigation by finite element analysis," *Journal of Materials Engineering and Performance,* vol. 18, no. 5-6, pp. 787-792, 2009.

[19] M. Ahmadipour and M. S. Alam, "Sensitivity analysis on mechanical characteristics of lead-core steel-reinforced elastomeric bearings under cyclic loading," *Engineering Structures,* vol. 140, pp. 39-50, 2017.

[20] Office of Deputy for Strategic Supervision, Bureau of Technical Execution System, "Guideline for Design and Practice of Base Isolation Systems in Buildings", 2010.

[21] A. A. o. State and W. Highway and Transportation Officials, DC., "AASHTO Guide Specifications for Seismic Isolation Design, First Edition.," 1991.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Mahmoodi, H. Tajmir Riahi, M.R. Zare, Investigating the Effective Parameters on the Performance of Hybrid Lead Rubber Bearing with Shape Memory Alloy, Amirkabir J. Civil Eng., 52(3) (2020) 581-600.

DOI: 10.22060/ceej.2018.14747.5731

این صفحه عمداً خالی است