

بررسی تأثیر میراگر سوپرالاستیک بر رفتار میراگر زانویی دو طرفه

معین رضاپور^۱ و مهدی قاسمیه^{۲*}

۱- دانش‌آموخته دکتری دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۱۱۵۵-۴۵۶۳، mghassemieh@ut.ac.ir

چکیده

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به‌عنوان مواد نوین، به‌دلیل رفتار ویژه‌ای که دارند، توجه بسیاری از مهندسان را به خود جلب کرده‌اند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این مواد، رفتار فوق‌الاستیک آن‌ها است. این رفتار موجب بازگشت دوباره آلیاژ به فرم اولیه خود پس از تغییر شکل قابل توجه می‌شود. در این نوع رفتار، آلیاژهای حافظه‌دار می‌توانند مقادیر قابل توجهی از انرژی را نیز در حین بازگشت به حالت اولیه خود اتلاف کنند. در این تحقیق، از آلیاژ فوق‌الاستیک نایتینول برای بهبود عملکرد دمپره‌های زانو استفاده شده است. برای این منظور، یک چارچوب با دمپر زانو به‌عنوان مدل مرجع انتخاب و با استفاده از نرم‌افزار عددی آباکوس مدل‌سازی و اعتبارسنجی شد. پس از تأیید رفتار درست مدل عددی، دمپر SMA به‌صورت عمود بر دمپر زانو و در فاصله بین دمپر زانو و اتصال تیر به ستون نصب گردید. در این مقاله، دو پارامتر سطح مقطع و طول دمپر SMA بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش طول SMA موجب افزایش مقاومت سیستم می‌شود. همچنین با افزایش سطح مقطع دمپر SMA، تأثیر طول آن بر مقاومت سیستم بیش‌تر می‌گردد. افزایش سطح مقطع میراگر SMA همچنین به‌طور چشمگیری، خاصیت مرکزگرایی سیستم را افزایش می‌دهد. به‌علاوه، به‌دلیل مرکزگرایی قابل توجه، مقدار اتلاف انرژی سیستم نسبت به مدل مرجع کاهش می‌یابد. میزان اتلاف انرژی وابسته به طول و سطح مقطع دمپر SMA است. به‌طوری‌که طول بیش‌تر SMA به معنای اتلاف انرژی بیش‌تر و سطح مقطع بیش‌تر به معنای اتلاف انرژی کم‌تر در سیستم می‌باشد.

واژگان کلیدی

میراگر زانویی، میراگر فوق‌الاستیک، آلیاژ حافظه‌دار شکلی، اتلاف انرژی

Examining the impact of superelastic dampers on the behavior of double-sided knee braces

M. Rezapour, M. Ghassemieh

Abstract

Shape Memory Alloys (SMAs) as novel materials have attracted significant attention from engineers due to their unique behavior. One of the most important characteristics of these materials is their superelastic behavior, which allows them to return to their original shape after considerable deformation. In this type of behavior, shape memory alloys can also dissipate significant amounts of energy while returning to their initial state. In this research, superelastic Nitinol alloy is used to enhance the performance of knee dampers. To this end, a frame with knee dampers was selected as the reference model and was modeled and validated using the numerical software Abaqus. After confirming the correct behavior of the numerical model, the SMA damper was installed perpendicularly to the knee damper and in the space between the knee damper and the connection of the beam to the column. This paper examines two parameters: the cross-section and the length of the SMA damper. The results indicate that increasing the length of the SMA increases the system's resistance, and the impact of the SMA length on the system resistance becomes more pronounced with an increase in the cross-section of the SMA damper. Additionally, the increase in the cross-section of the SMA damper significantly enhances the system's recovery. Furthermore, due to the considerable recovery that the SMA damper provides in the structure, the amount of energy dissipation in the system is reduced compared to the reference model. The amount of energy dissipation is dependent on the length and cross-section of the SMA damper, such that a longer SMA leads to greater energy dissipation and a smaller cross-section results in less energy dissipation in the system.

Keywords

Knee Damper, Superelastic Damper, Shape Memory Alloy, Energy Dissipation

۱- مقدمه

به دلیل اجتناب ناپذیری زلزله‌ها و خسارت‌های فراوان جانی و مالی ناشی از آن‌ها، یافتن راه‌حلی مناسب برای مهار این پدیده طبیعی ضروری است. استفاده از مصالح با کیفیت بالا، مانند میلگرد و تیرآهن، تأثیرگذار است، اما به تنهایی کافی نیست. از آنجایی که جلوگیری از وقوع زلزله ممکن نیست، ایمن‌سازی ساختمان‌های موجود در برابر این پدیده طبیعی امری اجتناب ناپذیر است. بنابراین، ضرورت دارد که روش‌های متنوعی برای بهسازی ساختمان‌ها با توجه به شرایط موجود ارائه شود.

وظیفه اصلی یک سازه به‌طور کلی، تحمل بارهای مؤثر بر آن و انتقال این بارها به پی سازه است. انرژی وارد شده به سازه باید از طریق یک مکانیزم مناسب به زمین منتقل شود یا مستهلک گردد. مهندسان راهکارهای متعددی برای بهسازی رفتار سازه معرفی کرده‌اند، اما در میان این راهکارها، میراگرها از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. اتلاف انرژی در یک سازه معمولاً در محدوده رفتار غیرخطی آن حاصل می‌شود و اساس رفتار یک میراگر نیز مبتنی بر این پدیده است.

در بین انواع میراگرها، میراگر زانویی وجود دارد که با استفاده از تغییر شکل پلاستیک، انرژی را مستهلک می‌کند. این المان به یک بادبند متصل است و این بادبند در طول بارگذاری الاستیک باقی می‌ماند. عمده تغییر شکل‌های غیرخطی و آسیب‌های وارد بر سازه، در ناحیه زانویی متمرکز می‌شود. از این‌رو، بهبود رفتار این میراگر بسیار حائز اهمیت است.

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی^۱، انواعی از مواد هوشمند هستند که می‌توانند شکل اولیه خود را پس از تغییر شکل به‌دست آورند، به شرط این که دما به مقدار خاصی برسد [۱]. این آلیاژها معمولاً از ترکیب دو یا چند فلز، مانند نیکل و تیتانیوم، تشکیل شده‌اند. در اثر تغییرات دما، این مواد می‌توانند بین دو فاز مختلف برای تغییر شکل و عملکرد در کاربردهای متنوع، از جمله تجهیزات پزشکی (مانند استنت‌ها)، موتورها و سیستم‌های خودکار، جابه‌جا شوند. به عنوان مثال، در دماهای پایین‌تر، آلیاژ ممکن است فرم قابل انعطاف‌تری داشته باشد، درحالی‌که با افزایش دما و انتقال به فاز جدید، به شکل ثابت و محکم خود بازمی‌گردد. این ویژگی‌ها آلیاژهای حافظه‌دار شکلی را به گزینه‌های جذابی برای کاربردهای مهندسی و علمی تبدیل کرده است.

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) به‌طور گسترده در میراگرها به‌کار می‌روند تا انرژی لرزه‌ای را در سازه‌ها به‌طور مؤثری مستهلک نمایند. این مواد می‌توانند با تغییر دما به شکل اولیه خود بازگردند و در نتیجه در میراگرهای فعال، به‌ویژه در مواجهه با بارهای دینامیکی نظیر زلزله، عمل کنند. با توانایی کاهش خسارت‌ها و مقاومت در برابر ارتعاشات مکرر، میراگرهای مبتنی بر آلیاژهای حافظه‌دار به افزایش استحکام و عمر سازه‌ها کمک می‌کنند و می‌توانند به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر در بهسازی لرزه‌ای به کار گرفته شوند.

به دلیل این مزایا، این مواد توجه محققان را برای کاربرد در سازه‌های مهندسی عمران جلب کرده‌اند. بنابراین، مطالعات زیادی با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی برای بهبود رفتار غیرخطی سازه‌ها انجام شده است. آندراوز^۲ و دسرچس^۳ پتانسیل کاربرد یک ماده فوق‌کشسان را در پل‌های بتن مسلح چنددهانه‌ای بررسی کردند و قابلیت SMA را به‌عنوان یک مهارکننده برای پل‌ها نشان دادند [۲]. آن‌ها همچنین اثرات دما بر عملکرد مهارکننده‌های SMA را مطالعه کردند [۳ و ۴].

ژانگ^۴ و همکاران در پژوهشی توسعه و ارزیابی عملکرد یک سیستم جداکننده چندمرحله‌ای از نوع یاتاقان‌های لغزشی صاف با کنترل‌کننده‌های SMA را بررسی کردند. این سیستم برای کاهش تغییر شکل و جلوگیری از آسیب‌های ناشی از هم‌ضربه‌ای در زمان زلزله‌های شدید طراحی شد [۵].

چن^۵ و همکاران در پژوهشی یک نوع جدید از دمپر مرکزگرا را ارائه دادند که از میله‌های آلیاژ حافظه‌دار به همراه مکانیزم اصطکاک متغیر برای رفتار هیستریزس تنظیم‌پذیر و افزایش شکل‌پذیری استفاده می‌شود. این دمپر جدید به‌طور قابل توجهی قابلیت شکل‌پذیری و توانایی جذب انرژی را نسبت به دستگاه‌های مرکزگرای موجود با اعضای SMA تحت کشش افزایش می‌دهد [۶].

کیو^۶ و همکاران نوع جدیدی از دمپر مرکزگرا را پیشنهاد کردند که از پیچ‌های آلیاژ حافظه‌دار و مکانیزم سایش متغیر بهره می‌برد. در این تحقیق، رفتار چرخه‌ای این دمپر آزمایش شده و داده‌های تجربی با روش‌های تحلیلی و مدل‌سازی اجزای محدود اعتبارسنجی شده است. نتایج نشان می‌دهد که دمپر مورد نظر

^۲ Andrawes^۳ DesRoches^۴ Zhang^۵ Chen^۶ Qiu^۱ Shape Memory Alloys (SMAs)

دارای ظرفیت مرکزگرای عالی و ظرفیت جذب ارتعاش مناسب است [۷].

میرزایی و همکاران یک میراگر فوق‌کشسان جدید پیشنهاد کردند و از میراگر پیشنهادی در قاب EBF استفاده کردند. آن‌ها از تحلیل تاریخچه زمانی برای بررسی عملکرد SMA در سازه استفاده نمودند [۸-۱۰].

آریان و قاسمیه از این ماده در یک پل چندده‌ان‌های استفاده کردند و یک سیستم فوق‌کشسان نوآورانه برای بهسازی پیشنهاد نمودند. آن‌ها همچنین یک روش طراحی پل جدید را پیشنهاد کردند که می‌تواند به‌طور همزمان اثرات تحریکات لرزه‌ای عمودی و افقی را کاهش دهد [۱۱-۱۳].

عمار عباس و همکاران رویکرد جدیدی برای بازسازی پل‌های طراحی‌شده قبلی استفاده کردند. آن‌ها پل را به سه ناحیه تقسیم نموده و از SMA نصب‌شده نزدیک به سطح در ناحیه‌ای که احتمال تغییرشکل پلاستیک بیش‌تر بود، استفاده کردند [۱۴].

فرمانی و قاسمیه نشان دادند که مواد SMA می‌توانند به‌عنوان بولت‌ها و تاندون‌ها در اتصالات فولادی مورد استفاده قرار گیرند. در مطالعات عددی آن‌ها، میزان تغییرشکل‌های دائمی پس از باربرداری کاهش یافته و تقریباً به صفر رسید [۱۵ و ۱۶].

قاسمیه و همکاران اثربخشی این مواد را بر روی دیوارهای برشی بتن ارزیابی کردند. مطالعات آن‌ها شامل چندین دیوار برشی جامد و متصل بود تا نشان دهد که SMA می‌تواند آسیب به بتن در دیوارها، به‌ویژه در تیرک‌های متصل را کاهش دهد [۱۷ و ۱۸].

قاسمیه و قوامی به‌منظور بررسی عملکرد مهارهای ساخته‌شده از SMA از تحلیل بار افزون، تاریخچه زمانی و تحلیل دینامیکی فزاینده استفاده کردند [۱۹]. نتایج تحلیل‌های لرزه‌ای نشان داد که کاربرد مهارهای SMA عملکرد سازه را بهبود بخشیده و ظرفیت مرکزگرایی بالایی ایجاد می‌کند؛ به‌گونه‌ای که به شکل قابل‌توجهی جابه‌جایی ماندگار سازه را کاهش می‌دهد.

صادقی و حسامی یک تحلیل المان محدود ارائه کردند که در آن SMA به‌عنوان میله‌های دوال در رویه‌های بتنی مفصلی استفاده شد و از خاصیت مقاومت خستگی SMA بهره بردند [۲۰].

علام^۱ و همکاران آسیب‌پذیری لرزه‌ای یک پل بزرگراهی پیوسته چنددهانه‌ای را با استفاده از بلبرینگ‌های لاستیکی و مهارکننده SMA ارزیابی نمودند [۲۱-۲۴].

دزفولی و همکاران از سیم‌های فوق‌کشسان SMA در سیستم ایزولاسیون پایه پل برای بهبود رفتار لرزه‌ای سازه استفاده کردند.

آن‌ها نشان دادند که SMA می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی عملکرد لرزه‌ای پایه‌ها را با کاهش برش پایه بهبود بخشد [۲۵].

در این پژوهش، تأثیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر بهبود رفتار میراگر زانوئی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور، یک سیستم زانوئی تجربی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی و اعتبارسنجی می‌شود و آلیاژهای SMA با طول‌های متفاوت در آن جایگذاری می‌گردند. سیستم‌های پیشنهادی تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار می‌گیرند و رفتار آن‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شود.

۲- آلیاژ حافظه‌دار شکلی

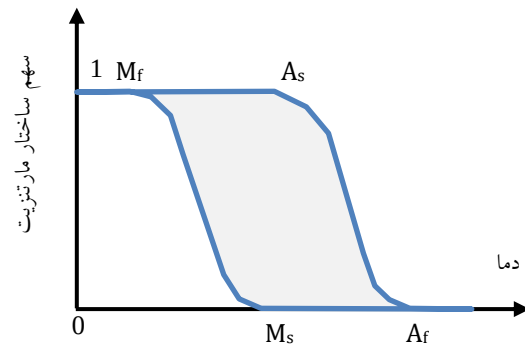
آلیاژهای حافظه‌دار شکلی برای نخستین بار در اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی کشف شدند. این آلیاژها به‌دلیل توانایی آن‌ها در بازگشت به فرم اولیه خود پس از تغییرشکل و حرارت‌دهی، توجه بسیاری را جلب کردند. یکی از مشهورترین آلیاژهای حافظه‌دار، آلیاژ نیکل-تیتانیوم (NiTi) است که به‌عنوان "نایتینول" نیز شناخته می‌شود. از آن زمان، SMA در بسیاری از کاربردها از جمله مهندسی عمران، پزشکی و الکترونیک به‌کار گرفته شده و تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بهبود خواص و کاربردهای آن انجام شده است [۲۶]. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی معمولاً از یک یا چند عنصر اصلی تشکیل می‌شوند که در آن‌ها انتقال فاز قابل‌توجهی در دماهای مختلف رخ می‌دهد. در دماهای پایین، ساختار کریستالی این آلیاژها به‌صورت مارتنزیت^۲ است که ویژگی‌های انعطاف‌پذیری و شکل‌پذیری بالاتری دارد. با افزایش دما، آلیاژ به فاز آستنیت^۳ منتقل می‌شود که ساختاری سخت‌تر و مقاوم‌تر دارد. این تغییرات ساختاری ناشی از جابه‌جایی اتم‌ها در شبکه بلوری است و باعث می‌شود که آلیاژ حافظه‌دار بتواند پس از تغییرشکل به فرم اولیه خود بازگردد [۲۷].

حالت آستنیت در دماهای زیاد و تنش‌های پایین پایدار است در صورتی‌که حالت مارتنزیت در دماهای پایین و تنش‌های بالا پایدار است [۲۸]. با اعمال بارگذاری‌های حرارتی و مکانیکی این دو فاز می‌توانند به یکدیگر تبدیل شوند. در حالت کلی این ساختارها برای تبدیل به یکدیگر به چهار دمای مشخصه نیاز دارند. مطابق شکل (۱) دماهای مشخصه M_s ، A_s ، M_f و A_f می‌باشند که به‌ترتیب دمای آغاز حالت آستنیت، دمای پایان حالت آستنیت، دمای آغاز حالت مارتنزیت و دمای پایان حالت مارتنزیت هستند [۲۹].

^۲ Martensite

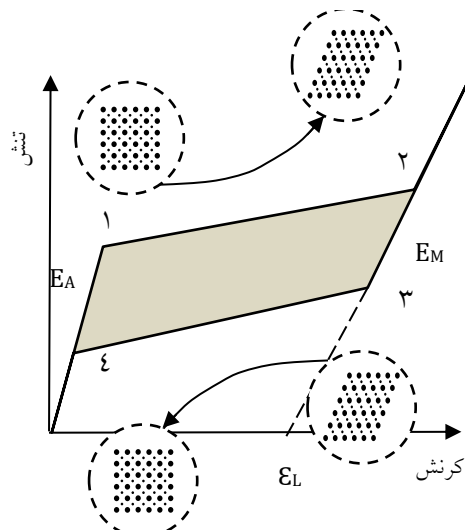
^۳ Austenite

^۱ Alam



شکل ۱- نسبت مارتنزیت در برابر دما در آلیاژ حافظه‌دار شکلی

رفتار سوپرالاستیک زمانی بر آلیاژ حافظه‌دار شکلی حاکم می‌شود که دمای آلیاژ در تنش صفر بالاتر از حد A_f باشد. در این حالت ساختار اتمی آن آستنیت می‌باشد که مسئول ایجاد رفتار سوپرالاستیک است. شکل (۲) نمودار تنش- کرنش این رفتار را نشان می‌دهد و بر طبق آن هیچ تغییر شکل ماندگاری در آلیاژ باقی نمی‌ماند. این پدیده به سبب ساختار اتمی آستنیت رخ می‌دهد زیرا که این ساختار همواره تمایل دارد به شکل اولیه خود بازگردد. در طی فرآیند بارگذاری و باربرداری ساختار اتمی پیوسته در حال تغییر است. این تغییرات به علت عدم پایداری ساختارهای اتمی در دماها و تنش‌های مختلف می‌باشد [۳۰]. در فاز رفتاری سوپرالاستیک به علت آن که ساختار اتمی آستنیت در تنش‌های بالا ناپایدار است، پس از اعمال مقداری تنش ساختار آلیاژ ناپایدار شده و می‌بایست تبدیل به ساختاری شود که در تنش‌های بالا پایدار باشد. از این رو ساختار اتمی آستنیت در تنش بالا تبدیل به مارتنزیت شده که در طول این تبدیل سختی کاهش می‌یابد (نقطه ۱). پس از اتمام تغییر ساختار، تمام آلیاژ دارای ساختار مارتنزیت شده و سختی آلیاژ افزایش می‌یابد (نقطه ۲). در هنگام باربرداری میزان تنش در SMA کاهش می‌یابد و از آنجا که ساختار اتمی مارتنزیت در تنش‌های پایین ناپایدار است، آلیاژ نیاز به تغییر ساختار اتمی دارد (نقطه ۳). در این هنگام ساختار اتمی آلیاژ به حالت آستنیت تغییر وضعیت می‌دهد (نقطه ۴). به همین علت در فاز رفتار سوپرالاستیک تغییر شکل ماندگاری وجود ندارد و میزان اتلاف انرژی آن نسبت به سایر حالات رفتاری پایین‌تر است [۳۱].



شکل ۲- نمودار رفتار تنش-کرنش سوپرالاستیک [۱۸]

۳- میراگر زانویی

میراگر زانویی در مهاربند به عنوان یک تقویت‌کننده ساختاری عمل می‌کند که به افزایش استحکام و پایداری سازه‌های فلزی کمک می‌نماید. این عنصر معمولاً در نقاطی از سازه که بارهای جانبی و کششی بالایی وجود دارد، قرار داده می‌شود و به جلوگیری از تغییر شکل و شکست در این مناطق می‌پردازد.

مهم‌ترین مزایای میراگر زانویی شامل کاهش تغییر شکل‌ها در اثر بارهای زلزله و باد و همچنین بهبود رفتار دینامیکی سازه است. با اعمال نیروهای اضافی و توزیع بارها، این میراگرها به کارکرد بهتر و ایمن‌تر سازه کمک می‌کنند [۳۲].

سیستم مهاربندی زانویی به عنوان یک سیستم سازه‌ای جدید توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است. هسو^۱ و همکاران به طور تجربی عملکرد سیستم مهاربندی زانویی را با استفاده از بارگذاری چرخه‌ای ارزیابی کردند [۳۳].

مفید و همکاران تحقیقات متعددی در مورد رفتار غیرخطی سیستم KBF انجام دادند تا به طور تقریبی آن رفتار را پیش‌بینی کنند [۳۴-۳۶].

آنیلو^۲ و همکاران تأثیر استفاده از مهاربندهای زانویی مختلف را برای بهبود پاسخ سازه‌ای یک قاب از طریق تحلیل دینامیکی غیرخطی مطالعه کردند [۳۷].

به منظور رفع مشکلات سیستم مهاربندی معمولی، اوچوا^۳ سیستم جدیدی به نام قاب مهاربندی زانویی تعویض‌پذیر معرفی کرد [۳۸]. در این سیستم انتهای مهاربند به جای اتصال به محل تلاقی تیر و ستون، به المان زانویی متصل می‌شود و سختی سازه

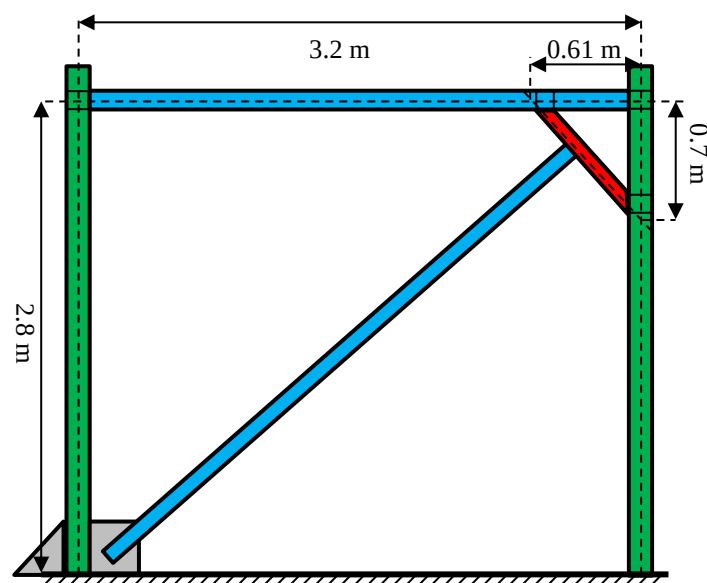
¹ Hsu

² Aniello

³ Ochoa

۴- سیستم مورد مطالعه

بلندرا و همکاران آزمایش‌های متعددی در مقیاس واقعی بر روی سیستم قاب مهاربندی زانویی انجام دادند [۳۹]. این آزمایش‌ها شامل شرایط مختلفی از جمله حالات تسلیم زانویی در خمش یا برش، نوع اتصال مهاربندهای قطری به اعضای زانویی و مقاطع مختلف زانویی به‌کاررفته در قاب بودند. آن‌ها مدل زانویی با رفتار خمشی را تحت آزمایش‌های شبه‌دینامیکی قرار دادند تا پاسخ غیرخطی این قاب مورد بررسی قرار گیرد. در شکل (۳)، مدل آزمایش‌شده توسط بلندرا و همکاران نمایش داده شده است.



شکل ۳- قاب خمشی مجهز به میراگر زانویی طراحی‌شده توسط بلندرا

جدول ۱- مقاطع در قاب مجهز به میراگر زانویی

نام المان	مقطع
تیر	WF125 × 125 × 23.8 kg/m
ستون	WF 100 × 100 × 17.2 kg/m
مهاربند	C-channels 100 × 50 × 5
زانویی	SHS 60 × 60 × 4.5 mm

تمام عناصر سازه، به‌جز قسمت زانو، از فولاد با مقاومت تسلیم ۳۵۰ مگاپاسکال ساخته شده‌اند. فولاد استفاده‌شده در دمپر زانو دارای مقاومت تسلیم ۴۱۷ مگاپاسکال است. مدول کشسانی فولاد ۱۹۰ گیگاپاسکال و نسبت پواسون آن ۰/۳ است. استفاده از فولاد با مقاومت‌های تسلیم متفاوت در بخش‌های مختلف سازه

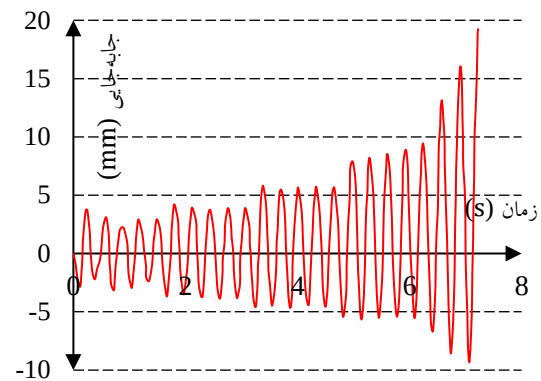
توسط مهاربند قطری و شکل‌پذیری و اتلاف انرژی آن به‌وسیله المان زانویی فراهم می‌شود. در این سیستم کماتش در مهاربند سبب کاهش توان اتلاف انرژی می‌شود. بدین منظور مهاربند به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که دچار کماتش نشود. از این‌رو، بلندرا^۱ سیستمی به نام قاب مهاربندی زانویی ارائه کرد. در سیستم جدید ارائه‌شده توسط بلندرا، مهاربند قطری کماتش نمی‌کند و از طرفی سختی جانبی قاب را تأمین می‌نماید. المان زانویی به‌وسیله تسلیم خمشی، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی را فراهم می‌نماید. هنگام دریافت‌های بزرگ، المان زانویی ابتدا تسلیم می‌شود و رفتار مهاربند، خطی باقی می‌ماند [۳۹].

آن‌ها مقاطع تیر و ستون را به‌گونه‌ای انتخاب کردند که در محدوده بارگذاری تقریباً الاستیک باقی بمانند. ابعاد بادبند نیز به‌طور دقیق طراحی شد تا نه تنها در طول بارگذاری الاستیک عمل کند، بلکه از کماتش نیز جلوگیری نماید. در محل اتصالات تیر به ستون، سخت‌کننده‌هایی با ضخامت ۲۰ میلی‌متر نصب شده‌اند تا از کماتش جانبی ستون جلوگیری شود. همچنین در محل اتصال زانویی به تیر و ستون نیز از سخت‌کننده‌های با ضخامت مشابه استفاده شده است که به تیر و ستون جوش داده شده‌اند. به‌علاوه، برای تسهیل تعویض زانویی، از صفحاتی با ضخامت ۱۵ میلی‌متر برای اتصال زانویی به تیر و ستون استفاده شده است. در جدول (۱) مقاطع به‌کاررفته در سیستم مذکور ارائه شده است.

¹ Balendra

نشان‌دهنده توجه به استحکام و پاسخ‌گویی مناسب سازه به بارهای زلزله است.

در مطالعه بالندرا، بار تحریکی سینوسی به‌منظور شبیه‌سازی نیروهای زلزله اعمال شد. فرکانس تحریکی ۲۰ رادیان بر ثانیه بود. دامنه اولیه تحریکی ۲/۲۵ متر بر مجذور ثانیه بود و بعد از هر پنج دوره، این مقدار ۰/۷۹ متر بر مجذور ثانیه افزایش می‌یابد (شکل ۴)).



شکل ۴- بارگذاری اعمال‌شده توسط بالندرا [۳۹]

بار سینوسی اعمال‌شده در مطالعه بالندرا برای شبیه‌سازی نیروهای زلزله امری رایج در تحقیقاتی است که به دنبال ارزیابی رفتار سازه‌ها تحت بارهای دینامیکی هستند. فرکانس و دامنه تحریکی، تعیین‌کننده شدت و نوع پاسخ سازه در برابر زلزله هستند. افزایش تدریجی دامنه تحریکی (۰/۷۹ متر بر مجذور ثانیه بعد از هر پنج دوره) نشان‌دهنده این است که آزمایش به‌گونه‌ای طراحی شده تا بتواند پاسخ سازه را در برابر بارهای فزاینده ارزیابی کند و به این ترتیب، نقاط ضعف یا قوت سازه را شناسایی نماید.

۵- مدل‌سازی عددی

روش اجزای محدود (FEM) یک تکنیک عددی برای تحلیل و حل مسائل مهندسی و فیزیکی است که به‌ویژه در حوزه‌هایی مانند مکانیک، دینامیک و تحلیل حرارتی کاربرد دارد. این روش با تقسیم یک ساختار پیچیده به اجزای کوچک‌تر و ساده‌تر (اجزا)، اجازه می‌دهد تا رفتار سیستم تحت بارگذاری‌ها و شرایط مختلف با استفاده از معادلات دیفرانسیل و قوانین فیزیکی مطالعه شود. در مدل‌سازی اجزای این سیستم، از دو نوع المان سالید^۱ و شل^۲ استفاده شده است.

^۱ Solid
^۲ Shell

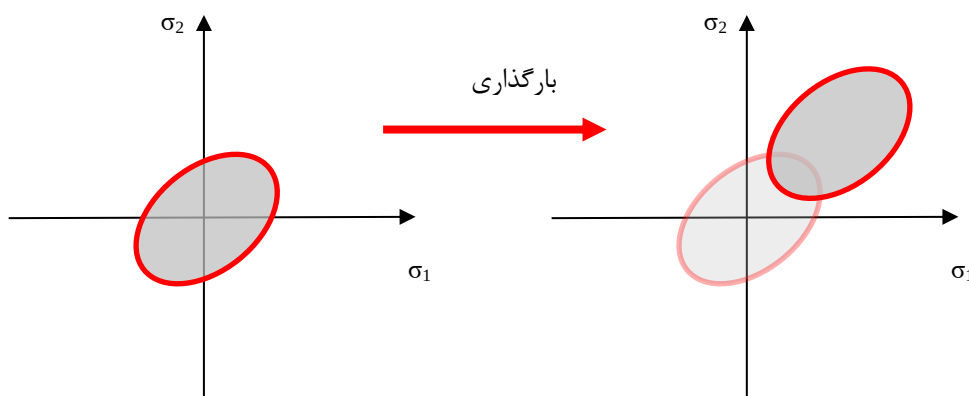
المان سالید هشت‌گه‌ای با انتگرال کاهش‌یافته، یک المان سه‌بعدی است که از هشت گره تشکیل شده و هر گره دارای سه درجه آزادی است. این المان برای شبیه‌سازی رفتار مواد در مسائل پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد و با استفاده از انتگرال‌گیری کاهش‌یافته، تعداد نقاط محاسباتی را کاهش می‌دهد تا به افزایش کارایی و کاهش زمان حل مسئله کمک نماید.

المان شل نوعی المان در روش اجزای محدود است که برای مدل‌سازی ساختارهای سطحی مانند دیواره‌ها، صفحات و پوسته‌ها استفاده می‌شود. این المان معمولاً از چهار یا تعداد بیش‌تری گره تشکیل شده است و می‌تواند رفتار دوبعدی را در سه‌بعدی توصیف کند، با فرض این که ضخامت آن نسبت به سایر ابعاد بسیار کوچک‌تر است. المان‌های شل به‌دلیل ساده‌سازی محاسبات و کاهش زمان پردازش، در تحلیل رفتار سازه‌ها تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی، تغییرشکل‌ها و تنش‌ها به‌کار می‌روند. این المان‌ها می‌توانند به‌خوبی رفتارهای خمشی و کششی را در انواع مختلف سازه‌ها شبیه‌سازی نمایند. تمامی اجزای سازه به‌جز زانویی مورد بررسی، با استفاده از المان‌های شل مدل‌سازی شده‌اند. زانویی لینک برای تحلیل دقیق‌تر تنش‌ها، کرنش‌ها و رفتار پلاستیک آن، با استفاده از المان‌های سالید که دارای دقت بیش‌تری در محاسبات نسبت به المان‌های شل هستند، شبیه‌سازی شده است.

در این مقاله رفتار تنش-کرنش مصالح فولاد به‌صورت دوطبقی که شامل ناحیه ارتجاعی و ناحیه پس از تسلیم است و به‌دلیل بارگذاری چرخه‌ای حاکم بر سیستم، از رفتار کینماتیک^۳ که در این نوع بارگذاری مناسب‌تر است، استفاده شده است. در این روش، مساحت مرز تسلیم تغییر نمی‌کند و تنها مختصات مرکز سطح آن جابه‌جا می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود که مدل ما قادر به پیش‌بینی رفتار فولاد در شرایط بارگذاری غیرخطی و پلاستیک باشد.

در شکل (۵) سطح تسلیم فون‌میزس^۴ به تصویر کشیده شده است. با شروع بارگذاری، مکان این سطح تغییر می‌کند درحالی‌که ابعاد آن حفظ می‌شود. این تغییر مکان سطح تسلیم، درواقع نشان‌دهنده تغییرات داخلی ماده در حین بارگذاری و بازگشت به حالت اولیه بعد از باربرداری است. این موضوع اهمیت خاصی در طراحی سازه‌های مقاوم و با دوام دارد، به‌ویژه در سازه‌هایی که تحت بارهای دینامیکی یا بارهای غیرمترقبه قرار دارند.

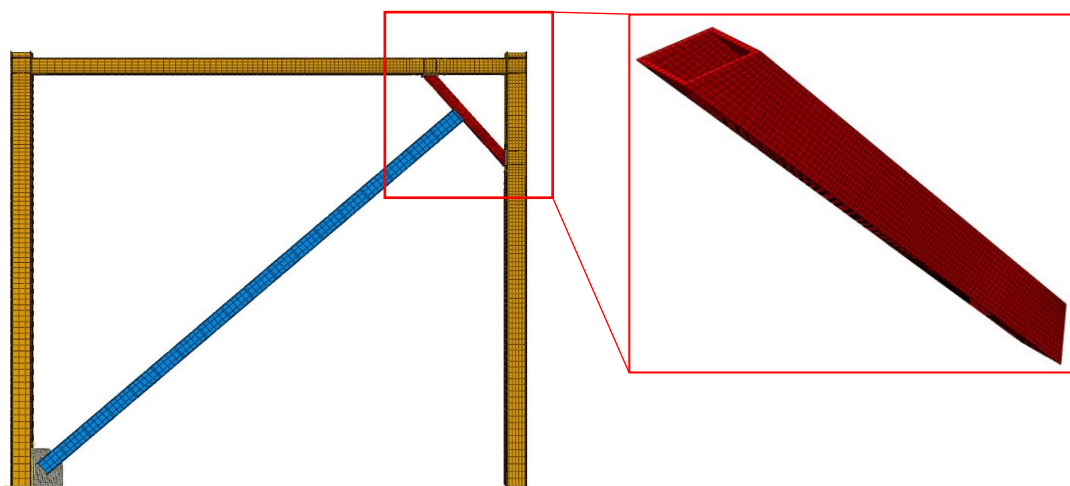
^۳ Kinematic
^۴ Von mises



شکل ۵- معیار تسلیم فونمیزس در کینماتیک

تعریف شده است، به گونه‌ای که حرکت نسبی گره‌های المان‌ها در سه جهت انتقالی محدود شده است. در قاب مورد مطالعه ابعاد مش در نواحی دور از محل اتصالات قاب به زانویی که تنش قابل توجه و رفتار پلاستیک در آن‌ها شکل نمی‌گیرد، حدود ۴۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با نزدیک شدن به محل اتصالات زانویی ابعاد مش‌بندی به حدود ۲۵ میلی‌متر کاهش پیدا می‌کند؛ مش‌بندی لینک زانویی از ۸ الی ۱۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل (۶) نحوه مش‌بندی قاب و زانویی نشان داده شده است.

تعریف اندرکنش بین تمامی اجزای در تماس با یکدیگر، یکی از جنبه‌های کلیدی در مدل‌سازی به‌شمار می‌آید. برای تعیین این تعامل در قاب مورد مطالعه، با توجه به ترکیب المان‌های سالید و شل، و این که المان‌های سالید تنها دارای درجات آزادی انتقالی و المان‌های شل علاوه بر درجات آزادی انتقالی، دارای درجات آزادی دورانی نیز هستند، کلیه اجزا به‌جز زانویی لینک به‌صورت یکپارچه مدل‌سازی شده است. در این مدل، تعامل در سطوح تماس زانویی لینک با تیر، ستون و مهاربند به‌صورت نوع تای^۱

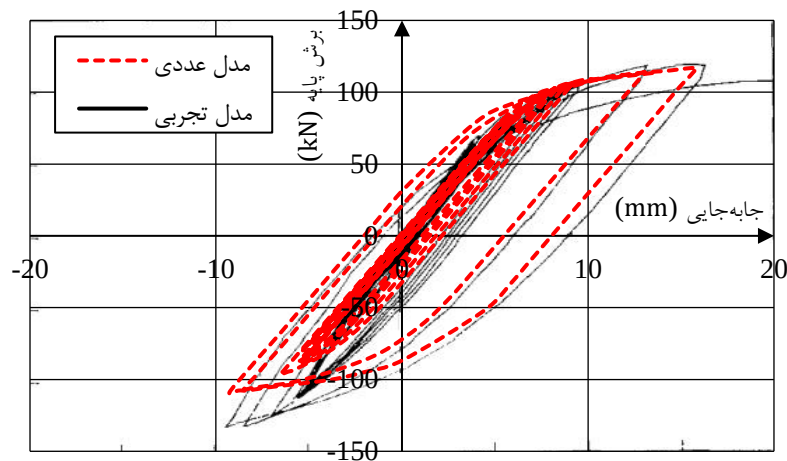


شکل ۶- نحوه شبکه‌بندی قاب مدل‌سازی شده

مقایسه نتایج آباکوس و تست آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این مدل عددی دارای دقت مناسبی است.

به‌منظور اعمال شرایط مرزی، پایین ستون‌ها، ثابت در نظر گرفته شده است و بارگذاری چرخه‌ای به بالای سازه اعمال شده است. در شکل (۷) نتایج مدل عددی و تجزیه ارائه شده است.

¹ Tie



شکل ۷- مقایسه نتایج به دست آمده از مدل سازی در آباکوس و تست آزمایشگاهی

۶- مدل سازی رفتار سوپرالاستیک در آلیاژهای

حافظه دار شکلی

برای مدل سازی رفتار سوپرالاستیک آلیاژهای SMA، از فرضیات موجود در نرم افزار آباکوس بهره برداری شده است. این فرضیات قابلیت توصیف رفتار سوپرالاستیک را دارا بوده و برای آلیاژهایی همچون نایتینول مناسب هستند. در این مدل، ساختارهای آستنیت و مارتنزیت به صورت ایزوتروپیک در نظر گرفته می شوند. بر اساس میزان کرنش وارد شده به آلیاژ و تغییر ساختارهای اتمی، سختی و نسبت پواسون آلیاژ محاسبه می گردد.

$$E = E_A + \xi(E_M - E_A) \quad (1)$$

$$\nu = \nu_A + \xi(\nu_M - \nu_A) \quad (2)$$

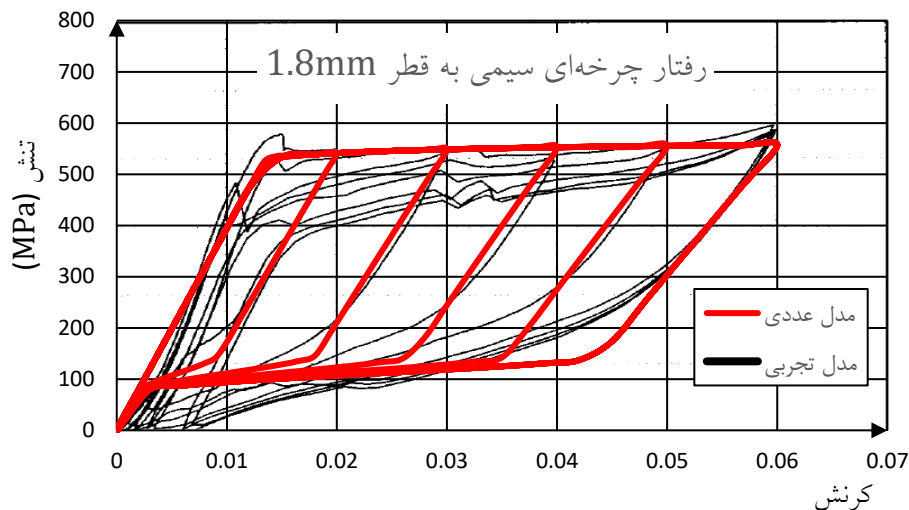
که در آن ξ نسبت مارتنزیت است و (E_A) و (E_M) به ترتیب مدول یانگ آستنیت و مارتنزیت می باشند. (ν_A) و (ν_M) نیز

به ترتیب نسبت پواسون آستنیت و مارتنزیت هستند. پس از اعمال یک تنش مشخص، آستنیت به طور کامل به مارتنزیت تبدیل می شود. در روابط مذکور ξ مابین ۰ و ۱ است. اگر ساختار آلیاژ کاملاً آستنیت باشد، میزان آن برابر با صفر است و اگر ساختار آلیاژ کاملاً مارتنزیت باشد، میزان این رقم ۱ است.

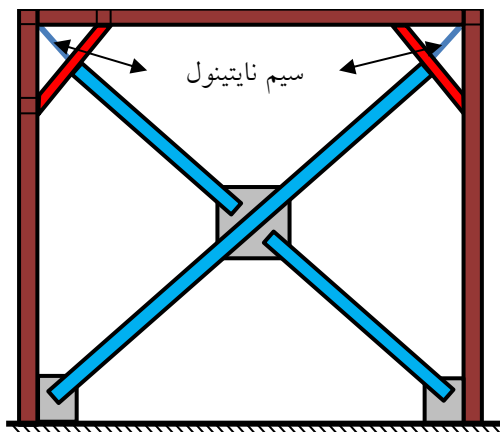
در این مطالعه، از سیم های نایتینول برای بررسی تأثیر دمپر سوپرالاستیک بر دمپرهای زانو استفاده شده است. این سیم با قطر ۱/۸ میلی متر و طول ۱۵ سانتی متر تحت بارگذاری سیکلیک قرار گرفته است. مشخصات مکانیکی آلیاژ نایتینول در جدول (۲) ارائه شده است. برای شبیه سازی سیم SMA از یک عنصر تیر دوگره ای استفاده شده است. شکل (۸) پاسخ سیم حافظه دار شکلی را تحت بارگذاری چرخه ای نشان می دهد. بر اساس این شکل مدل ارائه شده رفتار قابل قبولی نسبت به مدل تجربی دارد.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه دار شکلی در فاز رفتاری سوپرالاستیک [۴۰]

مدول	دمای آغاز	تنش آغاز	تنش پایان	تنش آغاز	تنش پایان
آستنیت (GPa)	آستنیت (°C)	مارتنزیت (MPa)	مارتنزیت (MPa)	آستنیت (MPa)	آستنیت (MPa)
۴۰	-۲۶	۵۳۹	۵۷۴	۱۰۴	۶۹



شکل ۸- راستی آزمایی سیم سوپرالاستیک نایتینول

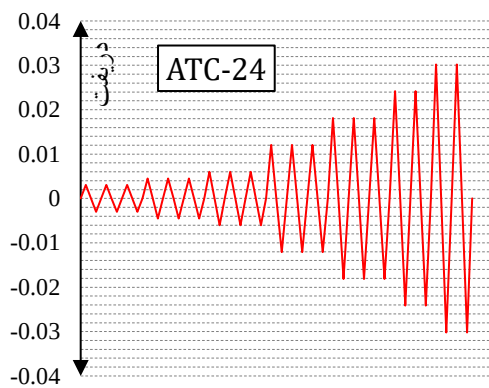


شکل ۹- مدل میراگر زانویی مجهز به سیم‌های سوپرالاستیک نایتینول

۷- مدل‌های عددی

در این مقاله به منظور بررسی اثر SMA بر روی سیستم KBF محل قرارگیری سیم SMA عمود بر زانویی در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۹) سیم SMA مابین میراگر زانویی و نقطه اتصال تیر به ستون قرار می‌گیرد. در محل مذکور بیش‌ترین تغییر شکل رخ می‌دهد و از آنجا که میراگر SMA برای اتلاف انرژی نیاز به تغییر مکان دارد، این محل به عنوان مکان تعبیه SMA در نظر گرفته شد. هر چه تغییر شکل اعمالی بر SMA بیش‌تر باشد، اثر آن بر رفتار سازه نیز بیش‌تر است. از آنجا که میراگر SMA به صورت سیم در نظر گرفته شده است و این سیم‌ها در برابر فشار دچار کماتش می‌شوند، در مدل‌سازی رفتار SMA در فشار تعریف نشده است. به منظور آن که در بارگذاری چرخه‌ای در هر دو جهت مثبت و منفی اثر SMA در نظر گرفته شود، از دو سیستم KBF مطابق شکل به صورت ضربدری استفاده شد. در این سیستم اگر سیم SMA در یک طرف دچار کماتش شود، سیم SMA در جهت دیگر تحت کشش قرار می‌گیرد و کماتش SMA جبران می‌شود.

در این پژوهش میزان طول و تعداد سیم‌های SMA (سختی) به عنوان دو پارامتر اصلی بررسی می‌شوند. در مدل‌های مجهز به SMA میزان ابعاد زانویی کوچک‌تر از مدل اصلی (مدل بدون SMA) است. این ابعاد به گونه‌ای انتخاب شده است که سختی مدل‌های عددی تقریباً با یکدیگر برابر باشند. در جدول (۳) مشخصات مدل‌های عددی مورد مطالعه ارائه شده است. در نام‌گذاری، مدل KBF بدون SMA است و رقم عدد بعد از آن طول سیم‌های SMA بر حسب سانتی‌متر می‌باشد. عدد انتهایی در نام‌گذاری بیانگر تعداد سیم‌های SMA در سختی مدل را بیان می‌کند. هر چه این عدد بزرگ‌تر باشد، سیم‌های SMA سهم بیش‌تری در سختی کلی میراگر دارند.



شکل ۱۰- پروتکل بارگذاری در ATC-24

در شکل‌های (۱۱) الی (۱۳)، نمودار هیستریسیس برای مدل‌های مجهز به میراگرهای SMA با طول‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر در کنار مدل بدون میراگر سوپرالاستیک ارائه شده است. این نمودارها نمایانگر تأثیرات مختلفی هستند که طول و سطح مقطع SMA بر پارامترهای کلیدی مانند مقاومت تسلیم، تغییرشکل ماندگار، توان اتلاف انرژی و دیگر ویژگی‌ها دارند. به‌طور خاص، در این پژوهش این پارامترها به‌صورت جداگانه بررسی شدند و همچنین میزان تأثیر SMA در هر یک از مدل‌ها در مقایسه با مدل KBF ارائه شد.

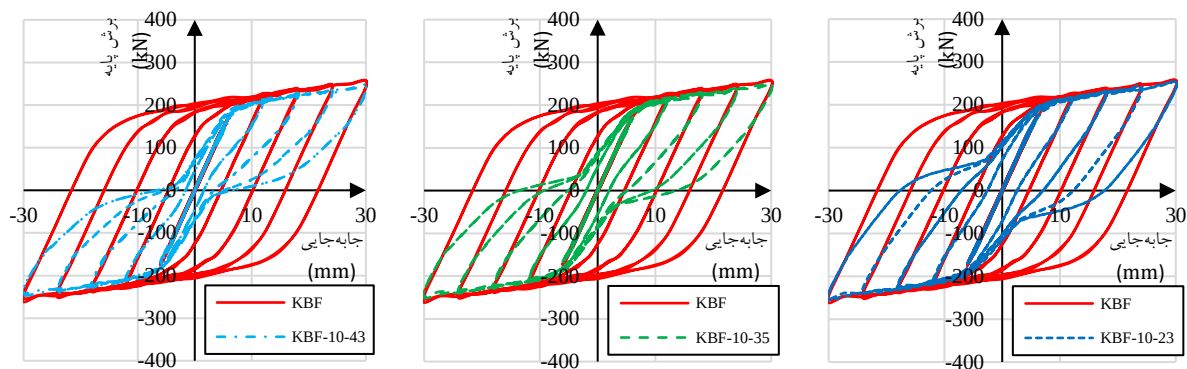
بنا به شکل‌های مورد اشاره، مشاهده می‌شود که میراگرهای سوپرالاستیک به ایجاد مرکزگرایی در سازه کمک می‌کنند. باین‌حال، شدت این مرکزگرایی در هر یک از مدل‌ها متفاوت است و این میزان تحت تأثیر عواملی همچون طول و سختی SMA قرار دارد. بر اساس نمودارهای مذکور در هیچ یک از مدل‌ها، تغییرشکل ماندگار به صفر نرسیده و به‌عبارت دیگر، مرکزگرایی کاملی در آن‌ها ایجاد نشده است.

مرکزگرایی کامل در یک سازه مجهز به SMA زمانی امکان‌پذیر است که تمامی تغییرشکل‌های غیرخطی سازه در اجزای SMA واقع گردد و سایر اجزا در محدوده تغییرات خطی باقی بمانند. اما بر اساس مشاهدات انجام‌شده در مدل‌های عددی مورد مطالعه، بخش بزرگی از تغییرشکل‌های غیرخطی در نواحی زانویی رخ داده است. با توجه به این شرایط، می‌توان نتیجه گرفت که مرکزگرایی در سیستم به‌طور کامل تحقق نیافته و این مسأله نیازمند بررسی‌های بیش‌تری برای بهینه‌سازی طراحی سازه‌های مجهز به میراگرهای SMA است.

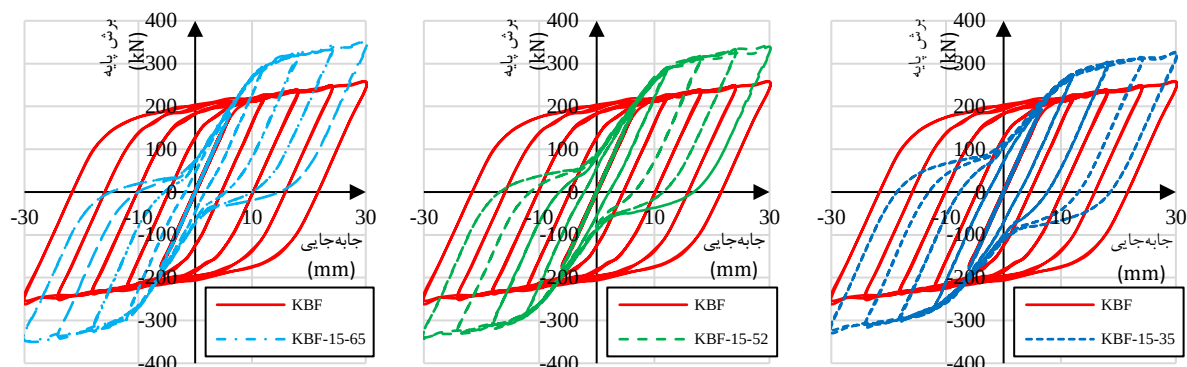
جدول ۳- مدل‌ها و مشخصات میراگر در آن

نام مدل	مقطع زانویی (mm)	تعداد سیم‌ها	طول مؤثر سیم (cm)
KBF	۶۰×۶۰×۴.۵	۰	...
KBF-10-23	۵۵×۵۵×۳.۵	۲×۲۳	۱۰
KBF-10-35	۵۰×۵۰×۳.۰	۲×۳۵	۱۰
KBF-10-43	۵۰×۵۰×۲.۵	۲×۴۳	۱۰
KBF-15-35	۵۵×۵۵×۳.۵	۲×۳۵	۱۵
KBF-15-52	۵۰×۵۰×۳.۰	۲×۵۲	۱۵
KBF-15-65	۵۰×۵۰×۲.۵	۲×۶۵	۱۵
KBF-20-44	۵۵×۵۵×۳.۵	۲×۴۴	۲۰
KBF-20-65	۵۰×۵۰×۳.۰	۲×۶۵	۲۰
KBF-20-79	۵۰×۵۰×۲.۵	۲×۷۹	۲۰

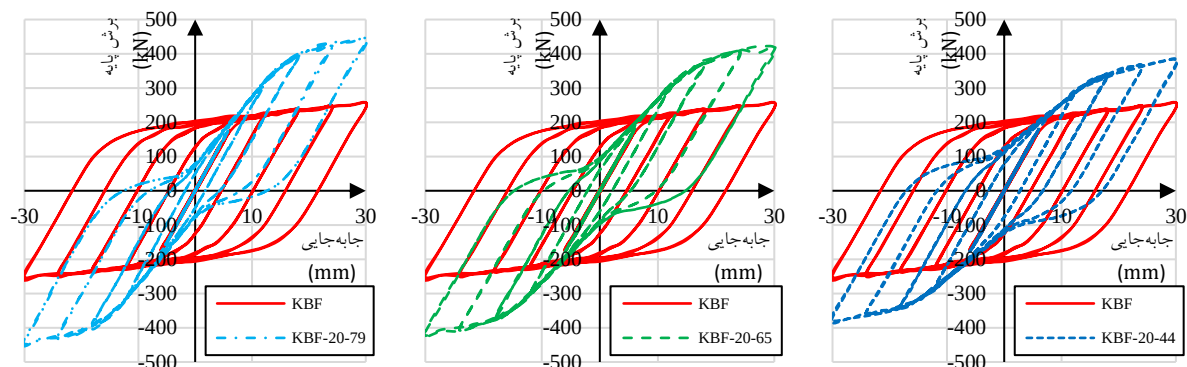
از آنجا که در بارگذاری ارائه‌شده در مدل **بلندرا**، تغییرشکل بزرگ به‌صورت قابل‌توجهی به سازه اعمال نمی‌شود، برای بررسی بهتر رفتار غیرخطی مدل‌های عددی، از پروتکل بارگذاری ATC-24 مطابق با شکل (۱۰) استفاده شد. این پروتکل یکی از اولین استانداردهای رسمی است که در ایالات متحده برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای عناصر سازه‌های فولادی با تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای توسعه یافته است. پروتکل ATC-24 به دقت طراحی شده است تا ویژگی‌های کلیدی رفتار سازه‌ها را تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای نشان دهد [۴۱]. این پروتکل شامل هفت حد برای دررفت است که در آن پنج دررفت اول سه بار و دو دررفت آخر دو بار تکرار می‌شود. این رویکرد تکرار شده به تحلیل دقیق‌تر پاسخ سازه کمک می‌کند و تأثیر بارگذاری‌های چرخه‌ای را به‌طور کامل مورد بررسی قرار می‌دهد. علاوه بر این، معمولاً در دررفت‌های بزرگ با تعداد تکرار کم‌تر، آسیب قابل‌توجهی به سازه وارد می‌شود. این ویژگی از آن جهت حائز اهمیت است که ممکن است در بارگذاری‌های مکرر، آسیب‌پذیری سازه‌های فولادی به‌دلیل تنش‌های تجمعی افزایش یابد. بنابراین، استفاده از پروتکل ATC-24 به محققین و مهندسان کمک می‌کند تا رفتار دینامیکی سازه‌های فولادی را در شرایط مختلف بارگذاری مورد تحلیل قرار دهند و به نتایج بهتری در زمینه طراحی و ارزیابی لرزه‌ای دست یابند [۴۲].



شکل ۱۱- سیستم های زانویی مجهز به میراگر سوپرالاستیک ۱۰ سانتی متری



شکل ۱۲- سیستم های زانویی مجهز به میراگر سوپرالاستیک ۱۵ سانتی متری



شکل ۱۳- سیستم های زانویی مجهز به میراگر سوپرالاستیک ۲۰ سانتی متری

۸- نقطه تسلیم

مقاومت و تغییر مکان تسلیم، از جمله مهم ترین پارامترهایی هستند که به طور مستقیم بر رفتار سازه تأثیر می گذارند. این دو پارامتر به طول و سختی آلیاژهای هوشمند (SMA) وابسته اند. ابعاد زانویی و سطح مقطع SMA به گونه ای طراحی شده اند که سختی در تمامی مدل ها تقریباً مساوی باشد و این سختی در سیم های SMA و زانویی نیز به شکل تقریباً موازی قرار می گیرد.

هرچه طول SMA افزایش یابد، تغییر مکان تسلیم آن نیز به طور طبیعی افزایش می یابد. از این رو، با توجه به این که سیم های SMA

و زانویی در راستای یکدیگر قرار دارند، افزایشی در طول SMA منجر به افزایش مقدار تغییر مکان تسلیم سیستم (زانویی در کنار SMA) خواهد شد. از طرفی، با توجه به این که سختی مدل ها برابر است، این افزایش در تغییر مکان تسلیم به موازات آن موجب افزایش مقاومت سازه نیز می گردد.

در مدل هایی که طول SMA برابر با ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است، مشاهده می شود که مقاومت جانبی بیش تری نسبت به مدل های کوتاه تر وجود دارد. بر اساس نمودارهای هیسترسیس، مدل های مجهز به SMA با طول ۱۰ سانتی متر کم ترین تغییر مکان تسلیم و در نتیجه پایین ترین مقاومت را از خود نشان می دهند؛

درحالی که مدل‌های با طول ۲۰ سانتی‌متر، این مقادیر را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهند.

افزایش سهم SMA در سختی می‌تواند به‌طور محسوسی موجب افزایش مقاومت و تغییر مکان تسلیم شود، به‌خصوص در مدل‌هایی که به SMAهای ۲۰ سانتی‌متر مجهز هستند. در این مدل‌ها، اثرات مثبت افزایش طول SMA بیش‌تر نمایان می‌شود و در مدل KBF-20-79 بیش‌ترین میزان مقاومت و تغییر مکان تسلیم ثبت شده است.

با وجود آن که در مدل‌های مجهز به SMAهای ۱۰ سانتی‌متری، تأثیر افزایش سختی بر تغییر شکل ماندگار به‌وضوح مشهود بود، اما در این مدل‌ها اثر افزایش سختی بر مقاومت تسلیم نسبتاً ناچیز است. در مقابل، در مدل‌های با SMAهای ۲۰ سانتی‌متری، هرچند تأثیر افزایش سختی SMA بر تغییر شکل ماندگار به میزان قابل‌توجهی کم‌تر است، اما تأثیر آن بر مقاومت تسلیم بسیار قابل‌توجه و بااهمیت خواهد بود. این رفتار می‌تواند به طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های مقاوم‌تر و ایمن‌تر کمک شایانی نماید. بنابراین انتخاب و طراحی مناسب طول و سختی SMAها تأثیر مستقیمی بر عملکرد سازه‌ها دارد و توجه به این پارامترها می‌تواند به افزایش کارایی و ایمنی در مهندسی سازه کمک کند.

۹- توانایی یک سازه در مرکزگرایی و تغییر شکل ماندگار

توانایی یک سازه در حفظ مرکزگرایی به میزان تغییر شکل ماندگار آن بستگی دارد. به عبارت دیگر، هر چه تغییر شکل ماندگار یک سیستم کم‌تر باشد، نمودار هیسترسیس آن بیش‌تر به شکل پرچم نزدیک می‌شود، که نشان‌دهنده عملکرد بهینه‌تری در مواجهه با بارها و نیروهای مختلف است. در مدل‌های عددی مورد بررسی، تغییر شکل ماندگار متفاوت است و به پارامترهای طول و سختی آلیاژهای هوشمند (SMA) وابسته است.

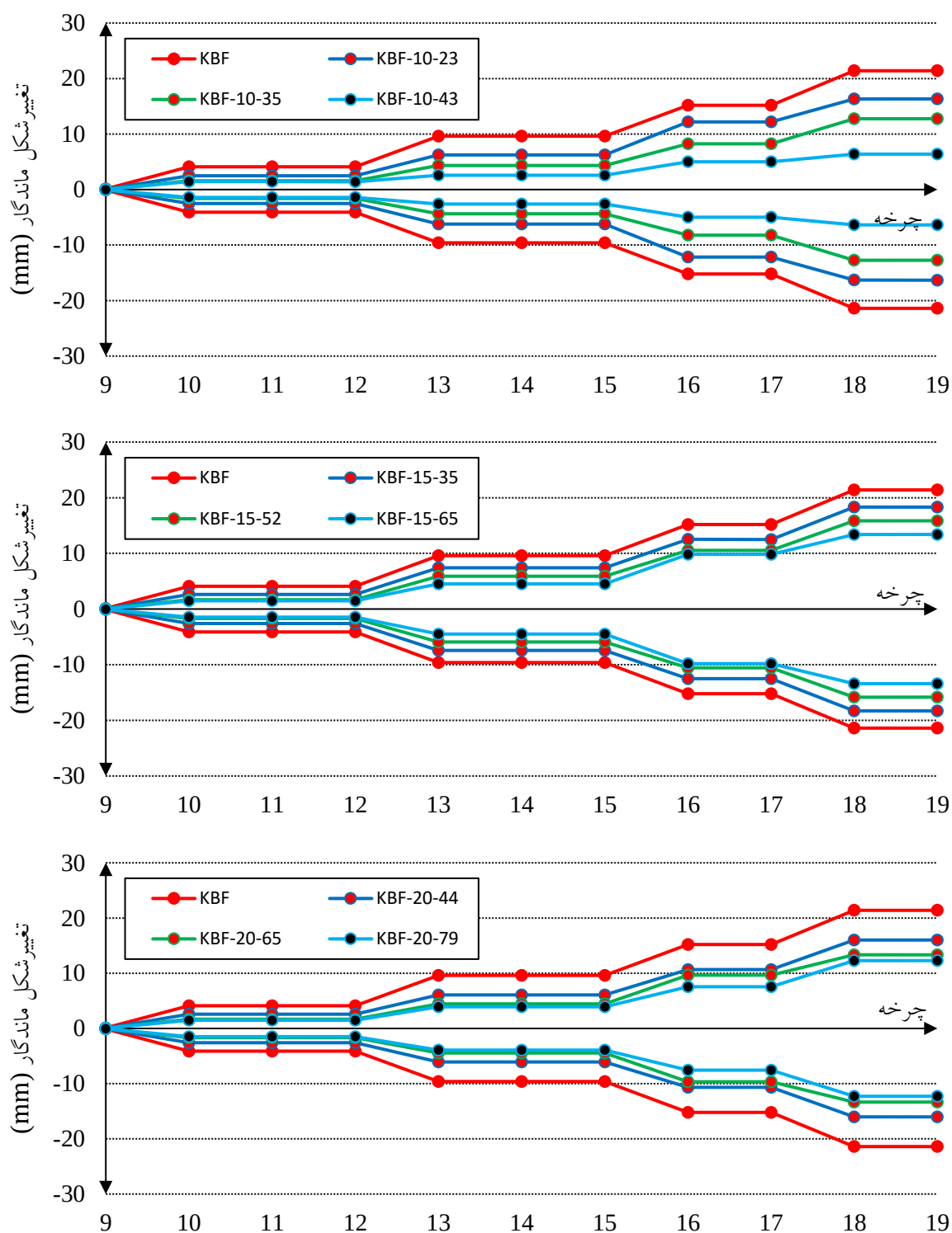
نمودارهای هیسترسیس نشان می‌دهند که میزان مرکزگرایی در مدل‌هایی که دارای SMA با طول ۱۰ سانتی‌متر هستند، از سایر

مدل‌ها بیش‌تر است. در شکل (۱۳)، تغییر شکل ماندگار سازه‌های مورد مطالعه به تصویر کشیده شده است. در این نمودار، اعداد منفی و مثبت به ترتیب نشان‌دهنده تغییر شکل ماندگار در جهت منفی و مثبت بارگذاری هستند. بر اساس این شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش سختی SMA، تغییر شکل ماندگار کاهش می‌یابد.

علاوه بر این، تغییر شکل ماندگار رابطه مستقیمی با طول SMA دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش طول SMA، میزان تغییر شکل ماندگار نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در مدل KBF-10-43، کم‌ترین تغییر شکل ماندگار مشاهده می‌شود. با توجه به شکل (۱۴)، افزایش سختی در تمامی مدل‌ها به کاهش تغییر شکل ماندگار منجر می‌شود؛ با این حال، میزان این کاهش در مدل‌های مختلف، متفاوت است.

در مدل‌های مجهز به SMA با طول ۲۰ سانتی‌متر، تأثیر افزایش سختی بر کاهش تغییر شکل ماندگار مشاهده می‌شود که نسبتاً ناچیز است. در مقابل، در مدل‌های دارای SMA با طول ۱۰ سانتی‌متر، افزایش سختی تأثیر قابل‌توجهی بر تغییر شکل ماندگار دارد. به‌طور کلی، این امر به این معنا است که هرچه طول SMA کوتاه‌تر باشد، تأثیر سختی بر کاهش تغییر شکل ماندگار بیش‌تر می‌شود.

این تحلیل نشان می‌دهد که انتخاب ابعاد صحیح SMA و توجه به سختی آن‌ها، نقش کلیدی در رفتار سازه‌ها ایفا می‌نماید. در انتها، بهینه‌سازی این پارامترها می‌تواند بهبود چشمگیری در عملکرد سازه‌ها به‌ویژه در برابر بارگذاری‌های دینامیک و نیروهای بزرگ به همراه داشته باشد. به این ترتیب، سازه‌ها قادر خواهند بود به‌صورت مؤثرتری به تغییرات هندسی پاسخ دهند و به حفظ استحکام و پایداری خود در شرایط مختلف کمک کنند.



شکل ۱۴- تغییر شکل ماندگار در چرخه‌های بزرگ بارگذاری برای مدل‌های عددی

۱۰- اتلاف انرژی

در میراگرها، اتلاف انرژی به نوع میراگر بستگی دارد و از طریق دو مکانیزم اصلی شامل سرعت و تغییر شکل به وقوع می‌پیوندد. برای میراگرهای ویسکوز، اتلاف انرژی به سرعت وابسته است، درحالی‌که در میراگرهای معمولی، این اتلاف انرژی به تغییر شکل

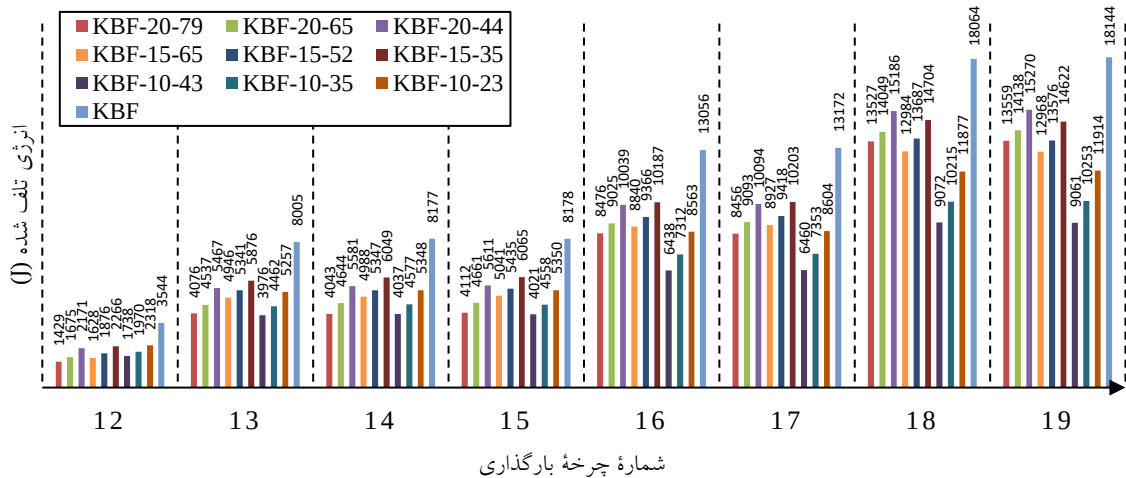
غیرخطی بستگی دارد. میراگرهای پیشنهادشده در این مقاله از دسته دوم هستند و برای اتلاف انرژی به تغییر شکل‌های غیرخطی نیاز دارند.

گراف‌های هیسترسیس میراگرهای مورد مطالعه، که در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) ارائه شده است، بر مبنای تغییر مکان

مطابق شکل (۱۵)، تأثیر تغییرشکل مرکزگرا از افزایش مقاومت بیش‌تر است، زیرا در تمامی مدل‌ها توان اتلاف انرژی نسبت به مدل مرجع KBF کم‌تر می‌باشد؛ اما میزان تفاوت آن با مدل مرجع در مدل‌های مختلف، متفاوت است.

در مدل‌های تجهیز شده به SMA طول ۲۰ سانتی‌متر، به علت افزایش مقاومت و کاهش مرکزگرایی، میزان اتلاف انرژی به مدل مرجع نزدیک‌تر می‌شود. با افزایش طول میراگر SMA، توان اتلاف انرژی نیز افزایش می‌یابد، زیرا افزایش طول SMA موجب افزایش مقاومت جانبی سیستم می‌گردد.

به عنوان مثال، میزان اتلاف انرژی برای مدل‌های KBF-20-44، KBF-15-35 و KBF-10-23 در چرخه نوزدهم به ترتیب برابر با ۱۵۲۷۰، ۱۴۶۲۲ و ۱۱۹۱۴ ژول است. افزایش سختی میراگر SMA اثر معکوسی بر توان اتلاف انرژی دارد، به این ترتیب که با افزایش سختی، میزان مرکزگرایی زیاد شده و توان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه، میزان توان اتلاف انرژی در چرخه نوزدهم برای مدل‌های KBF-20-44، KBF-20-65 و KBF-20-79 به ترتیب برابر با ۱۵۲۷۰، ۱۴۱۳۸ و ۱۳۵۵۹ ژول است.



شکل ۱۵- میزان اتلاف انرژی مدل‌های عددی در هر چرخه بارگذاری

بارگذاری در هر دو جهت، برخی از سیم‌های SMA تحت کشش قرار گیرند و سایرین دچار کماتش شوند. سختی مبدل SMA و ابعاد زانویی به گونه‌ای انتخاب شده است که سختی مدل‌ها تقریباً برابر باشد.

تعداد ۹ مدل تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند و تأثیر دو پارامتر طول و سختی مبدل SMA بر روی تغییرشکل ماندگار، مقاومت تسلیم و توان اتلاف انرژی بررسی شد. در این بخش، خلاصه‌ای از نتایج قابل توجه ارائه می‌شود.

۱۱- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مقاله بررسی تأثیر مبدل‌های سوپرالاستیک (SMA) بر سیستم‌های زانویی است. برای این منظور، یک مدل آزمایشگاهی انتخاب و با مدل‌سازی عددی صحت‌سنجی شد. مبدل‌های SMA به عنوان مبدل‌های سوپرالاستیک در نظر گرفته شده‌اند که تنها در حالت کشش قابلیت باربری دارند. در این مدل، دو سیستم زانویی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند تا از طریق

مدل‌ها، با افزایش مقاومت، توان اتلاف انرژی در سازه افزایش می‌یابد. بنابراین، مبدل SMA از یک طرف به‌واسطه کاهش تغییرشکل ماندگار، توان اتلاف انرژی را کم می‌کند و از سوی دیگر در اثر افزایش مقاومت، توان اتلاف انرژی را افزایش می‌دهد.

مرکزگرایی مهم‌ترین تأثیری است که مبدل‌های SMA با رفتار سوپرالاستیک بر سازه می‌گذارند. به این صورت که هر چه تغییرشکل ماندگار سیستم کم‌تر باشد، نمودار هیسترسیس بیش‌تر به شکل پرچم نزدیک می‌شود. در مدل‌های عددی مورد مطالعه، میزان تغییرشکل ماندگار متفاوت بوده و به طول و سختی مبدل SMA وابسته است. با توجه به نمودارهای هیسترسیس، می‌توان مشاهده کرد که میزان مرکزگرایی در مدل‌هایی که طول SMA آن‌ها ۱۰ سانتی‌متر است، از بقیه مدل‌ها بیش‌تر است. همچنین با افزایش سختی SMA، میزان تغییرشکل ماندگار کاهش می‌یابد.

تغییرشکل ماندگار رابطه مستقیمی با طول SMA دارد؛ به بیان دیگر، هرچه طول SMA بیش‌تر باشد، میزان تغییرشکل ماندگار نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در مدل‌های مجهز به SMA با طول ۱۰ سانتی‌متر، حداقل تغییرشکل ماندگار مشاهده می‌شود. در مدل‌های با SMA به طول ۲۰ سانتی‌متر، مشاهده می‌شود که افزایش سختی تأثیر کمی بر روی کاهش تغییرشکل ماندگار دارد.

مقاومت و تغییرمکان تسلیم ازجمله مهم‌ترین پارامترهایی هستند که بر رفتار سازه تأثیر قابل‌توجهی دارند. این دو پارامتر به طول و سختی مبدل SMA وابسته‌اند. طبق نتایج به‌دست آمده، در مدل‌هایی که طول SMA آن‌ها ۲۰ سانتی‌متر است، مقاومت جانبی بیش‌تری مشاهده می‌شود، درحالی‌که مدل‌های مجهز به SMA با طول ۱۰ سانتی‌متر دارای کم‌ترین تغییرمکان تسلیم و مقاومت هستند. افزایش سهم SMA در سختی، می‌تواند موجب افزایش محسوسی در مقاومت و تغییرمکان تسلیم شود؛ البته این افزایش در مدل‌های ۲۰ سانتی‌متری بیش‌تر نمایان است.

با وجود این، در مدل‌های تجهیزشده به SMA با طول ۱۰ سانتی‌متر، تأثیر افزایش سختی بر روی تغییرشکل ماندگار قابل‌مشاهده بود، اما این افزایش سختی تأثیر ناچیزی بر روی مقاومت تسلیم مدل دارد. بنابراین، طول استفاده‌شده از SMA بر اساس رابطه‌ای مستقیم با افزایش مقاومت سازه عمل می‌کند. توان اتلاف انرژی می‌تواند از طریق محاسبه مساحت داخل هر چرخه بارگذاری تعیین گردد. در چرخه‌های ابتدایی، رفتار سازه تقریباً خطی است و از این‌رو، میزان اتلاف انرژی در این چرخه‌های کوچک برابر با صفر است. این توان با مقاومت جانبی و تغییرشکل ماندگار رابطه مستقیم دارد؛ به‌طوری‌که در مدل‌هایی که تغییرشکل ماندگار و مقاومت بیش‌تری مشاهده می‌شود، توان اتلاف انرژی نیز بیش‌تر خواهد بود.

بر اساس نمودارهای هیسترسیس، مبدل‌های SMA تغییرشکل ماندگار سازه را کاهش داده و این موضوع منجر به کاهش توان اتلاف انرژی در سازه می‌شود. از سوی دیگر در برخی

- [14] Abbass, A., Attarnejad, R., and Ghassemieh, M. (2020), "Seismic Assessment of RC Bridge Columns Retrofitted with Near-Surface Mounted Shape Memory Alloy Technique", *Materials*, 13(7), p.1701.
- [15] Farmani, M.A., and Ghassemieh, M. (2016), "Shape memory alloy-based moment connections with superior self-centering properties", *Smart Materials and Structures*, 25(7), p.075028.
- [16] Farmani, M.A., and Ghassemieh, M. (2017), "Steel beam-to-column connections equipped with SMA tendons and energy dissipating devices including shear tabs or web hourglass pins", *Journal of Constructional Steel Research*, 135, pp.30-48.
- [17] Ghassemieh, M., Mostafazadeh, M., and Sadeh, M.S. (2012), "Seismic control of concrete shear wall using shape memory alloys", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(5), pp.535-543.
- [18] Ghassemieh, M., Rezapour, M., and Sadeghi, V. (2017), "Effectiveness of the shape memory alloy reinforcement in concrete coupled shear walls", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(5), pp.640-652.
- [۱۹] قاسمیه، م.، قوامی، ا.ر. (۱۴۰۱)، "بررسی عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای واگرا با تیر پیوند قائم و مجهز به میل مهار ساخته شده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد. ۱۶ (۳۵).
- [20] Hesami, S., and Sadeghi, V. (2015), "Numerical investigation of the shape memory alloy dowels in jointed concrete pavements", *International Journal of Pavement Research and Technology*, 8(4), pp.251-258.
- [21] Alam, M.S., Bhuiyan, M.R., and Billah, A.M. (2012), "Seismic fragility assessment of SMA-bar restrained multi-span continuous highway bridge isolated by different laminated rubber bearings in medium to strong seismic risk zones", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(6), pp.1885-1909.
- [22] Billah, A.M., Alam, M.S., and Bhuiyan, M.R. (2012), "Fragility analysis of retrofitted multicolumn bridge bent subjected to near-fault and far-field ground motion", *Journal of Bridge Engineering*, 18(10), pp.992-1004.
- [23] Bhuiyan, M.R., and Alam, M.S. (2012), "Seismic vulnerability assessment of a multi-span continuous highway bridge fitted with shape memory alloy bars and laminated rubber bearings", *Earthquake Spectra*, 28(4), pp.1379-1404.
- [24] Dezfuli, F.H., and Alam, M.S. (2016), "Seismic vulnerability assessment of a steel-girder highway bridge equipped with different SMA wire-based smart elastomeric isolators", *Smart Materials and Structures*, 25(7), p.075039.
- [25] Li, S., Dezfuli, F.H., Wang, J.-Q., and Alam, M.S. (2018), "Displacement-based seismic design of steel, FRP, and SMA cable restrainers for isolated simply supported bridges", *Journal of Bridge Engineering*, 23(6), p.04018032.
- [1] Lagoudas, D., and Khan, M. (2008), "Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications", Springer.
- [2] Andrawes, B., and DesRoches, R. (2005), "Unseating prevention for multiple frame bridges using superelastic devices", *Smart Materials and Structures*, 14(3), p.S60.
- [3] Andrawes, B., and DesRoches, R. (2007), "Effect of ambient temperature on the hinge opening in bridges with shape memory alloy seismic restrainers", *Engineering Structures*, 29(9), pp.2294-2301.
- [4] Lafortune, P., McCormick, J., DesRoches, R., and Terriault, P. (2007), "Testing of superelastic recentering pre-strained braces for seismic resistant design", *Journal of Earthquake Engineering*, 11(3), pp.383-399.
- [5] Yu, T., Zhang, C., Huang, Z., and Yuan, W. (2024), "Development and performance evaluation of multi-stage SMA damper-restrained flat sliding bearings for deformation mitigation", *Journal of Building Engineering*, 98, p.111233.
- [6] Chen, J., Wang, W., and Fang, C. (2022), "Manufacturing, testing and simulation of novel SMA-based variable friction dampers with enhanced deformability", *Journal of Building Engineering*, 45, p.103513.
- [7] Qiu, C., Liu, J., and Du, X. (2022), "Cyclic behavior of SMA slip friction damper", *Engineering Structures*, 250, p.113407.
- [8] Mirzai, N., and Attarnejad, R. (2020), "Seismic performance of EBFs equipped with an innovative shape memory alloy damper", *Scientia Iranica*, 27(5), pp.2316-2325.
- [9] Mirzai, N.M., Attarnejad, R., and Hu, J.W. (2018), "Enhancing the seismic performance of EBFs with vertical shear link using a new self-centering damper", *International Journal*, 35(4), pp.57-75.
- [10] Mirzai, N.M., Attarnejad, R., and Hu, J.W. (2019), "Analytical investigation of the behavior of a new smart recentering shear damper under cyclic loading", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 30(12), pp.1045389X19888786.
- [11] Aryan, H., and Ghassemieh, M. (2014), "Mitigation of vertical and horizontal seismic excitations on bridges utilizing shape memory alloy system", *Advanced Materials Research*, 831, pp.90-94.
- [12] Aryan, H., and Ghassemieh, M. (2015), "Seismic enhancement of multi-span continuous bridges subjected to three-directional excitations", *Smart Materials and Structures*, 24(4), p.045030.
- [13] Aryan, H., and Ghassemieh, M., (2017), "A superelastic protective technique for mitigating the effects of vertical and horizontal seismic excitations on highway bridges", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(12), pp.1533-1552.

- [41] Krawinkler, H. (1992), "ATC-24 Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures", Redwood City: Applied Technology Council.
- [42] Ghassemieh, M., Rezapour, M., and Taghinia, A. (2017), "Predicting low cycle fatigue life through simulation of crack in cover plate welded beam to column connections", *Journal of Computational Applied Mechanics*, 48(1), pp.39-52.
- [۲۶] م. قاسمیه، و م. رضاپور. (۱۳۹۶)، "کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در مهندسی سازه"، انتشارات جهاد دانشگاهی تهران.
- [27] Andrawes, B. (2024), "Shape Memory Alloys in Civil Engineering", Springer.
- [۲۸] ن. فنایی، و س.م. سیدان. (۱۳۹۸)، "آلیاژهای حافظه‌دار شکلی از تئوری تا کاربرد"، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- [29] Shrestha, K.C., Jha, S., and Araki, Y. (2024), "Shape-memory alloys and their application to civil infrastructure", in *Sustainable Materials in Civil Infrastructure*, Elsevier, pp.215-233.
- [30] Tajalli, F., and Golafshar, A. (2017), "Evaluation of Steel Frames Equipped with Buckling Restrained Braces (BRB) with Steel Core and Shape Memory Alloy (SMA) core", *Journal of Structure and Steel Research*, 11(22), pp.39-49.
- [31] Mohammadgholipour, A., and Billah, A.M. (2023), "Mechanical properties and constitutive models of shape memory alloy for structural engineering: A review", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 34(20), pp.2335-2359.
- [32] Ghafourinejad, A., and Alirezaee, M. (2024), "Seismic performance of the knee bracing frame with friction damper and its comparison with the knee frame system", *Journal of Structure and Steel Research*, 18(43), pp.76-92.
- [33] Hsu, H., Juang, J., and Chou, C. (2011), "Experimental evaluation on the seismic performance of steel knee braced frame structures with energy dissipation mechanism", *Steel and Composite Structures*, 11(1), pp.77-91.
- [34] Mofid, M., and Khosravi, P. (2000), "Non-linear analysis of disposable knee bracing", *Computers and Structures*, 75(1), pp.65-72.
- [35] Lotfollahi, M., and Mofid, M. (2006), "On the design of new ductile knee bracing", *Journal of Constructional Steel Research*, 62(3), pp.282-294.
- [36] Mofid, M., and Lotfollahi, M. (2006), "On the characteristics of new ductile knee bracing systems", *Journal of Constructional Steel Research*, 62(3), pp.271-281.
- [37] Aniello, G., Landolfo, R., and Güneyisi, E. (2014), "Seismic Response of Steel Frames with Knee Braces", 7th European Conference on Steel and Composite Structures.
- [38] Aristizabal-Ochoa, J.D. (1986), "Disposable Knee Bracing: Improvement in Seismic Design of Steel Frames", *Journal of Structural Engineering*, 112(7), pp.1544-1552.
- [39] Balendra, T., Sam, M.T., and Liaw, C.Y. (1990), "Diagonal brace with ductile knee anchor for aseismic steel frame", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19(6), pp.847-858.
- [40] DesRoches, R., McCormick, J., and Delemont, M. (2004), "Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars", *Journal of Structural Engineering*, 130(1), pp.38-46.