کاربردآلیاژ حافظه دار شکلی در مهندسی

ایمان الیاسیان، کارشناس ارشد سازه i.elyasian@gmail.com

آلیاژهای حافظه دار شکلی (SMAs) نوعی مواد هوشمند فلزی هستند که امروزه در صنایع زیادی کاربرد دارند. پرکاربردترین نوع SMA تاکنون آلیاژ نیکل و تیتانیوم (نیتینول – NiTi) بوده است که در صنعت ساختمان برای کنترل غیرفعال ارتعاشات و استهلاک انرژی استفاده شده است. با این حال هزینه های زیاد تولید و عمل آوری این مواد مانع کاربرد آنها در صنعت ساخت و ساز در مقیاس های گسترده می شود. در سال های اخیر Fe-SMA به عنوان جایگزین اقتصادی نیتینول در مهندسی عمران مطرح شده و تحقیقات گسترده ای برای شناخت و بهبود رفتار آن در جهت کاربرد در سازه ها انجام گرفته است.

آلیاژهای حافظه دار شکلی بسته به ترکیبشان رفتارهای ویژه ای چون اثر حافظه شکلی (SME) ، رفتار فوق ارتجاعی و ظرفیت میرایی زیاد نشان می دهند و بنا بر اثر حافظه شکلی اگر تغییر شکلی در SMA ایجاد شود ، پس از باربرداری و در صورت اعمال گرما به آن ، SMA به شکل اولیه خود باز می گردد. از این خاصیت می توان برای پیش تنیده کردن یک نوار میله SMA استفاده کرد. به این ترتیب که اگر در حین ایجاد اثر حافظه شکلی و در هنگام اعمال گرما ، به ماده اجازه تغییر شکل بازگرداننده داده نشود ، به عنوان مثال با مقید شدن SMAدر بتن ، در آن تنش ایجاد خواهد شد. از این تنش که به تنش بازگردانی موسوم است ، می توان برای پیش تنیده کردن یک تیر بتنی استفاده کرد. Fe-SMA به دلیل داشتن هیسترزیس گرمایی بزرگ ، سختی الاستیک زیاد و قیمت کمتر از دیگر آلیاژهای حافظه دار شکلی ، برای این کاربرد بسیار مناسب به نظر می رسد. استفاده از اثر حافظه شکلی برای پیش تنیده کردن سازه مزیت های زیادی نسبت به روش های قدیمی تر پیش تنیدگی دارد از جمله اینکه به دلیل توزیع یکنواخت نیروی کششی در طول تاندون پیش تنیدگی از طریق مهار شدن در بتن ، کاهش نیروی پیش تنیدگی وجود ندارد و روشی مناسب برای پیش تنیده کردن اعضای بتنی منحنی شکل می باشد. هم چنین بر خلاف FRP نیاز به لوله های پیش تنیدگی و مهار کردن تاندون ها و جک های هیدرولیکی بزرگ و فضای وسیع لازم برای این جک ها نیست آلیاژهای شکل پذیر فوق ارتجاعی موادی هستند که از خصوصیات منحصر به فردی برخوردار هستند ، برخی از مشخصات این مواد درحالت فوق ارتجاعی و اثر شکل پذیری باقابلیت برگشت پذیری آنها می باشد .مهندسان وطراحان جهت کنترل ارتعاش سازه ها تحت اثر بارهای جانبی با بهره گیری از ویژگی های این مواد،میراگرهای جدید راطراحی و ساخته اند.آلیاژهای حافظه دار شکلی در ۱- معماری۲- خودرو سازی۳- پزشکی ۴- پلسازی ۵- هواوفضا کاربرد دارند

مواد حافظه دار

آلیاژهای حافظه‌دار به دسته‌ای از آلیاژها گفته می‌شود که قادرند تغییر شکل و کرنش‌های دائمی که بر آن‌ها اعمال می‌شود را بازیابی نموده و در نهایت به‌شکل اولیه‌ی خود بازگردند. آلیاژهای حافظه دار دارای دو فاز ثابت هستند . فاز در دمای بالا که آستنیت (Austenite) نامیده می شود و ساختمان آن مکعبی بوده و به علت دارا بودن تقارن بالا محکم تر است . فاز با دمای پایین که مارتنزیت (Martensite) نامیده می شود. شکل آن منوکلینیک بوده و نسبت به آستنیت تقارن کمتری دارد . فاز مارتنزیت از نوع فاز ترموالاستیک بوده و دارای دو خصوصیت لغزنده بودن و انرژی کم فصل مشترک است .

رفتارآلیاژهای حافظه‌دار، براساس یک دگرگونی فازی وتغییرساختاربلوری رخ می‌دهد که درآن،آلیاژ ازیک اختارمستحکم وپایدار در دمای بالاتر (آستنیت)، به یک ساختارتغییرفرم‌پذیرپایداردردمای پایین‌تر (مارتنزیت)،تبدیل می‌گردد. ساختار مارتنزیتی در دمای پایین با افزایش دما به ساختار آستنیتی تبدیل می شود و در هنگام سرد کردن، فرآیند عکس رخ خواهد داد.

آلیاژهای حافظه دار دو مشخصه بی همتا از خود نشان می دهند :

۱- رفتار حافظه ای (Shape Memory Effect)

۲- رفتار شبه الاستیک (Pseudoelastic Behavior)

ویژگی های دیگر این آلیاژها عبارت است از : مقاومت به خوردگی بالا ، مقاومت ویژه الکتریکی نسبتا بالا، خواص مکانیکی نسبتا خوب ، خستگی طولانی ، شکل پذیری بالا و قابلیت انطباق با بدن . مهمترین کاربرد این آلیاژها در صنایع هوا فضا و صنایع پزشکی است. سال ۱۹۳۲ مشاهدات ثبت شده درباره پدیده حافظه داری شکلی توسط Change و Read انجام شد. آنها وارون پذیری حافظه شکلی را در AuCd از طریق مطالعات فلز شناسی و تغییرات مقاومت آلیاژ ، بررسی کردند در سال ۱۹۵۶ مشاهدات و نتایج تحقیقات مربوط به تز دکترای Horbojen در موضوع اثر حافظه دار در آلیاژCu-Zn منتشر شد. . در سال ۱۹۶۲ Buhler و همکارانش در آزمایشگاه نیروی دریایی ایالات متحده امریکا به بررسی پدیده حافظه داری شکلی در آلیاژ Ti-Ni که دارای اتمهای برابر می باشند پرداختند. در این هنگام تحقیق درباره متالورژی و کاربردهای عملی اولیه آن به طور جدی آغاز شد

۱. آلیاژ نیکل-تیتانیوم به عنوان پر استفاده‌ترین آلیاژ حافظه دار شناخته شده‌است.
۲. آلیاژهای حافظه دار دیگر شامل فلزات:
    ۱. مس، آلومینیوم، نیکل
    ۲. مس، روی، آلومینیوم
    ۳. آهن، منگنز، سیلیکون

ریخته گری بااستفاده از کوره‌های القایی و کوره‌های مقاومتی صورت می‌گیرد

- عاملی که سبب تغییر شکل فلز و یا بازگشت به شکل اولیه آن می‌شوداختلاف ساختار مولکولی در هر فاز است. زمانی که بار اعمال می‌شود، فلز تغییر شکل می‌دهد. سپس به محض برداشته شدن بار و اعمال کمی گرما، مولکول‌ها به شکل ساختاری سخت در می‌آیند، به گونه‌ای که به یک ساختار با شبکه‌ای متفاوت مبدل می‌شوند
- در پدیده حافظه داری، نمونه در حالت کاملاً مارتنزیتی به مقدار معینی تغییر فرم داده می شود سپس با گرم کردن نمونه و برگشت آن به حالت آستینی، شکل نمونه نیز به حالت اول خود برمی گردد

آلیاژهای حافظه دار شکلی SMA چیست؟

آلیاژهای حافظه دار شکلی (SMAs) مصالحی هوشمند و نوین می باشند که به دلیل رفتارهای منحصر به فردی که از خودشان نشان می دهند ، در چند دهه اخیر کاربردهای متفاوتی در زمینه های مختلف علوم و مهندسی پیدا کرده اند. قابلیت تغییر فاز بازگشت پذیر این آلیاژها سبب می شود که بتوانند تغییر شکل های زیادی را متحمل شوند و بسته به شرایط دمایی و تنش موجود ، در صورت بارگذاری یا باربرداری به همراه اعمال گرما به شکل اولیه ی خود بازگردند. این قابلیت که با تغییر در خواص مکانیکی ، حرارتی و الکتریکی آلیاژ همراه می باشد ، موجب شده است که آلیاژهای حافظه دار شکلی به عنوان گزینه ای مناسب جهت کاربرد در سازه های هوشمند ، پیشرفته و انطباق پذیر مد نظر قرار گیرند .تا به امروز انواع زیادی از آلیاژهای حافظه دار شکلی شناخته شده است. با این حال همه ی این آلیاژها قابلیت استفاده در سازه های عمرانی را ندارند زیرا که مصالح مورد استفاده در سازه های عمرانی باید دارای ویژگی های مکانیکی و حرارتی خاص و هم چنین قیمت مناسب باشند.

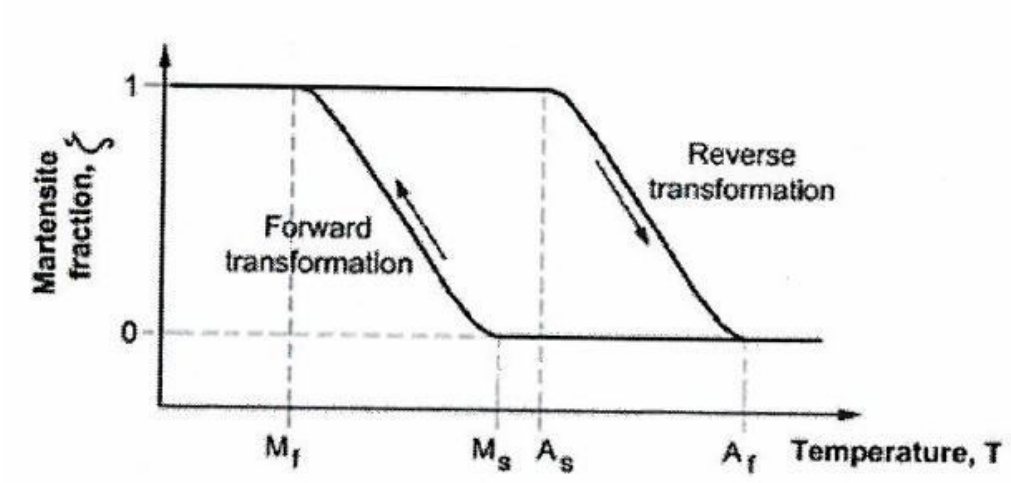
در این بخش ابتدا تبدیلات فازی ، پیچیدگی های رفتاری و ویژگی های منحصر به فرد آلیاژهای حافظه دار شکلی از قبیل خاصیت فوق الاستیک و حافظه شکلی و نیز خواص مکانیکی این آلیاژها بیان می گردد. سپس به معرفی آلیاژهای حافظه دار شکلی بر پایه آهن پرداخته و تبدیلات فازی و رفتارهای ویژه یک نوع Fe-SMA و تنش بازگردانی آن بررسی می شود. در انتها

مطالعات ، تحقیقات و نمونه های عملی از به کارگیری آلیاژهای حافظه دار شکلی با بهره وری از رفتار حافظه شکلی آن ها و برای کاربردهای پیش تنیدگی مرور می گردد.

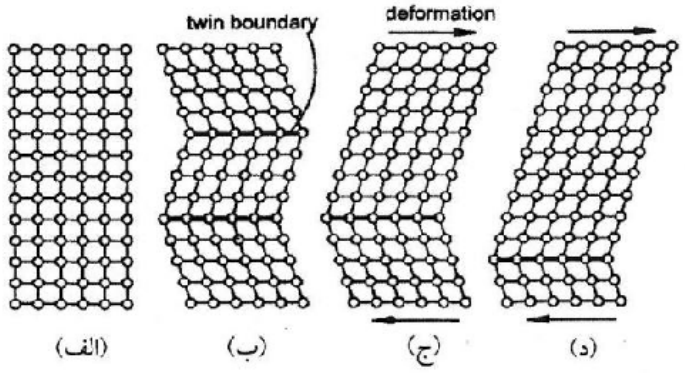
فازهای مختلف آلیاژهای حافظه دار شکلی و تبدیل مارتنزیتی

آلیاژهای حافظه دار شکلی در دو فاز کریستالی به نام های آستنیت و مارتنزیت موجود می باشند. حالت آستینت حالت اصلی با تقارن بالا بوده و در دماهای زیاد و تنش های کم پایدار می باشد. حال آن که حالت مارتنزیت حالت محصول و با تقارن کمتر است و در دماهای کم و تنش های زیاد پایدار می باشد. با اعمال بارگذاری های حرارتی و یا مکانیکی این دو فاز می توانند به یکدیگر تبدیل شوند. این تبدیل برگشت پذیر فازها ، تبدیل مارتنزیتی نامیده می شود که تمامی خصوصیات رفتاری آلیاژهای حافظه دار شکلی را تحت تاثیر قرار می دهد و آن ها را به عنوان یک ماده هوشمند مطرح می کند.

همان گونه ذکر شد ، تبدیل مارتنزیتی در آلیاژهای حافظه دار شکلی ترموالاستیک می تواند هم توسط اعمال تنش و هم با تغییر دمای آلیاژ صورت گیرد. شکل زیر تبدیل مارتزیتی ناشی از تغییر دما و بدو اعمال تنش را نشان می دهد. SMA دارای چهار دمای مشخصه As ، Af ، Ms و Mf می باشد که به ترتیب دمای آغاز حالت آستنیت ، دمای پایان حالت آستنیت ، دمای آغاز حالت مارتنزیت و دمای پایان حالت مارتنزیت می باشند. تبدیلات مارتنزیتی ، یک هیسترزیس گرمایی را تشکیل می دهند و این بدین معنا است که تبدیل مستقیم و معکوس هر دو در یک دما رخ نمی دهند.



با توجه به شکل در تبدیل مستقیم زمانی که ماده تحت کاهش دما قرار می گیرد ، تا زمانی که ماده به دمای Ms نرسیده است ، در حالت کاملا آستنیت قرار دارد. هنگامی که به دمای Ms می رسد ، کریستال های آستنیت شروع به تبدیل شدن به مارتنزیت می کنند و زمانی که ماده به دمای Mf می رسد ، تبدیل از آستنیت به مارتنزیت کامل شده است. در تبدیل مستقیم در دماهای بین Ms و Mf ، ماده به صورت ترکیبی از آستنیت و مارتنزیت می باشد. در تبدیل معکوس که با افزایش دما همراه است ، تا زمانی که ماده به دمای As نرسیده به صورت کاملا مارتنزیت است. زمانی که به As می رسد ، تبدیل از آستنیت به مارتنزیت آغاز شده و سرانجام که به دمای Af می رسد ، کاملا به حالت آستنیت در می آید و تبدیل فاز پایان می پذیرد.مارتنزیت ایجاد شده توسط تغییر دما ، مارتنزیت پیچ خورده و مارتنزیت ایجاد شده توسط تغییر تنش ، مارتنزیت پس پیچ خورده نامیده می شود. در تبدیل ساختار کریستالی آستنیت به مارتنزیت پیچ خورده ، تغییر شکل ماکروسکوپیک ماده ناچیز است. مارتنزیت پس پیچ خورده ، با اعمال تنش به مارتنزیت پیچ خورده به وجود می آید. طی این تبدیل ، بدون اینکه هیچ لغزش واقعی به معنای آسیب به ماده وارد شود ، شکل پذیری آن به طور قابل توجهی افزایش یافته ، آلیاژ به حداکثر تغییر طول خود می رسد و کرنش شبه پلاستیک در مارتنزیت ایجاد می شود. زمانی که باربرداری صورت می گیرد ، مارتنزیت به صورت پس پیچ خورده باقی می ماند و کرنش ایجاد شده در آن به جز مقدار اندکی کرنش الاستیک ، برگشت پذیر نیست. این کرنش پسماند می تواند با اعمال دمای بیشتر از Af به ماده ، حذف شود. شکل زیر ساختار آستنیت و دو نوع مارتنزیت ذکر شده را نشان می دهد.

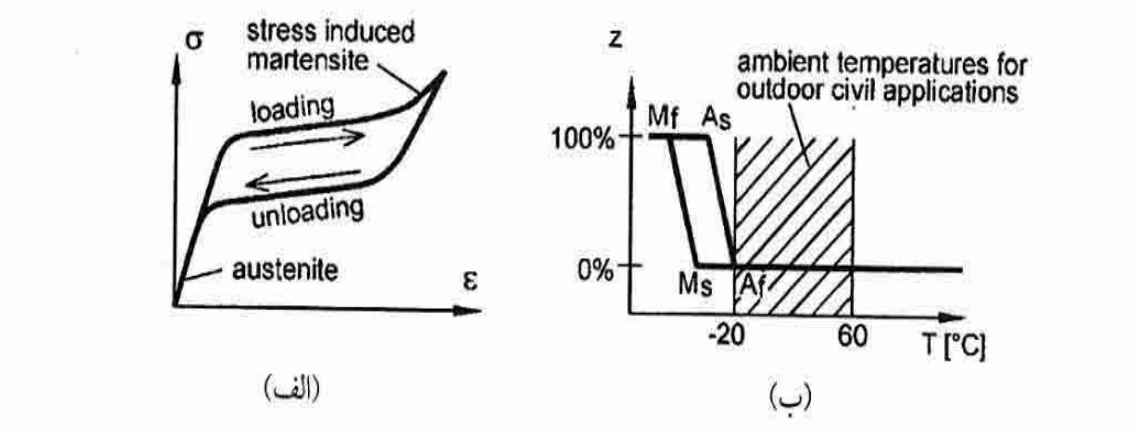


تشکیل و تغییر شکل مارتنزیت در یک آلیاژ حافظه‌دار شکلی ترموالاستیک: (الف) ساختار کریستالی آستنیت، $T>M_s$ (ب) مارتنزیت پیچ‌خورده ناشی از کاهش دما، $T<M_f$ (ج) تغییر ساختار گونه‌های مارتنزیت پیچ‌خورده با اعمال تغییر شکل $T<M_f$ (ج) مارتنزیت پس‌پیچ‌خورده شامل یک گونه مارتنزیتی $T<M_f$

رفتارهای مختلف آلیاژهای حافظه دار شکلی

رفتار فوق الاستیک (Superelasticity)

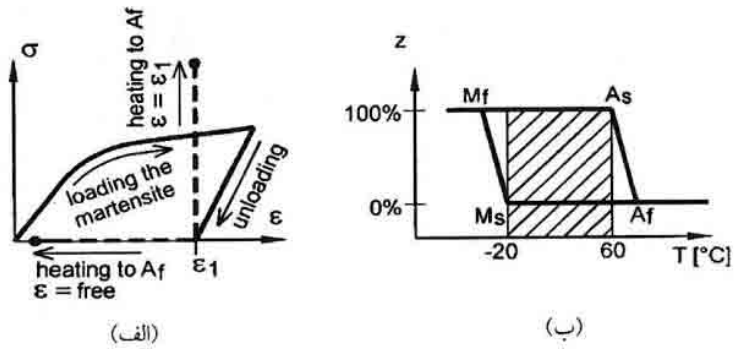
اعمال تنش به SMA که در حالت اولیه آستنیت قرار دارد و دمای آن بالاتر از Af می باشد ، موجب می شود که آستنیت به مارتنزیت پس پیچ خورده تبدیل شود ، زیرا که آستنیت در تنش های زیاد پایدار نیست. منحنی تنش – کرنش این تبدیل شامل سه قسمت است که عبارتند از : یک شاخه الاستیک اولیه با مدول الاستیسیته اولیه آستنیت ، یک قسمت افقی که تبدیل فاز از آستنیت به مارتنزیت در این قسمت رخ می دهد و بار دیگر یک شاخه الاستیک با مدول الاستیسیته اولیه مارتنزیت در هنگام باربرداری ، مارتنزیت ناپایدار می شود و تبدیل معکوس رخ می دهد و ماده بدون هیچ کرنش پسماندی به شکل اولیه خود باز می گردد. تبدیل معکوس از روی یک مسیر متفاوت ماده را به مکان اولیه می رساند و بنابراین یک هیسترزیس تشکیل می شود که مساحت آن مصرف انرژی اتلافی می باشد. این رفتار را رفتار فوق الاستیک یا شبه الاستیک می نامند زیرا طی آن هیچ کرنش پسماندی بر روی ماده باقی نمی ماند. اگر دمای SMA بیشتر از Md (بیشینه دمایی که مارتنزیت در اثر اعمال تنش می تواند در آن ایجاد شود) باشد ، رفتار آلیاژ پس از یک تغییر شکل الاستیک اولیه ، پلاستیک خواهد شد (همانند رفتار فولاد معمولی) رفتار فوق الاستیک در شکل زیر نشان داده شده است.



رفتار فوق الاستیک : (الف) نمودار تنش-کرنش (ب) پروفیل دمای مربوط به رفتار فوق الاستیک در تنش صفر (پارامتر z معرف نسبت مارتنزیت و T معرف دما می‌باشد.)

رفتار حافظه شکلی (Shape memory effect)

زمانی که SMA در دمایی کمتر از As تحت بارگذاری قرار بگیرد ، به دلیل پایدار بودن مارتنزیت در دماهای کم ، پس از باربرداری تغییر فاز صورت نمی گیرد. همچنین کرنش پلاستیک در مارتنزیت ایجاد می شود که به هنگام باربرداری قابل بازگشت نیست. با این حال ، کرنش پسماند تولید شده می تواند با اعمال دمای بالاتر از Af به طور کامل حذف شود. از آن جا که این مواد شکل اولیه خود را به یاد داشته و می توانند پس از اعمال دما به شکل اولیه خود بازگردند ، این خاصیت ، رفتار حافظه شکلی (SME) یا شبه پلاستیک نام گرفته است. در شکل زیر رفتار حافظه شکلی و دمایی که این رفتار در آ« به وقوع می پیوندد ، ارائه شده است.



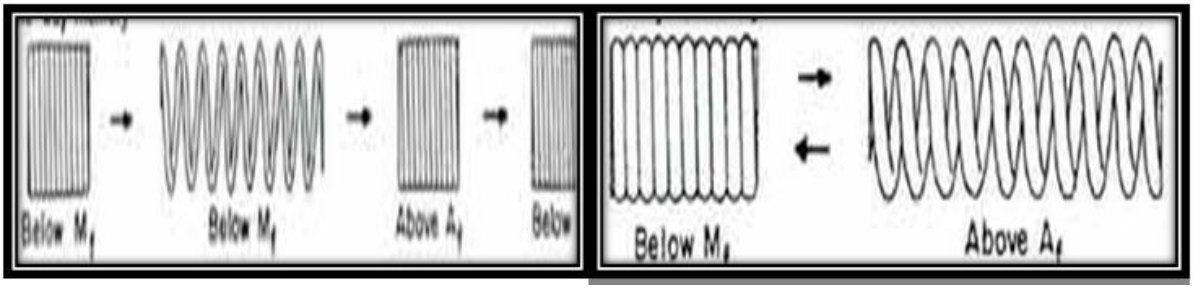
رفتار حافظه شکلی : (الف) نمودار تنش-کرنش (ب) پروفیل دمای مربوط به رفتار حافظه شکلی در تنش صفر (پارامتر z معرف نسبت مارتنزیت و T دما می‌باشد.)

همان طور که در شکل بالا نشان داده شده است ، اگر در حین ایجاد اثر حافظه شکلی و در هنگام اعمال حرارت ، به ماده اجازه تغییر شکل بازگردانده داده نشود ، به عنوان مثال با مقید شدن SMA در بتن ، در آن تنش ایجاد خواهد شد. از این تنش که به تنش بازگردانی موسوم است ، می توان برای پیش تنیده کردن یک تیر بتنی استفاده کرد.

اثر حافظه دار یک طرفه و دو طرفه:

در صورتیکه اثر حافظه داری فقط بعد از تغییر شکل در حالت مارتنزیتی و سپس در سیکل گرم کردن مشاهده شود به آن اثر حافظه یک طرفه گفته می شود.

برگشت پذیری به حالت اولیه خود در اثر سرد و گرم کردن آلیاژ های حافظه دار دو طرفه در بازه معینی از دما امکان پذیر است.اگر فنر گرم شود باز شده و در سیکل سرد شدن مجدداً به شکل جمع شده در می آید.
باید توجه داشت که آلیاژ های حافظه دار برای اینکه اثر حافظه دار دو طرفه از خود نشان دهند نیاز به انجام عملیات ترمومکانیکی خاصی بر روی آنها می باشد.



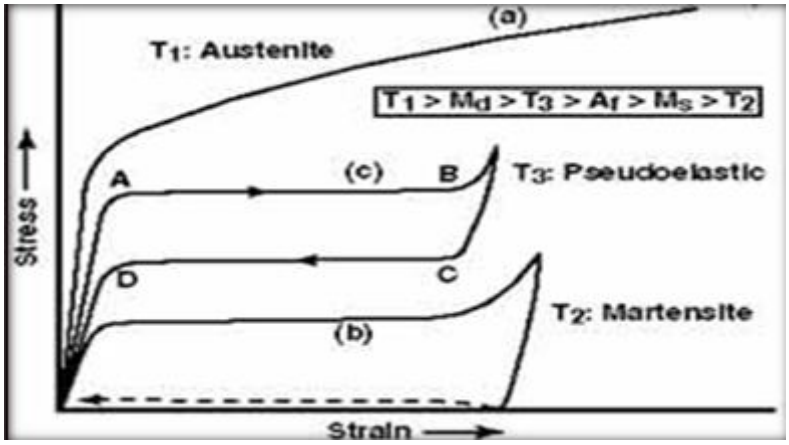
میرایی مارتنزیتی (Martensitic damping)

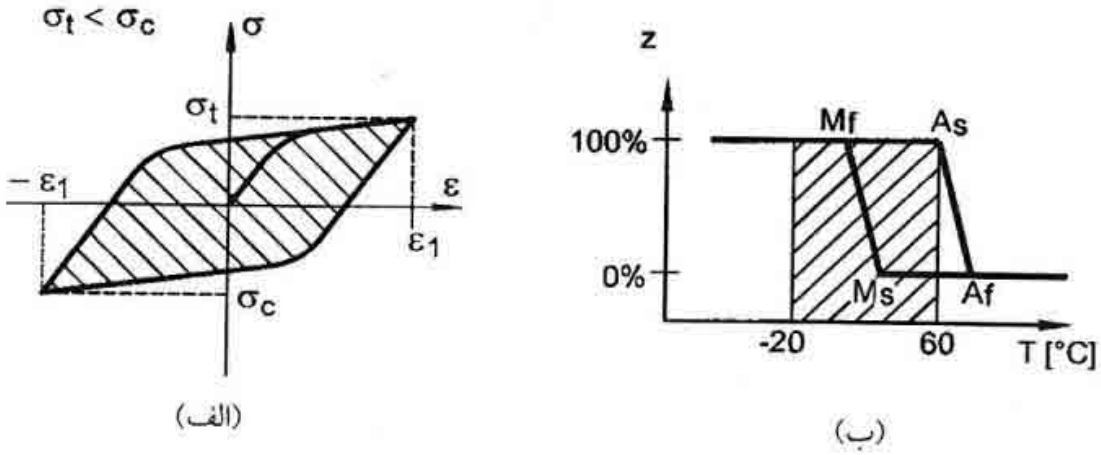
زمانی که SMA در حالت مارتنزیت تحت تنشی بیشتر از تنش تسلیم قرار گیرد ، به دلیل تغییر تدریجی جهت گیری گونه های مارتنزیت ، ظرفیت استهلاک انرژی زیادی از خود نشان می دهد. این خاصیت در شکل زیر نمایش داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود در بارگذاری رفت و برگشتی هیسترزیس بزرگی تشکیل خواهد شد که مساحت آن برابر انرژی تلف شده می باشد.

رفتار ترمومکانیکی

آلیاژ های حافظه دار در درجه حرارت های مختلف دارای خصوصیات مکانیکی بسیاری می باشند.

تغییر شکل در مارتنزیت با چند در صد کرنش و تنش فشاری نسبتاً کم دیده می شود . در حالیکه آستنیت در درجه حرارت بالا نیاز به تنش نسبتا زیادی برای تغییر شکل دارد





میرایی مارتنزیتی : (الف) نمودار هیسترزیس SMA (ب) پروفیل دمای مربوط به میرایی مارتنزیتی در تنش صفر (پارامتر z معرف نسبت مارتنزیت و T دما می‌باشد.)

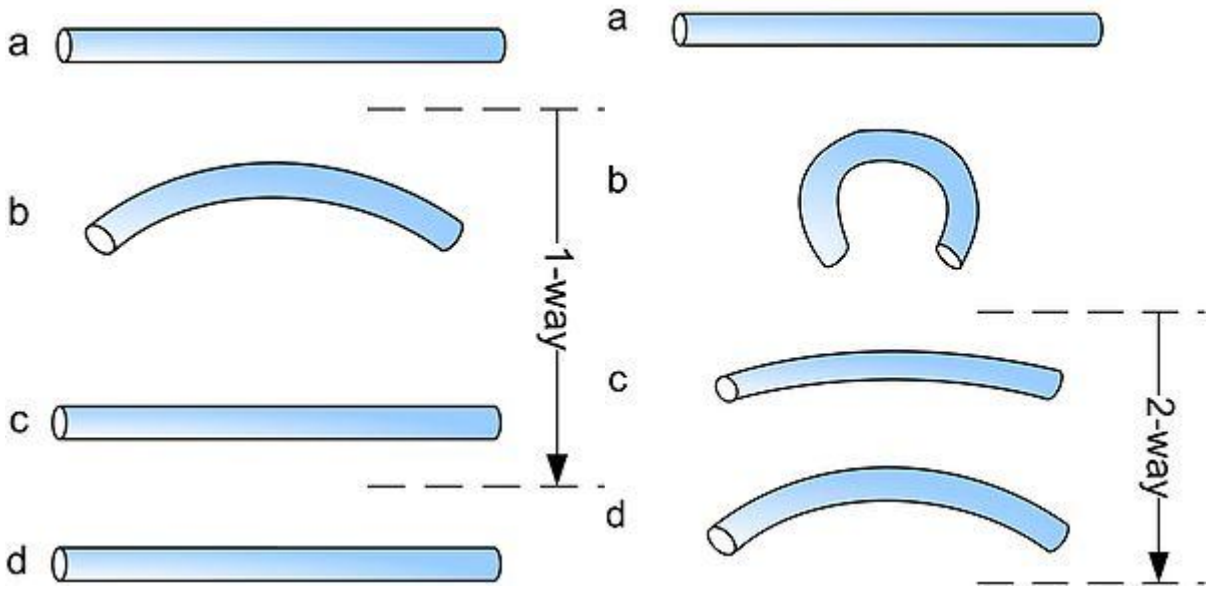
این خاصیت مهم سبب شده است که SMA در کنترل غیر فعال سازه ها جایگاه ویژه ای پیدا کند. قابلیت استهلاک انرژی این مواد ، تقاضا را بر روی اعضای اصلی سازه کاهش می دهد و از آنجایی که این مواد دارای مقاومت بسیار بالایی در مقابل خستگی هستند ، می توانند پس از زلزله نیز مورد استفاده قرار گیرند و نیازی به تعویض آن ها نمی باشد.

نوع اصلی از آلیاژهای حافظه شکل عبارتند از مس-آلومینیوم نیکل و آلیاژهای نیکل تیتانیوم (NiTi) اما SMA ها همچنین می توانند توسط آلیاژ روی، مس، طلا و آهن ایجاد شوند. اگر چه SMA های مبتنی بر آهن و مس، مانند Fe-Mn-Si، Cu-Zn-Al و

Cu-Al-Ni، در دسترس تجاری هستند و ارزان تر از NiTi، SMA های مبتنی بر NiTi برای اکثر برنامه های کاربردی به دلیل ثبات آنها ترجیح داده می شوند ، عملی بودنو عملکرد ترمو مکانیک برتر [۴] SMA ها می توانند در دو مرحله مختلف با سه ساختار کریستال مختلف (یعنی مارتنزیت twinned، مارتنزیت detwinned و austenite) و شش تبدیل ممکن وجود داشته باشد. آلیاژهای NiTi از آستنیت به مارتنزیت پس از سرد شدن تغییر می کنند. Mf دما است که در آن گذار به مارتنزیت پس از خنک شدن کامل می شود. بر این اساس، در طول حرارت، به همان ترتیب، و به صورت اف، دمایی است که در آن تبدیل از مارتنزیت به آستنیت شروع و پایان می یابد. استفاده مجدد از اثر حافظه شکل می تواند منجر به تغییرات درجه حرارت تغییر شکل (این اثر به عنوان خستگی عملکرد شناخته شده است، به عنوان آن را نزدیک با تغییر ویژگی های ریز ساختاری و عملکردی مواد).حداکثر درجه حرارت که SMA ها دیگر نمی توانند تحت تاثیر استرس قرار گیرند نامیده می شود Md، جایی که SMAs به شکل دائمی تغییر شکل داده می شوند. انتقال از فاز مارتنزیت به فاز آستنیت فقط به دما و استرس بستگی دارد، نه زمان، به عنوان بیشتر تغییرات فاز، به عنوان هیچ انتشار درگیر است. به طور مشابه، ساختار آستنیتی نام خود را از آلیاژهای فولادی یک ساختار مشابه دریافت می کند. این انتقال غیر مستقیم بین این دو فاز است که منجر به خواص ویژه می شود. در حالی که مارتنزیت را می توان از طریق آستنیت سریعا از فولاد کربن تشکیل داد، این فرایند غیر قابل برگشت نیست، بنابراین فولاد ویژگی های حافظه شکل ندارد الیاژ حافظه دار خواص متفاوتی دارند. دو خاصیت معمول در این آلیاژ

- حافظه‌داری یک‌طرفه
- حافظه‌داری دوطرفه

می باشد. تصویر شماتیک این دو اثر را در شکل زیر ملاحظه میفرمایید:



مهم‌ترین مواد هوشمندحافظه دار

سیستم‌های بر پایه مس (مثلاً Cu-Sn، Cu-Zn، Cu-Al) و سیستم‌های بر پایه Ni-Ti (مثلاً نایتینول). خواص حافظه‌داری سیستم‌های سه‌تایی بسیاری بر پایه این سیستم‌های دوتایی بررسی شده است.

از مزایای آلیاژهای حافظه‌دار پایه‌ی مس، می‌توان به دمای کاری بالا، قیمت پایین‌تر و راحت‌تر بودن فرآیند تولید در مقایسه با آلیاژهای حافظه‌دار نایتینول اشاره کرد. مهم‌ترین کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار پایه‌ی مس، در حسگرها و محرک‌هاست برخی نمونه های آلیاژ حافظه‌دار شامل عناصری است که در جدول معرفی شده‌اند

آلیاژهای پایه آهنی	آلیاژهای پایه مس	انواع دیگر آلیاژ
Fe-Ni-Co-Ti	Cu-Al-Zn	Mn-Si-Cr-Ni
Fe-Pt		
Fe-Pd		
Fe-Nic	Cu-Al-Ni	Ni-Ti
Fe-Mn-Si		

قابلیت های مختلف آلیاژهای حافظه دار

قابلیت بازیابی آزاد (استفاده از حرکت) :

کاربردهایی که در آن‌ها، آلیاژ حافظه‌دار در حین سرد و گرم‌شدن، آزادانه شکل اولیه‌ی خود را بازیابی می‌کنند، بدون آن‌که یک تنش بیرونی، از این کار ممانعت به‌عمل آورد و بنابراین، تولید یک کرنش بازیابی می‌کنند. برای مثال، در آنتن‌های سفینه‌های فضایی که پس از قرارگرفتن سفینه در فضا، بدون اعمال تنش بیرونی و فقط با استفاده از گرم‌کردن، باز می‌شوند.

قابلیت بازیابی مقید (استفاده از نیرو) :

به کاربردهایی اطلاق می‌شود که در آن‌ها، نیروی خارجی، جلوی بازیابی کرنش در آلیاژ را می‌گیرد. اگرچه در این کاربردها، هیچ کرنشی بازیابی نمی‌شود، ولی مقدار زیادی تنش ایجاد می‌شود. از این خاصیت، در کاربردهایی مانند چفت‌ها و بست‌ها و کوپلینگ‌های لوله استفاده می‌شود. این کاربرد، وسیع‌ترین کاربرد برای این آلیاژ را شامل می‌شود.

قابلیت بازیابی تحت فشار (استفاده از کار) :

به کاربردهایی اطلاق می‌شود که در آن‌ها، هم تنش و هم کرنش در حین گرم‌کردن بازیابی شده و کار مکانیکی ایجادشده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این خاصیت، در محرک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این محرک‌ها، به دو نوع محرک‌های گرمایی و الکتریکی تقسیم می‌شوند.مصداقی از کاربرد یک سیم از جنس آلیاژ حافظه‌دار را می‌توان مشاهده نمود که با تغییر دمای ناشی از مقاومت سیم در برابر جریان و بسته به شرایطی که برای سیم حافظه‌دار تعریف شده‌است، سیم در محدوده‌ی معینی، انبساط و انقباض می‌یابد.

قابلیت ابرکشسانی (ذخیره‌ی انرژی مکانیکی) :

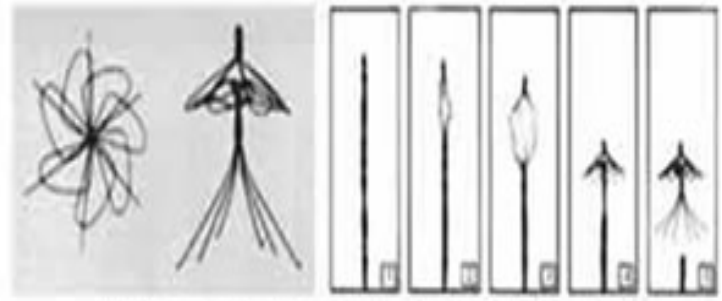
این کاربرد، براساس وجود درصد بسیار بالای خاصیت کشسانی یا بازگشت فنری که در اکثر آلیاژهای Ti-Ni یافت می‌شود، بنیان نهاده‌شده‌است و باعث ذخیره‌شدن انرژی مکانیکی می‌شود و در کاربردهایی نظیر فنرها، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگرچه محدوده‌ی دمایی بروز این خاصیت کوچک است، ولی در همین محدوده، آلیاژ می‌تواند رفتار الاستیکی معادل ۱۵ برابر فولادهای فنری را از خود نشان‌دهد.

قابلیت میراکنندگی ارتعاشات :

از این خاصیت، برای مهار ارتعاشات در سازه‌هایی که تحت ارتعاشات شدید قرار دارند، استفاده می‌گردد. برای مثال، می‌توان به صفحات آزاد میراکننده‌ی ارتعاش در سفینه‌های فضایی اشاره کرد. همچنین، می‌توان از این آلیاژها، در پی ساختمان، برای میراکردن ارتعاشات ناشی از زلزله استفاده کرد.آلیاژحافظه دار شکلی در هوافضا-پزشکی-خودروسازی-رباتیک کاربرد دارد یکی از اولین کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار در مقیاس انبوه، استفاده در اتصالات لوله‌های هیدرولیک هواپیمای اف-۱۴ بود.سطح بال وسیع هواپیما موجب سهولت برخاستن و فرود می‌شود، اما در سرعت‌های مافوق صوت، به‌عنوان عاملی مزاحم، مقاومت زیادی ایجاد می‌کند که ضریب DRAG هواپیما را افزایش می‌دهد. امروزه با ورود مواد هوشمند به صنعت هواپیما و ساخت بال‌های قابل جمع شدن، به تمام شرایط مورد نظر پاسخ داده می‌شودلباس سبک و راحت برای فضانوردان را نیز از آلیاژحافظه دار شکلی تهیه می کنند

کاربرد پزشکی آلیاژ های حافظه دار به عنوان یک عملگر با اثر باقیمانده در داخل بدن قابل بررسی است آلیاژی که در بدن افراد برای بهبود رفتار بالینی اعضای آنها بکار گرفته شده است نباید مولد هیچ گونه حساسیتی باشد علاوه بر آن آلیاژ بکارگرفته شده نباید به صورت ذراتی از یون آن ماده وارد خون شخص گیرنده این گونه آلیاژها شود. تحقیقات نشان می دهد که آلیاژNi-Ti در کاربرد و استفاده، نسبت به بقیه آلیاژها از موقعیت خوبی برخوردار استآلیاژهای حافظه‌دار همچنین به جای مفصل ران هم کاربرد دارند که ناشی از قابلیت ارتجاعی بسیار بالای (سوپرالاستیسیته) آن است. ازآلیاژهای حافظه دار (SMA) به عنوان فضا گیر یا spacerبین مهره های ستون فقرات در حین عمل جراحی استفاده می شود که موجب استحکام ما بین دو مهره در حین بهبودی بعد از تغییر شکل ایجاد شده در جراحی اسکولیدز می شودترمیم و بهبود شکستگی استخوان از دیگر کاربردهای ارتوپدی آلیاژ های حافظه دار می باشد. انواع مختلفی از بست های با خاصیت حافظه داری در ترمیم شکستگی یا ترک استخوان ساخته شده است. بست ها به صورت باز شده در محل شکستگی یا ترک معمولاً پیچ شوند. با کمک گرما بست ها به گونه ای تغییر شکل می یابند که دو طرف شکستگی یا ترک را با هم یکی کرده و می فشرند. گرمای ایجاد شده را می توان به کمک یک وسیله خارجی به آلیاژ منتقل کرد. عموماً از این بست ها در مواقعی استفاده می شود که محل شکستگی یا ترک را نتوان گچ گرفت، مانند نواحی صورت شامل، بینی ، فک و حفره چشم از جمله محل های مورد کاربرد می باشند. از دیگر کاربردهای ارتوپدی اثرات آلیاژ های حافظه دار در فیزیوتراپی عضلات ضعیف می باشد . تصویر دستکشی را نشان می دهد که سیم هایی باخاصیت حافظه داری بر روی ناحیه انگشتان دستکش واقع شده است. که موجب تقویت حرکت عضلات و برقراری دامنه مناسب حرکات مفصلی با استفاده از خاصیت حافظه داری سیم های دستکش استفاده می شود به طوریکه با گرم کردن سیم طول سیم ها کوتاه شده و انگشتان به داخل خم می شوند و با سردکردن طول سیم ها زیاد شده و انگشتان کاملاً کشیده می شوند . این پدیده برای به کار انداختن مفاصل نیمه ثابت استفاده می شود. استفاده از آلیاژ حافظه‌دار در ارتودنسی دندان، شکل دیگری از قابلیت‌های آن است. سیم‌های ارتودنسی از جنس Ni-Ti وقتی در دمای ثابتی هستند شکل خود را حفظ می‌کنند، و به دلیل قابلیت سوپرالاستیسیته‌ی این فلز، سیم‌ها، شکل اولیه‌ی خود را بعد از تکرار فشار و حذف آن دوباره به‌دست می‌آورند.

فیلتر سیمون نسل جدیدی از وسایل استفاده شده برای جلوگیری از انسداد جریان خون می باشد افرادی که قادر به استفاده از داروهای ضد انعقاد خون نمی باشند، استفاده کننده های اصلی این فیلتر می باشند. هدف استفاده از این وسیله تصفیه خون داخل رگ می باشد و فیلتر سیمون کمک می کند لخته های بوجود آمده در خون حل شود



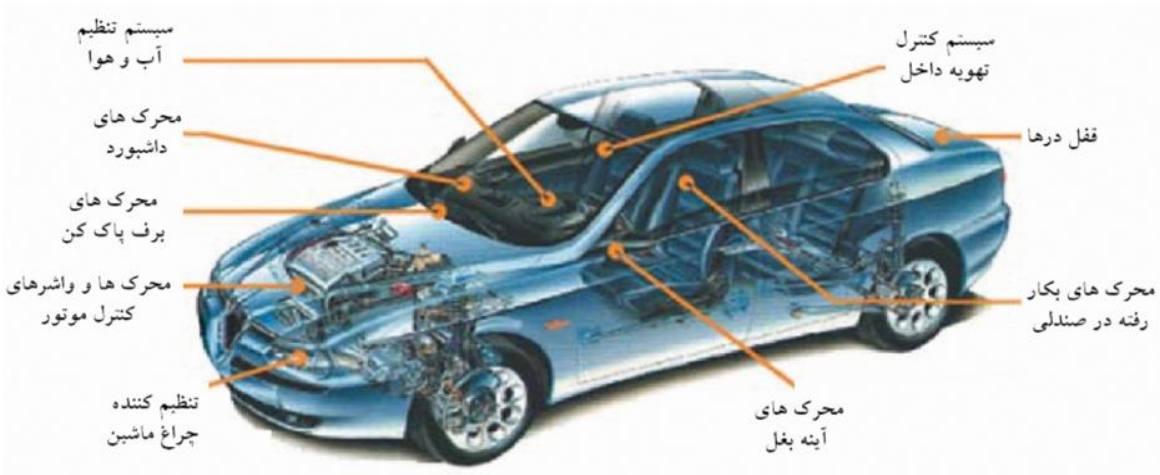
شکل ۹ الف) شکل اصلی فیلتر ب) مراحل بازیافت شکل اولیه و جدایی از Catheter

مسدودکننده سوراخ دیواره دهلیزی: از این وسیله برای مسدود کردن سوراخ دیواره دهلیزی که بین دو دهلیز چپ راست ایجاد می شود استفاده می گردد. این وسیله از سیم هایی با خاصیت حافظه داری و فیلم ضد آب که روی آن نصب شده است، تشکیل می شود. برای نصب این وسیله در داخل قلب ابتدا نیمه اول آن وارد بطن چپ شده وبه شکل اولیه خود بر می گردد و در ادامه نیمه دوم که در بطن راست قرار می گیرد تغییر شکل یافته ، به شکل اولیه خود بر می گردد. در انتها هر دو نیمه به دیواره بطنی متصل شده اند . به طوری که از ورود جریان خون از دو بطن به یکدیگر جلوگیری می شود

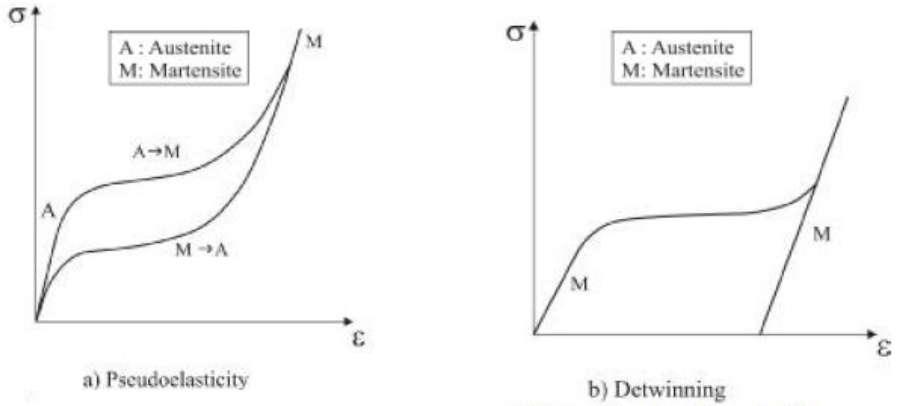
استنت های باز شونده خودکار نیز از جمله وسایل مهمی است که در حفظ قطر داخلی رگ های تنگ شده و کاهش قطر و بسته شدن آنها کاربرد دارد . استنت ها به شکل استوانه های توری ساخته می شوند و متناسب بانوع و محل کاربرد دارای اقطار متفاوتی می باشنداز جمله محل های مورد استفاده از استنت ها سرخرگ ، سیاهرگ، رگ های خونی ،مجاری ، صفراوی و مری می باشد. برای نصب در داخل عروق ابتدا فاز مارتنزیتی از شکل اصلی به حالت متراکم شده تبدیل و پس از قرار دادن در محل مورد نظر به شکل خود بر می گردد. در طول زمان استنت در بدن حل می شود

حذف لخته های خونی در سه مرحله انجام می شود (a) .استنت در شکل موقت خود مستقیما از داخل لخته خونی عبور داده می شود (b) .سپس استنت به وسیله یک لیزر دیودی حرارت داده شده، به شکل اولیه خود در می آید (c) .در نهایت هنگام بیرون کشیدن، استنت لخته های خونی را از بین میبرد

امروزه آلیاژهای حافظه دار جهت کنترل موتور، انتقال قدرت وتوقّف اتومبیل استفاده می شود. همچنین از آن ها به عنوان جا یگزینی به جای اجزای موتوراستفاده می شودکه درهرچه سبکترکردن سیستم تحریک، حذف گیربکس وکلاچ موثر است



خطوط و لوله‌های حامل گاز و یا سیالات سمی یا اشتعال پذیر بایستی به دلیل جلوگیری از حوادث فاجعه آفرین، به شدت کنترل شوند. بنابراین سیستم‌های کنترلی می‌توانند توسط آلیاژهای حافظه‌دار برنامه‌دار شوند تا به محض افزایش دما خاموش شوند. که این امر تا حدود زیادی می‌تواند از مشکلات احتمالی در صنایعی نظیر پتروشیمی، گاز، داروسازی و ... بکاهد.



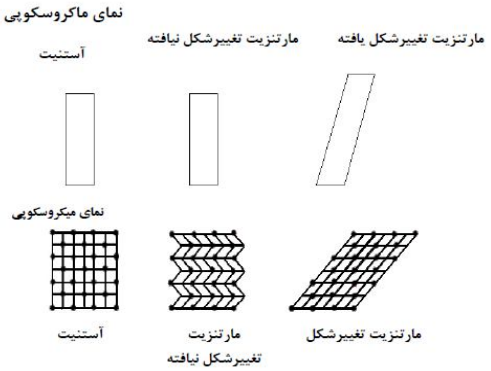
رفتارهای مختلف مواد حافظه دار شکلی.

هنگامی که یک آلیاژ حافظه دار در حالت سرد خود (زیر As) باشد، فلز می تواند خم و یا کشیده شود و این شکل ها را نگه می دارد تا بالای دمای انتقال گرم شود. پس از گرم شدن، شکل به اصل آن تغییر می کند. هنگامی که فلز دوباره خنک شود، آن را در شکل گرم باقی می ماند، تا زمانی که دوباره تغییر شکل دهد.با اثر یک طرفه، خنک شدن از دماهای بالا یک تغییر شکل ماکروسکوپی ایجاد نمی کند. تغییر شکل لازم برای ایجاد شکل کم دما است. در گرمایش، تبدیل در As آغاز می شود و در AF تکمیل می شود (معمولا ۲ تا ۲۰ درجه سانتیگراد یا گرمتر، بسته به نوع آلیاژ یا شرایط بارگیری). همانطور که توسط نوع و ترکیب آلیاژ تعیین می شود و می تواند بین -۱۵۰ C^{o} و ۲۰۰ C^{o} متفاوت باشد. یکی دیگر از خواص این الیاژ* سوپرالاستیسیته می‌باشد که آلیاژ به محض باربرداری به شکل اولیه اش باز می گردد. بنابراین در این حالت برای رسیدن به شکل اولیه نیازی به اعمال حرارت نمی باشد. اثر حافظه دو طرفه اثر این است که ماده به دو شکل متفاوت به چشم میخورد: یکی در دماهای پایین و دیگری در شکل درجه حرارت بالا. گفته می شود که یک ماده که اثر حافظه شکل را در حین گرم کردن و خنک کردن نشان می دهد دارای حافظه دو طرفه است. این را نیز می توان بدون استفاده از یک نیروی خارجی (اثر دو طرفه درونی) به دست آورد. دلیل این که مواد در این شرایط رفتار بسیار متفاوت دارند، در آموزش قرار دارد. آموزش به این معنی است که یک حافظه شکل می تواند "یاد بگیرد" که رفتار خاصی داشته باشد. در شرایط عادی، یک آلیاژ حافظه شکل "به خاطر" شکل کم دما خود را می بخشد، اما با حرارت دادن برای بهبود شکل دمایی، فورا "شکل" فراموش شده را فراموش می کند. با این حال، می توان آن را آموزش داد "به یاد داشته باشید" برای ترک بعضی از یادآورهای شرایط دمای پایین تغییر شکل در مراحل با درجه حرارت بالا. چند راه برای انجام این کار وجود دارد: یک شی شکل و آموزش که فراتر از یک نقطه خاص گرم می شود اثر حافظه دو طرفه را از دست می دهد.آلیاژهای شکل پذیر فوق ارتجاعی (Shape Memory alloy) موادی هستند که از خود رفتار فوق ارتجاعی و اثر شکل پذیری با قابلیت شکل پذیری نشان می دهند با اعمال بار بروری نمونه SMA تغییر شکل حاصل می گردد ، با اعمال بار حرارتی بر روی نمونه و اگر دمای محیط بالا باشد ، حتی با حذف بار اعمالی،نمونه به حالت اولیه باز می گردد . یکی از مشخصه های مهم آلیاژهای شکل پذیر فوق ارتجاعی ،ظرفیت میرایی بالای آنها می باشد ازاین رو در میراگرها برای کنترل ارتعاش سازه استفاده می

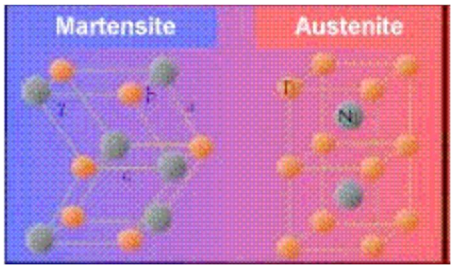
شود ودمقایسه با میراگرهای ساخته شده ازمواد ویسکو الاستیک وفلزات با مقاومت تسلیم پایین از مزایای بالایی نظیر ظرفیت میرایی بالا ، قابلیت شکل پذیری تحت تغییر شکل های بزرگ و رفتار پایداری برخوردار می باشد.

یکی از مهمترین آلیاژهای شکل پذیر فوق ار تجاعی آلیاژ نیکل-تیتانیوم می باشد (Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory)این نوع آلیاژ فرو مغناطیس می باشد که در میدان مغناطیسی قوی المان شکل اولیه خود را بدست می آورد این مواد به لحاظ سرعت و کارایی بالاتر نسبت به SMA های محرک دمایی توجه بیشتری جلب کرده اند برخی از آلیاژها که در دماهای مختلف خاصیت برگشت پذیری دارند عبارتند از

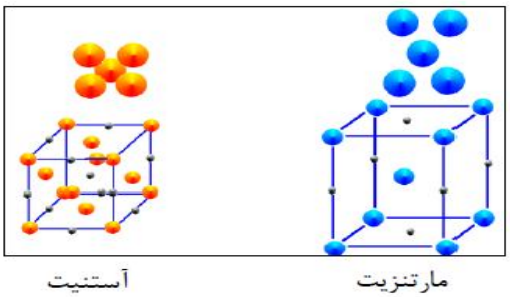
- Ag-Cd 44/49 at.% Cd • Au-Cd 46.5/50 at.% Cd • Cu-Al-Ni 14/14.5 wt.% Al and 3/4.5 wt.% Ni
- Cu-Sn approx. 15 at.% Sn • Cu-Zn 38.5/41.5 wt.% Zn • Cu-Zn-X (X = Si,Sn,Al) a few wt.% of XXX
- In-Ti 18/23 at.% Ti • Ni-Al 36/38 at.% Al • Ni-Ti 49/51 at.% Ni • Fe-Pt approx. 25 at.% Pt
- Mn-Cu 5/35 at.% Cu • Fe-Mn-Si • Pt alloys • Co-Ni-Al • Co-Ni-Ga

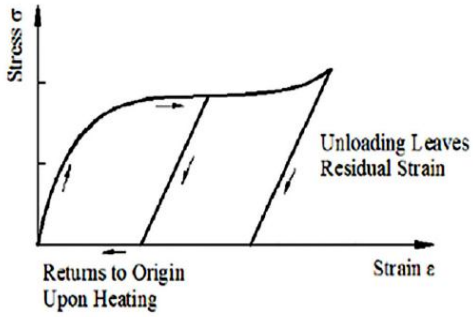


نمای میکروسکوپی و ماکروسکوپی دو فاز SMA



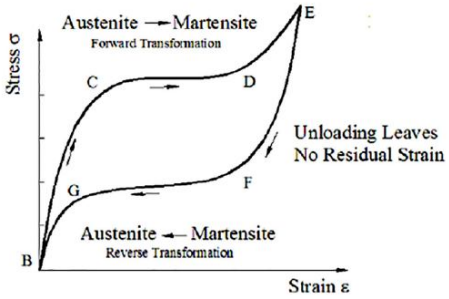
در فاز Martensite ، SMA ها به نرمی وآسانی تعییر شکل می دهند واین حالت در دمای پایین رخ می دهد فاز Austensite در دماهای بالاتر رخ داده وبه صورت مکعبی می باشد





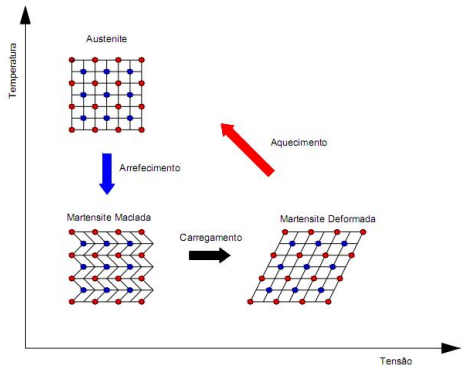
عملکرد فوق ارتجاعی آلیاژها

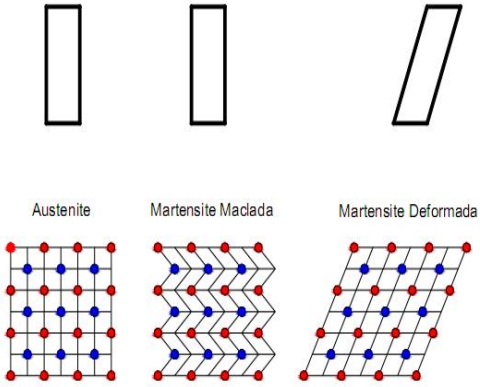
Super elastic functions of alloys

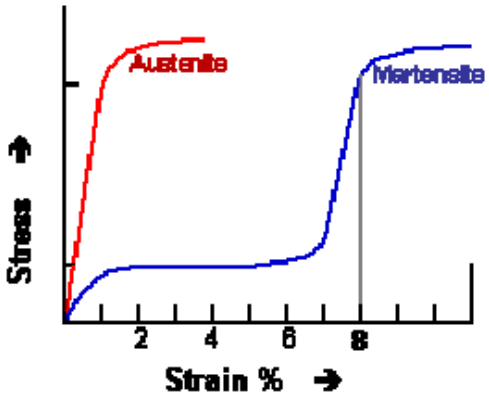


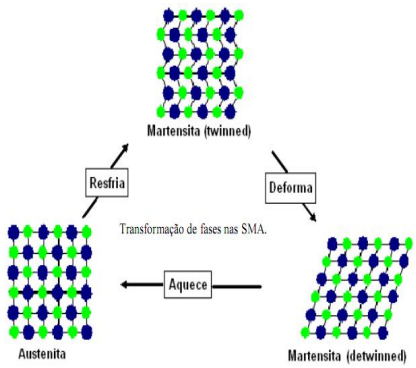
عملکرد حافظه‌داری شکلی آلیاژها

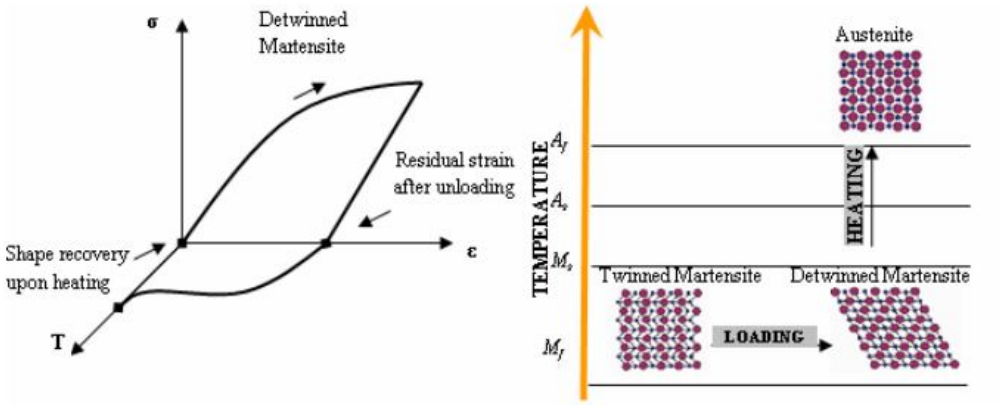
Shape memory functions of alloys



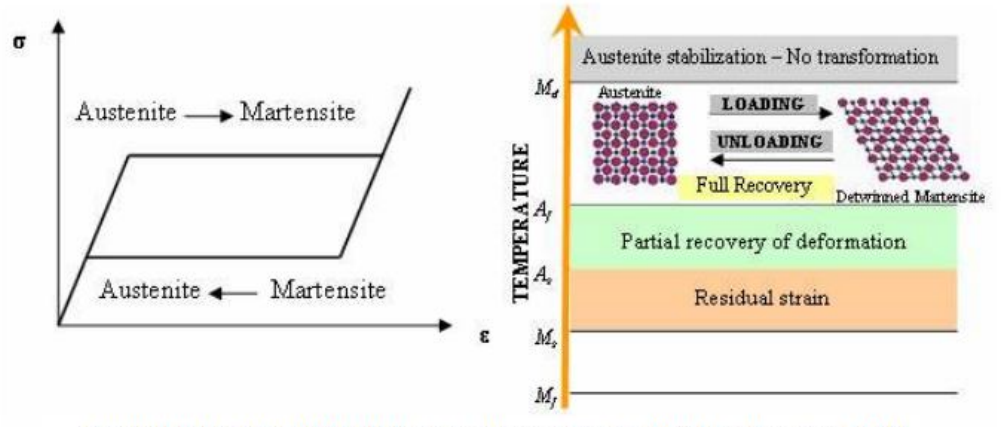




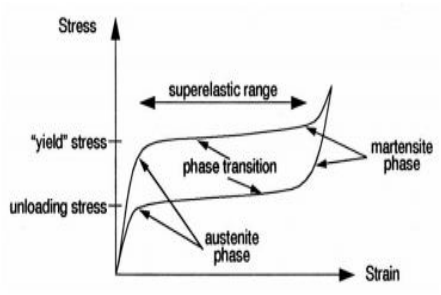




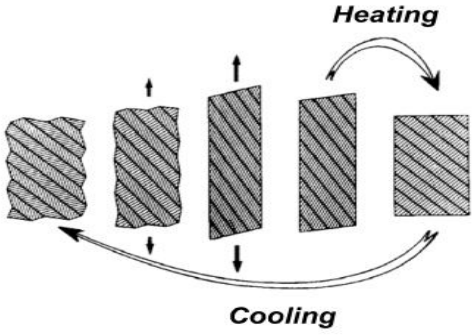
Shape memory effect (SMART Laboratory at Texas A&M University, 2006)



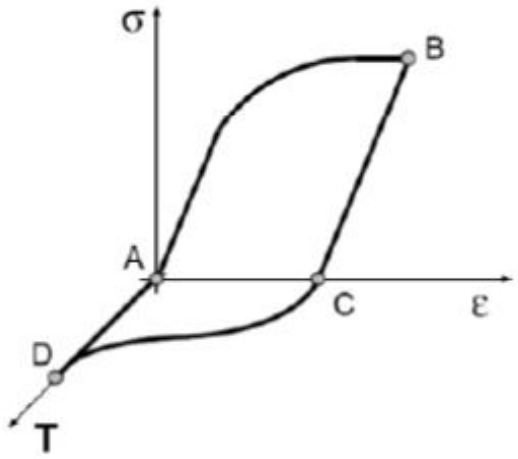
Superelastic effect (SMART Laboratory at Texas A&M University, 2006)



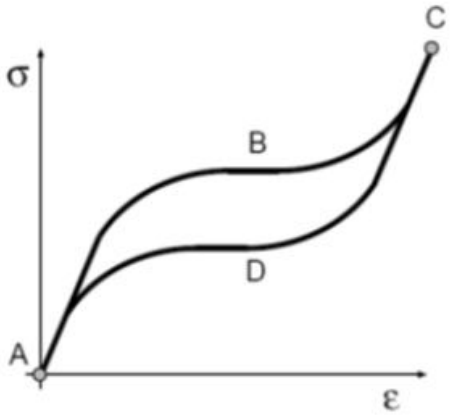
General form of Shape Memory Alloy superelastic behaviour.



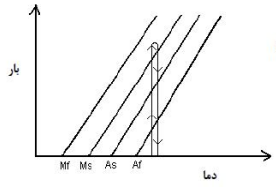
Layer model of a macroscopic material



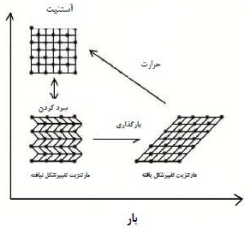
رفتار آلیاژ در حالت مارتنزیت



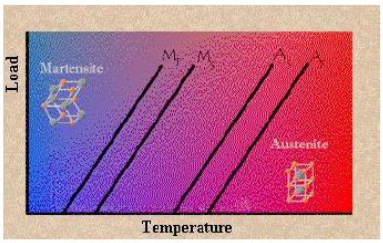
رفتار آلیاژ در حالت آستنیت



نمودار بارگذاری برای اثر فوق‌ارتجاعی



نمودار میکروسکوپی اثر برگشت پذیری



رابطه دمای تغییرفاز با بارگذاری

ویژگی‌های آلیاژهای حافظه دار شکلی

این آلیاژها دارای ویژگی‌هایی مانند: مقاومت به خوردگی بالا- مقاومت ویژه الکتریکی نسبتاً بالا- خواص مکانیکی نسبتاً خوب خستگی طولانی - شکل‌پذیری بالا- قابلیت انطباق با بدن

ساختارهای کریستال

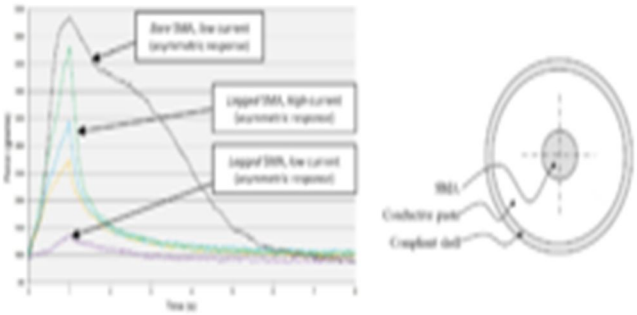
بسیاری از فلزات دارای ساختارهای کریستالی مختلف با ترکیب مشابه هستند، اما اکثر فلزات این اثر حافظه شکل را نشان نمی دهند. خصوصیات خاصی که اجازه می دهد آلیاژهای حافظه شکل به شکل اصلی خود پس از گرمایش بازگردند تغییر شکل بلوری آنها کاملا برگشت پذیر است. در اغلب تحولات کریستال، اتم های موجود در ساختار به وسیله انتشار، از طریق فلز عبور می کنند و ترکیبات را به صورت محلی تغییر می دهند، هرچند فلز به طور کلی از همان اتم ساخته شده است. تحول برگشت پذیر این انتشار اتم ها را شامل نمی شود، بلکه تمام اتم ها در یک زمان تغییر می یابند تا ساختار جدیدی را شکل دهند، به طوری که می توان از یک مربع با یک فشار بر روی دو طرف متضاد ساخته شود. در دماهای مختلف، ساختارهای مختلف ترجیح داده می شوند و زمانی که ساختار از طریق دمای انتقال سرد می شود، ساختار مارتنزیتی از فاز آستنیت تشکیل می شود.

سیستم‌های معمول

تاکنون خواص حافظه‌داری در چند سیستم آلیاژی دیده شده‌است اما اکثر آن‌ها هنگام فعالسازی نیرو یا کرنش بالایی ایجاد نمی‌کنند. دو سیستم آلیاژ حافظه‌دار عمده که هنگام فعالسازی توانایی ایجاد نیروی بالایی در آن‌ها مشاهده شده‌است، عبارتند از سیستم‌های بر پایه مس (مثلاً Cu-Sn, Cu-Zn, Cu-Al) و سیستم‌های بر پایه Ni-Ti (مثلاً نایتینول). خواص حافظه‌داری سیستم‌های سه‌تایی بسیاری بر پایه این سیستم‌های دوتایی بررسی شده‌است.

زمان پاسخ و تقارن پاسخ

محرک های SMA معمولا به صورت الکتریکی عمل می کنند، جایی که جریان الکتریکی به حرارت جول برسد. غلط کردن معمولا به وسیله انتقال حرارت گرما آزاد به محیط محیط انجام می شود. در نتیجه، حرکت SMA معمولا نامتقارن است، با زمان فعال شدن نسبتا سریع و زمان غیر فعال شدن آهسته است. تعدادی از روش ها برای کاهش زمان غیر فعال کردن SMA، از جمله اجباری مجبور، و کاهش مقدار SMA با مواد رسانا برای دستکاری سرعت انتقال حرارت پیشنهاد شده است. روش های نوین برای افزایش امکان اجرای SMA شامل استفاده از "عقب مانده" هدایت می شود. این روش از پودر حرارتی برای انتقال حرارت از SMA به وسیله هدایت استفاده می کند. سپس این گرما به راحتی به محیط زیست منتقل می شود، زیرا شعاع بیرونی (و منطقه انتقال حرارت) به طور قابل توجهی بیشتر از سیم سیم لخت است. این روش باعث کاهش قابل ملاحظه ای در زمان غیر فعال کردن و یک فعالیت فعال متقارن می شود. به عنوان یک نتیجه از افزایش سرعت انتقال حرارت، جریان مورد نیاز برای دستیابی به نیروی محرکه داده شده افزایش می یابد.



واکنش نیروی زمان نسبت به آلیاژ حافظه شکل نیافته و عقب مانده

آلیاژهای حافظه داری شکلی بر پایه آهن (Iron – based SMAs)

امروزه آلیاژهای حافظه دار شکلی بر پایه آهن به خصوص آلیاژهای از نوع Fe-Mn-Si به دلیل دارا بودن پتانسیل زیاد برای کاربرد در سازه ها توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده اند. سختی بیشتر ، هیسترزیس گرمایی بزرگ تر و هزینه کمتر Fe-SMA نسبت به Ni-Ti ، باعث برتری این آلیاژ در زمینه ساخت و ساز گردیده است. Fe-SMA هم چنین دارای مقاومت خوردگی خوب ، قابلیت کارپذیری کافی و ویژگی های جوش پذیری مناسب می باشد. کاربرد Fe-SMA به ویژه برای اعمال پیش تنیدگی در سازه ها بسیار مفید است. استفاده از اثر حافظه شکلی برای پیش تنیده کردن سازه مزیت های زیادی نسبت به روش های قدیمی تر پیش تنیدگی دارد از جمله اینکه به دلیل توزیع یکنواخت نیروی کششی در طول تاندون پیش تنیدگی از طریق مهار شدن در بتن ، کاهش نیروی پیش تنیدگی وجود ندارد و روشی مناسب برای پیش تنیده کردن اعضای بتنی منحنی شکل می باشد. هم چنین بر خلاف FRP نیاز به لوله های پیش تنیدگی و مهار کردن تاندون ها و جک های هیدرولیکی بزرگ و فضای وسیع لازم برای این جک ها نیست.

در سال ۱۹۸۲ رفتار حافظه شکلی در آلیاژهای Fe-Mn-Si شناخته شد. از آن زمان به بعد آلیاژهای حافظه دار شکلی بر پایه آهن با خاصیت حافظه دار شکلی بهبود یافته ، توسعه پیدا کرده اند. با توجه به روند توسعه این آلیازها ، پیش بینی می شود که قیمت Fe-SMA در سال های آینده بسیار کمتر از قیمت کنونی آن شده و بیش از پیش برای استفاده در صنعت ساختمان مناسب گردند.

تبدیلات فازی رفتار آلیاژهای Fe-Mn-Si

شکل زیر تبدیلات دو فاز آستنیت و مارتنزیت به هم را در اثر اعمال دما و تنش در یک نوع آلیاژ Fe-Mn-Si نشان می دهد. مطابق این شکل وقتی آستنیت تا دمایی کمتر از Mf سرد می شود ، تبدیل آستنیت به مارتنزیت ، بر خلاف آلیاژهای ترموالاستیک که تبدیل مارتنزیتی کامل دارند ، به صورت کامل انجام نمی گیرد (مسیر ۱ در قسمت الف شکل زیر). علاوه بر این ، گونه های مارتنزیت ایجاد شده در اثر دما را نمی توان به سادگی با اعمال تنش تغییر داد. به همین دلیل ، تبدیل مارتنزیت پیچ خورده به مارتنزیت پس پیچ خورده در دمایی کمتر از Mf یا Ms (مسیر ۲ در قسمت الف شکل زیر) عموما مورد نظر مهندسان نیست. با

این وجود ، اگر دمای اولیه /الیاژ بین As و Ms باشد ، مارتنزیت ایجاد شده تحت تنش قابل دستیابی است (مسیر ۲ در قسمت ب شکل زیر) ؛ اگر چه باز هم تبدیل آستنیت به مارتنزیت ، کامل صورت نمی گیرد. طی باربرداری (مسیر ۳ در قسمت ب شکل زیر) ، تبدیل مارتنزیتی معکوس رخ نمی دهد زیرا که در این ناحیه هر دو فاز پایدارند. هر چند در برخی موارد ، مقداری اثر فوق الاستیک بسته به دمای محیط ، مشاهده شده است که نشان دهنده مقدار جزئی تغییر فاز طی باربرداری است. این محدوده دمایی به دلیل بزرگ بودن هیسترزیس گرمایی Fe- SMA ، نسبتا گسترده می باشد. گرم کردن آلیاژ تا دمای بالای Af (مسیر ۴ در قسمت ب شکل زیر) باعث تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت خواهد شد که عامل اصلی در ایجاد تنش و کرنش بازگردانی است. ذکر این نکته ضوری است که در این مرحله همه کرنش اولیه قابل بازگشت نخواهد بود.

رفتار فوق الاستیک در آلیاژهای Fe-Mn-Si مشاهده نمی شود زیرا با اعمال تنش به این آلیاژها در دمایی بالاتر از Af ، به طور غیر قابل بازگشت پلاستیک می شوند (مسیر ۷ در قسمت ج شکل زیر). با این حال امروزه انواعی از Fe-SMA با خاصیت فوق الاستیک نظیر Fe-29Ni-18Co-5A1-8Ta-0.01B و Fe-36Mn-8Al-8.6Ni تولید شده اند.

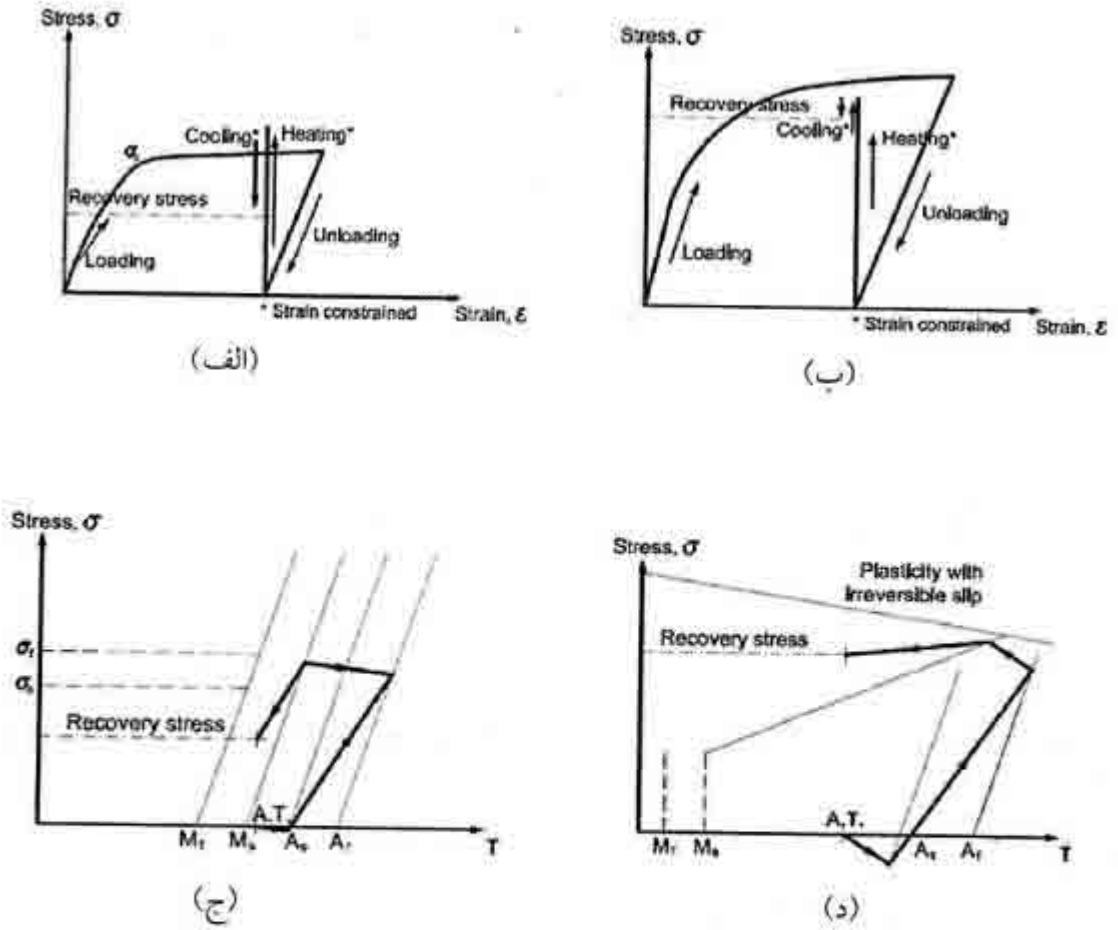
تنش بازگردانی آلیاژ Fe-Mn-Si

هنگام استفاده از تاندون ای پیش تنیده Fe-SMA ، اندازه تنش بازگردانی نقش اساسی در کارایی تاندون ها دارد. عمل آوری مکانیکی تاثیر بسزایی در افزایش مقدار تنش بازگردانی دارد. دیگر عوامل موثر بر اندازه تنش بازگردانی عبارتند از : مقدار کرنش بازگدانی ، ترکیب آلایژ ، ریز ساختار آلیاژ همچون اندازه دانه ها و مقدار و نحوه توزیع ذرات زیر ، حضورت رسوبات VN یا VC.

مقایسه تنش بازگردانی دو آلیاژ Fe-Mn-Si و Ni-Ti

در شکل زیر نمودار تنش – کرنش در آلیاژهای Ni-Ti و Fe-Mn-Si هنگام تولید تنش بازگردانی و مسیر حرارتی – مکانیکی متناظر با این نمودارها ارائه شده است. در آلیاژ Ni-Ti با پیش کشیده کردن مارتنزیت پیچ خورده ، مارتنزیت پس پسچ خورده حاصل می شود. همان طور که در توضیح رفتار حافظه شکلی نیز ذکر شد ، این کرنش ایجاد شده با بارداری قابل بازگشت نمی باشد. از آنجایی که آلیاژ مقید شده است ، هنگام اعمال حرارت به آلیاژ در آن تنش بازگردانی تولید می شود. تنش بازگردانی ایجاد شده ممکن است از مقدار تنش لازم برای تولید مارتنزیت پس پیچ خورده بزرگتر باشد به این دلیل که انرژی لازم برای تبدیل فاز از انرژی لازم برای تغییر ساختار مارتنزیت بیشتر است. با این وجود از آنجایی که Ni-Ti هیسترزیس گرمایی باریک دارد ، هنگام سرد شدن آلیاژ و با رسیدن به دمای آغاز مارتنزیت ، آستنیت به مارتنزیت تبدیل شده و تنش بازگردانی کاهش می یابد. لازم به ذکر است که افزایش تنشی که در نمودار تنش – دما بلافاصله پس از سرد شدن آلیاژ مشاهده می گردد ، به دلیل انقباض حرارتی آلیاژ می باشد. در صورت استفاده از آلیاژ Ni-Ti به عنوان تاندون پیش تنیده ، برای جلوگیری از کاهش تنش بازگردانی باید Af آلیاژ از دمای محیط کمتر باشد. در این گونه موارد پیش کشیدگی در د مای کمتر از Mf انجام شده و آلیاژ توسط نیتروژن مایع در دمایی کمتر از As نگه داری می شود. در آلیاژ Fe-Mn-Si پیش کشیدگی عموما در دمای اتاق انجام شده و تبدیل آستنیت به مارتنزیت پس پیچ خورده مستقیما و بدون تشکیل مارتنزیت پیچ خورده انجام می شود. با گرم کردن آلیاژ ، ابتدا تنش به دلی انبساط گرمایی مقداری کاهش می یابد که البته این مقدار با افزایش تنش ناشی از انقباض خنثی خواهد شد. سپس با رسیدن به دمای As و آغاز تبدیل فاز ، تنش شروع به افزایش می کند. هیسترزیس گرمایی بزرگ Fe-Mn-Si موجب می شود که کاهش تنش بازگردانی ناشی از سرد شدن آلیاژ Fe-Mn-Si ، قابل توجه نباشد.محدوده دمایی در نظر گرفته شده در طراحی برای سازه های قرار گرفته در محیط خارجی بین ۲۰- درجه سانتی گراد در زمستان تا ۶۰ درجه سانتی گراد می باشد.

SMA مورد استفاده باید در این دما پایدار بوده و تغییر فاز ندهد. توجه به اینکه و آن چه که ذکر شد این نتیجه حاصل می شود که آلیاژهای با هیسترزیس گرمایی بزرگ باید برای کاربردهای پیش تنیدگی مورد استفاده قرار گیرند.



شکل‌گیری تنش بازگردانی در آلیاژهای Ni-Ti و Fe-Mn-Si : (الف) نمودار تنش–کرنش Ni-Ti هنگام اعمال پیش‌کشیدگی و شکل‌گیری تنش بازگردانی (ب) نمودار تنش–کرنش Fe-Mn-Si هنگام اعمال پیش‌کشیدگی و شکل‌گیری تنش بازگردانی (ج) مسیر حرارتی–مکانیکی طی گرم شدن و سرد شدن آلیاژ Ni-Ti مقید شده (د) مسیر حرارتی–مکانیکی طی گرم شدن و سرد شدن آلیاژ Fe-Mn-Si مقید شده

خواص مکانیکی آلیاژهای حافظه دار شکلی SMA

مطالعات انجام شده بر روی خواص مکانیکی آلیاژهای حافظه دار شکلی تحت بارگذاری های ترمودینامیکی نشان داده که ویژگی های مکانیکی آلیاژهای حافظه دار شکلی به عوامل زیادی مانند ابعاد نمونه ، نسبت ترکیب در آلیاژ ، فرایند ساخت ، نرخ بارگذاری ، دما و تعداد بارگذاری چرخه ای بستگی دارد. در جدول زیر مقادیر تقریبی خواص مکانیکی برای چهار نوع SMA ارائه شده است.

خواص مکانیکی چهار نوع SMA

خاصیت	واحد	Ni-Ti	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni	Fe-Mn-Si-Cr
مدول الاستیسیته					
آستنیت	GPa	۷۰–۹۸	۷۰–۱۰۰	۸۰–۱۰۰	۱٤۰
مارتنزیت		۲۸	۷۰	۸۰	
تنش تسلیم					
آستنیت	MPa	۱۰۰–۸۰۰	۱۵۰–۳۵۰	۱۵۰–۳۰۰	۲۰۰
مارتنزیت		۵۰–۳۰۰	۸۰–۳۰۰	۱۵۰–۳۰۰	
مقاومت کششی نهایی					
آستنیت	MPa	۸۰۰–۱۵۰۰	٤۰۰–۹۰۰	۵۰۰–۱۲۰۰	
مارتنزیت		۷۰۰–۲۰۰۰	۷۰۰–۸۰۰	۱۰۰۰–۱۲۰۰	٦۵۰
تغییر طول گسیختگی					
آستنیت	%	۱۵–۲۰			
مارتنزیت		۲۰–٦۰	۱۰–۱۵	۸–۱۰	۲۹
کرنش بازگردانی	%	۸	۳/۵	۲	۳٫٤
حداکثر تنش بازگردانی	MPa	٦۰۰–۹۰۰	٤۰۰–۷۰۰	۳۰۰–٦۰۰	٤۰۰
مقاومت خستگی ($N=10^6$)	MPa	۳۵۰	۲۷۰	۳۵۰	–
مقاومت الکتریکی[1]	$\Omega.m .10^{-6}$	۰٫۵–۱٫۱	۰٫۰۷–۰٫۱۳	۰٫۱–۰٫۱٤	۱٫۰–۱٫۳
نسبت قیمت[2]	-	۱۰–۱۰۰	۱–۱۰	۲–۲۰	–

[1] بسته به فاز مارتنزیت یا آستنیت ممکن است تغییر کند.

[2] شکل و مقدار ماده مصرفی به شدت بر این نسبت اثرگذار است.

مقاومت خستگی SMA

مسئله خستگی هنگامی که عملکرد بلند مدت و بارگذاری های چرخه ای مطرح می شود ، اهمیت می یابد. در بررسی عملکرد خستگی SMA دو نوع خستگی سازه ای (مکانیکی) و خستگی حافظه شکلی باید مد نظر قرار گیرد. خستگی سازه ای به دلیل تجمع نقص های ریز ساختار و رشد و گسترش ترک های سطحی تا گسیختگی ماده می باشد. در حالی که خستگی حافظه شکلی به معنای کاهش خاصیت حافظه شکلی یا کاهش ظرفیت میرایی ناشی از تغییر ریز ساختار است. خستگی حافظه شکلی با اصلاح نمودارهای تنش کرنش در بارگذاری چرخه ای و تغییر دماهای تبدیل ، در نظر گرفته می شود. نوع بارگذاری ، ترکیب آلیاژ ، ابعاد نموده ، ریز ساختار و کیفیت سطح از عوامل موثر بر مقاومت خستگی هستند. مقاومت مکانیکی زیاد آستنیت و مارتنزیت باعث بهبود مقاومت خستگی می شود. آلیاژهایی چون آلیاژهای حافظه دار شکلی بر پایه آهن که فاز آستنیت آن ها مدول الاستیسیته کمتری دارند ، مقاومت خستگی بهتری از خود نشان می دهند. باید توجه داشت که برای جلوگیری از گسیختگی ناشی از خستگی در تعداد زیاد چرخه های بارگذاری ، لازم است که کرنش ماده کوچک باشد

خستگی ساختاری و خستگی عملکردی

SMA مستلزم خستگی ساختاری است - حالت شکست که توسط آن بارگذاری چرخه ای باعث آغاز و انتشار یک کرک می شود که در نهایت منجر به از دست رفتن عملکرد فاجعه بار توسط شکست می شود. فیزیک در این حالت خستگی، تجمع آسیب های میکرو سازنده در هنگام بارگذاری سیکل است. این حالت شکست در اغلب مواد مهندسی، نه فقط SMA ها مشاهده می شود. SMA نیز به خستگی عملکردی منجر می شود، حالت شکست در انواع مواد مهندسی معمول نیست، بدین معنی که SMA به صورت ساختاری شکست نمی خورد، اما در طول زمان ویژگی های شکل / حافظه فوق العاده اش را از دست می دهد. در نتیجه بارگذاری چرخه ای (هر دو مکانیکی و حرارتی)، ماده از توانایی خود برای تبدیل یک فاز برگشت پذیر به دست می آید. به عنوان مثال، جابه جایی کار در یک محرک با افزایش تعداد چرخه کاهش می یابد. فیزیک پشت این تغییرات تدریجی در ریزساختار است، به طور خاص، ایجاد اختلالات لغزش محل اقامت. این اغلب با تغییر قابل توجهی در دماهای تغییرات همراه است. طراحی سازندهای SMA همچنین ممکن است بر خستگی ساختاری و عملکردی SMA، مانند تنظیم پله در سیستم SMA-Pulley، تأثیر بگذارد.

راه اندازی ناخواسته

محرک های SMA معمولا توسط جول حرارت دادن الکتریکی عمل می کنند. اگر SMA در محیطی که درجه حرارت محیط کنترل نشده است استفاده شود، ممکن است ناخواسته از طریق گرمای محیط رخ دهد.

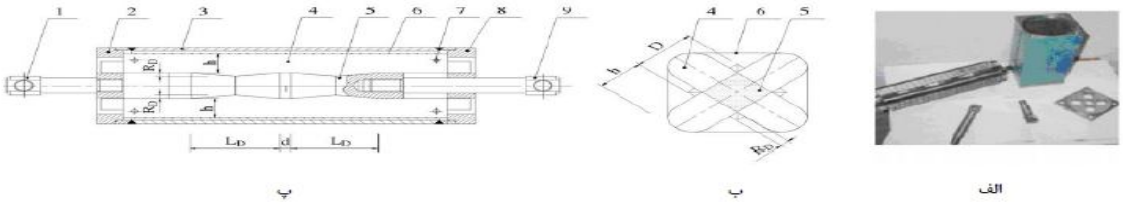
مزایا و معایب آلیاژهای شکل پذیر فوق ارتجاعی

برخی از مزایای آلیاژهای شکل پذیر فوق ارتجاعی سازگاری با محیط، تنوع استفاده در زمینه های مختلف و مشخصه های مکانیکی مناسب و مطلوب بالا و خاصیت ضد خوردگی می باشد و همچنین برخی از مشکلات آنها گران بودن این مواد در مقایسه با مواد دیگر نظیر فولادوآلومینیم و اکثر SMA ها از لحاظ خستگی عملکرد خوبی ندارند و تحت شرایط بارگذاری یکسان یک عضو فولادی ۱۰۰ برابر سیکل رفت و برگشتی بیشتری از یک عضو SMA تحمل می کند ، دماهایی که ساختار کریستالی SMA ها بر اساس آن تغییر می کند به خصوصیات آلیاژها مربوط می شود و می توان با تغییر دادن نسبت عناصر آن را تنظیم نمود

ساختار میراگر فوق ارتجاعی SMA

اجزای اصلی عبارتند از ۱-پوسته ۲-قطعه لغزشی خارجی ۳-قطعه لغزشی داخلی ۴- درپوش ۵- سیمهای SMA پوسته جهت تحمل نیروهای عقب و جلورفتن میله و حفظ قسمت داخلی میراگر می باشد. قطعه های لغزشی خارجی از چهار قطعه لغزشی تشکیل شده اند. یک قسمت آنها بصورت انحنادار می باشد و بگونه ای طراحی شده است که سیمهای SMA رادر بر می گیرد و قسمت دیگر محدب می باشد. تنها یک قطعه لغزشی داخلی وجود داردکه به میله سمت راست متصل شده است.چهار وجه قطعه لغزشی داخلی به صورت مقعر می باشد که شیاری را ایجاد می کند قسمت مقعر و محدب به صورت نر و مادگی می باشد تا در نتیجه آن حرکت نسبی قائم بین قطعه لغزشی داخلی و خارجی انجام گیرد،وجه بین قطعه لغزشی داخلی و خارجی به صورت اصطکاکی زبر می

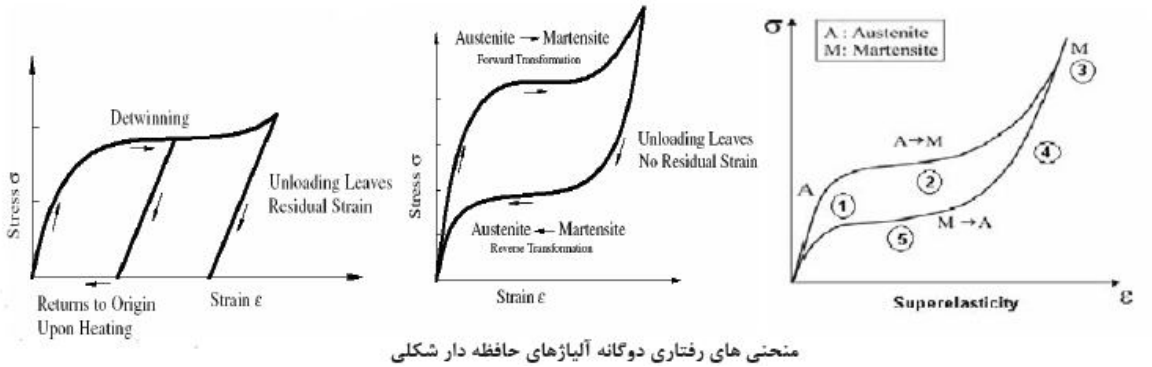
باشد



ساختار میراگر SMA . الف) تصویر میراگر SMA . ب) رابطه بین سیم های SMA و قطعه های لغزشی داخلی و خارجی . پ)اجزای میراگر SMA. (۱) میله سمت چپ . (۲) درپوش سمت چپ . (۳) پوسته. (۴) قطعه لغزشی خارجی. (۵) قطعه لغزشی داخلی. (۶) سیم های SMA . (۷) زبانه قفل . (۸) درپوش سمت راست . (۹) میله سمت راست .

اصول عملکرد میراگر

هنگامی که میراگر SMA برروی سازه نصب می شود،با اعمال نیروی وارده در میله های کششی میراگر که به سازه متصل شده اند،حرکت نسبی مشاهده می گردد. این حرکت باعث عقب و جلو رفتن قطعه های لغزشی داخلی شده و منجر به حرکت نسبی محوری و قائم به ترتیب در قطعه های داخلی و خارجی می شود. هنگامی که جابجایی نسبی بین

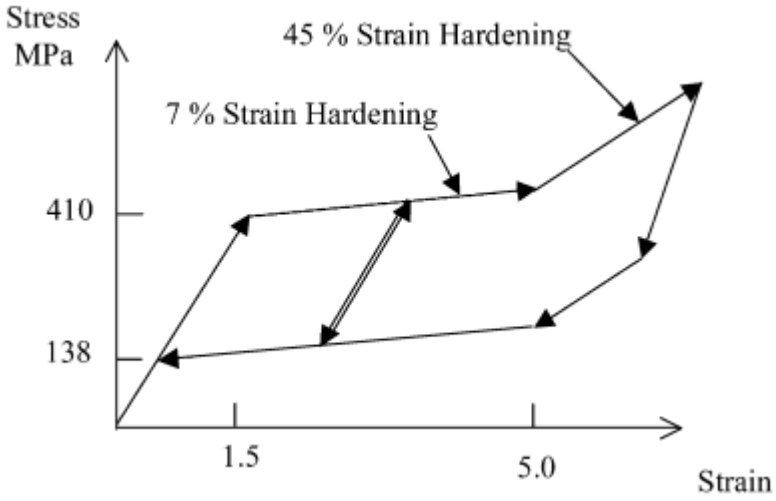


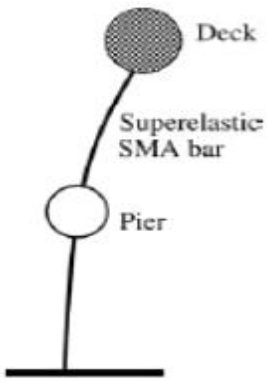
منحنی های رفتاری دوگانه آلیاژهای حافظه دار شکلی

طراحی ارتجاعی در برابر زلزله های شدید غیر اقتصادی بوده بنابراین اکثر آیین نامه های اخیر زلزله به دنبال عملکرد غیر ارتجاعی سازه ها به منظور جذب بخشی از انرژی ناشی از زلزله هستند، تمام سیستمهای مستهلک کننده انرژی دارای مشکلاتی از قبیل عمر کم ، خستگی ، سختی نصب، احتیاج به تغویض پس از زلزله و اعمال تغییر در هندسه سازه پس از وقوع زلزله می باشند اما آلیاژ حافظه دار شکلی مواد هوشمندی هستند که مشکلات و محدویتها را ندارند و خواص منحصر به فرد آنها در تبدیل فاز برگشت پذیر مارتنزیت که یک فرایند تبدیل فاز جامد به جامد بین فاز استنیت با ساختار بلوری منظم تر از مارتنزیت می باشد این تبدیل فازها می تواند در اثر اعمال حرارت و تنش رخ دهد. مار پیچهای یا وایرهای SMA نقش فوق العاده در افزایش محصور شدگی و تقویت ستونهای بتنی دارد .

جدول - مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار شکلی بکار رفته در مدل

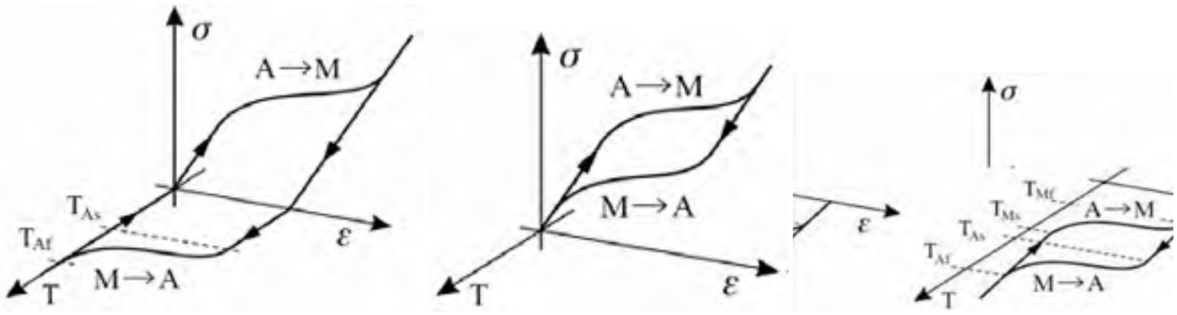
مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار شکلی	مقدار
مدول الاستیسیته (GPa)	۱۰
تنش ورود از رفتار آستنیت به مارتنزیت (MPa)	۲۰۰
تنش اتمام رفتار تبدیل از آستنیت به مارتنزیت (MPa)	۳۰۰
تنش آغاز مجدد رفتار آستنیت(تبدیل از مارتنزیت) (MPa)	۲۰۰
تنش اتمام روند تبدیل از رفتار مارتنزیت به آستنیت (MPa)	۱۰۰
محدوده کرنش‌ها برای رفتار پایدار سوپرالاستیک (%)	۹
وزن مخصوص (kN/m^3)	۶۵

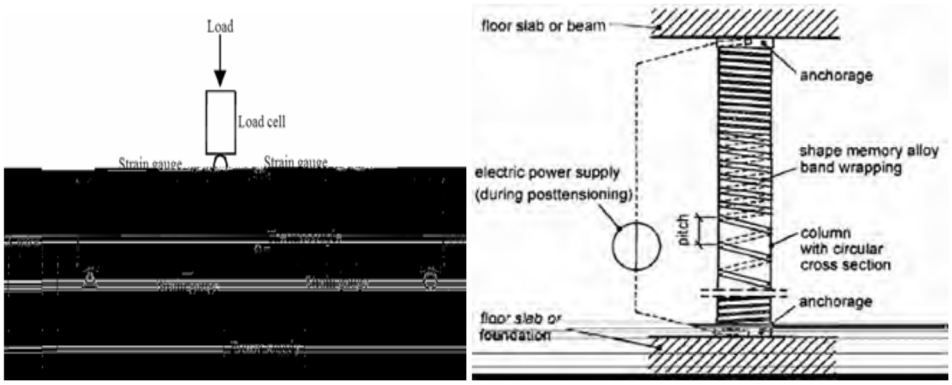




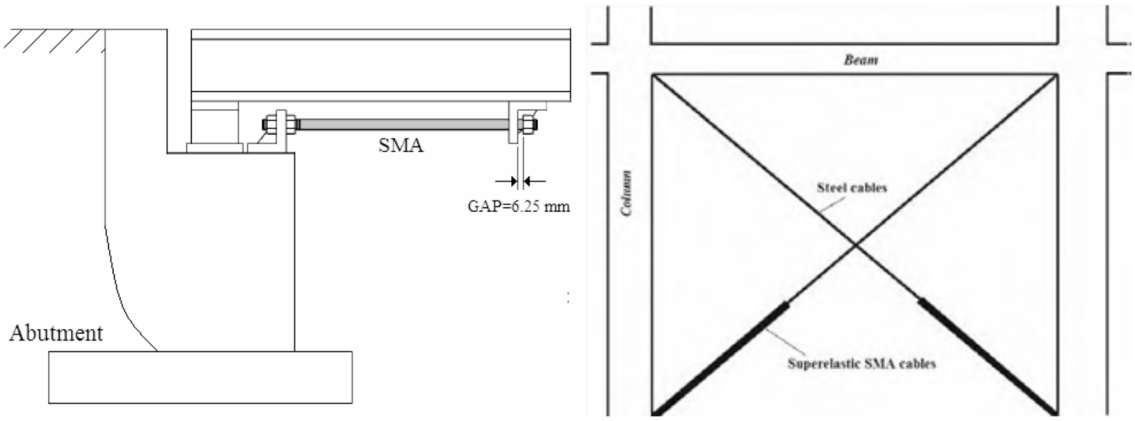
شماتیک دستگاه جداساز SMAدر پلهای بزرگراهی

SMA cable restrainer with the effective length of 1.16 m used as a retrofitting device



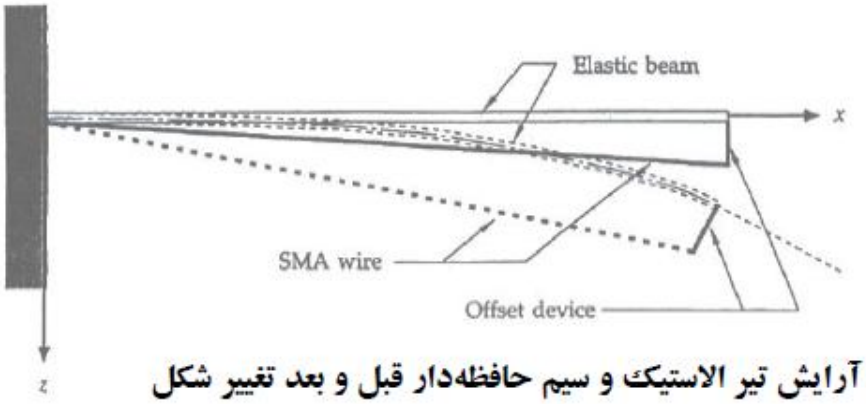


Active Confinement of a concrete column with a prestressed shape memory alloy wrapping for retrofitting purposes

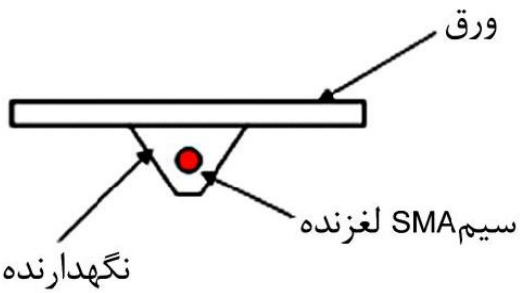


Schematic of the SMA braces for a frame structure

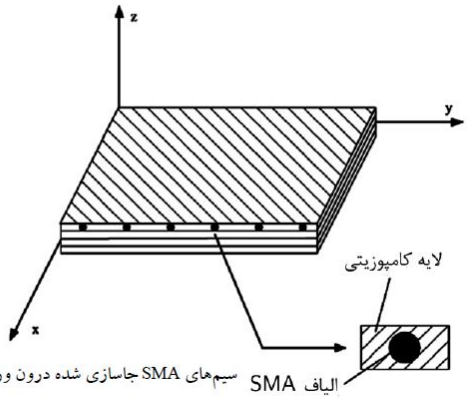
Schematic of the setup of SMA restrainer for a simple-supported bridge



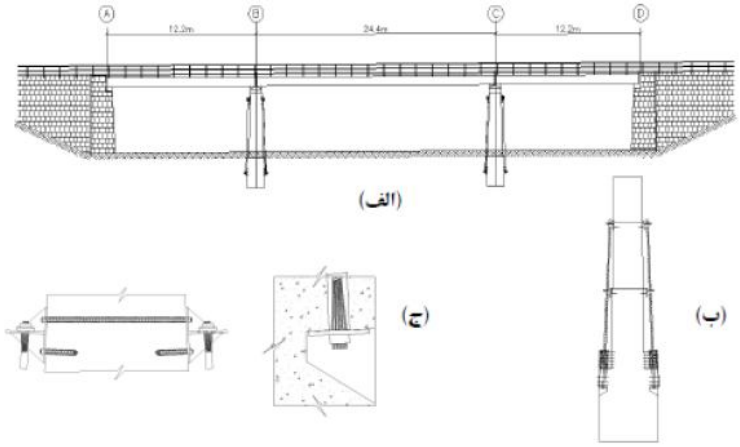
آرایش تیر الاستیک و سیم حافظه‌دار قبل و بعد تغییر شکل



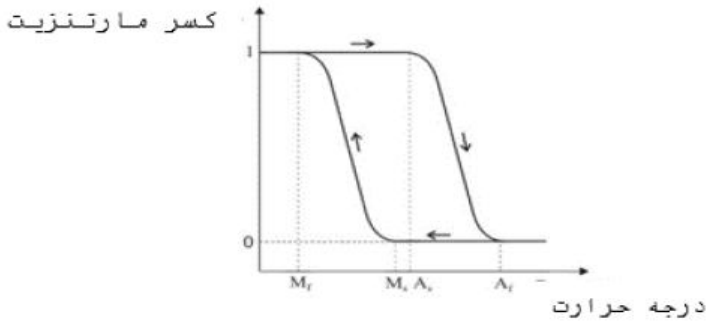
استقرار سیم‌های SMA در صفحه‌ی جداگانه نسبت به ورق کامپوزیت



سیم‌های SMA جاسازی شده درون ورق کامپوزیت



نمایی از پل مدلسازی شده بهمراه کابل های پس کشیده (الف)- نحوه اتصال کابلهای مهاری پس کشیده (ب و ج)



رفتار آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در حالت بدون تنش و تحت تأثیر تغییرات دما

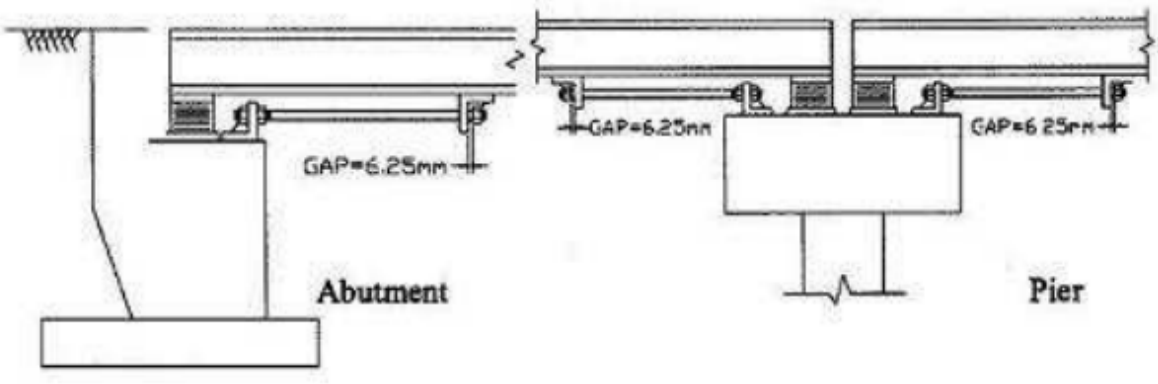
جدول - مقایسه میزان جذب انرژی سازه در سیستمهای مهاربندی بکار برده شده تحت حداکثر شتاب ۰/۶g

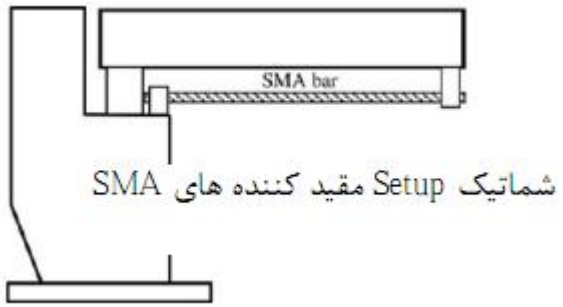
نوع مدل	میزان جذب انرژی (KN.m)	DOE (بر حسب درصد)
سیستم مهاربندی SMA 0% و Steel 100%	453	0 %
سیستم مهاربندی SMA 20% و Steel 80%	454.8	41%
سیستم مهاربندی SMA 40% و Steel 60%	456	66%
سیستم مهاربندی SMA 60% و Steel 40%	456.4	76%
سیستم مهاربندی SMA 100% و Steel 20%	457.4	99%
سیستم مهاربندی SMA 100% و Steel 0%	457.5	100 %

$$DOE = \frac{E_M - E_{ST}}{E_{SMA} - E_{ST}}$$

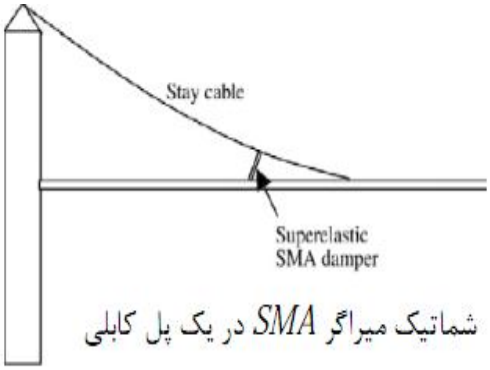
جدول - مقایسه تغییرمکان باقی مانده سازه در سیستمهای مهاربندی بکار برده شده تحت حداکثر شتاب ۰/۶g

مدل مورد نظر	تغییرمکان باقی مانده در سازه (mm)	DOD (برحسب درصد)
سیستم مهاربندی SMA 0% و Steel 100%	6.93	0 %
سیستم مهاربندی SMA 20% و Steel 80%	1.52	89%
سیستم مهاربندی SMA 40% و Steel 60%	1.12	95%
سیستم مهاربندی SMA 60% و Steel 40%	0.94	98%
سیستم مهاربندی SMA 80% و Steel 20%	0.85	99.9%
سیستم مهاربندی SMA 100% و Steel 0%	0.84	100 %

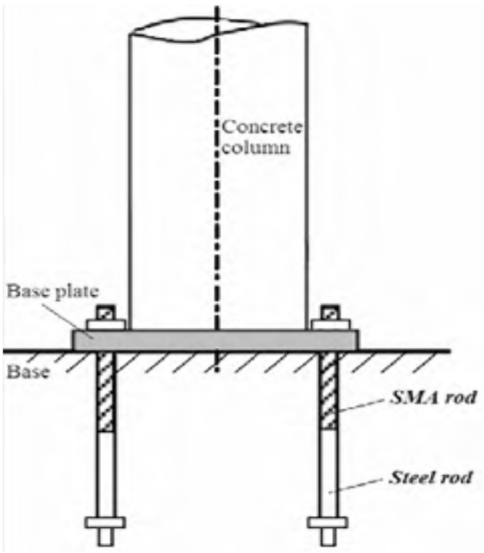




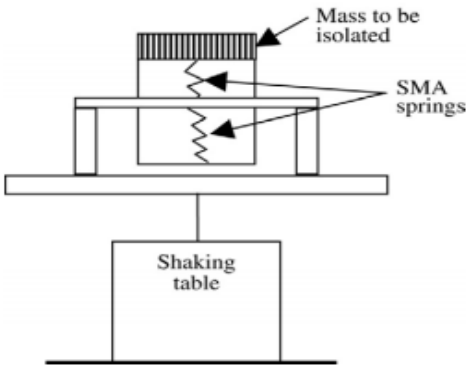
شماتیک Setup مقید کننده های SMA

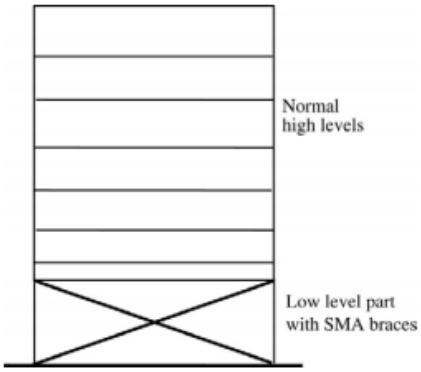


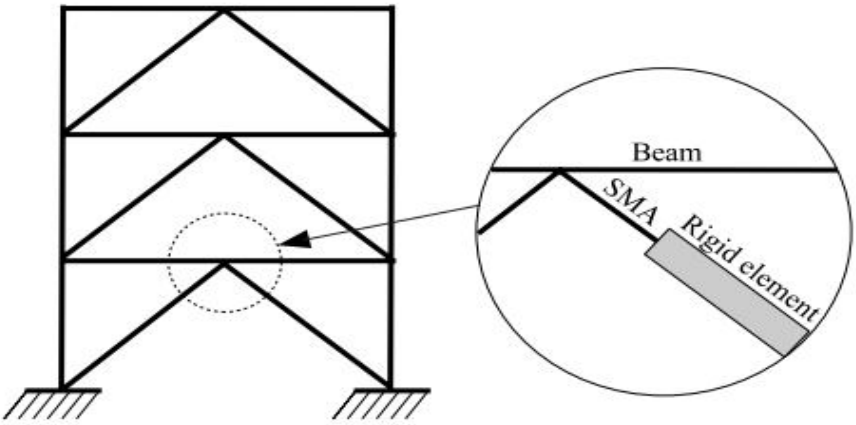
شماتیک میراگر *SMA* در یک پل کابلی

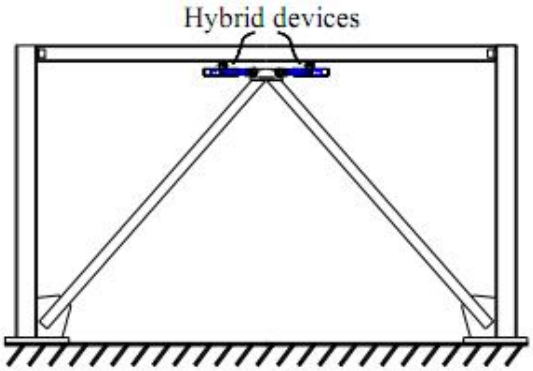


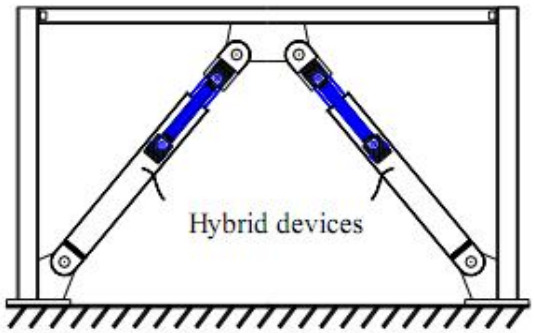
Schematic of SMA bar anchorage for a Column

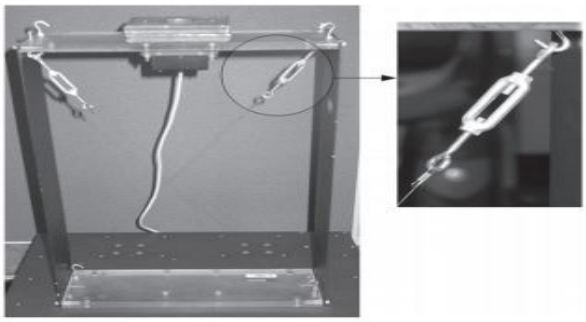

Mass to be isolated
SMA springs
Shaking table

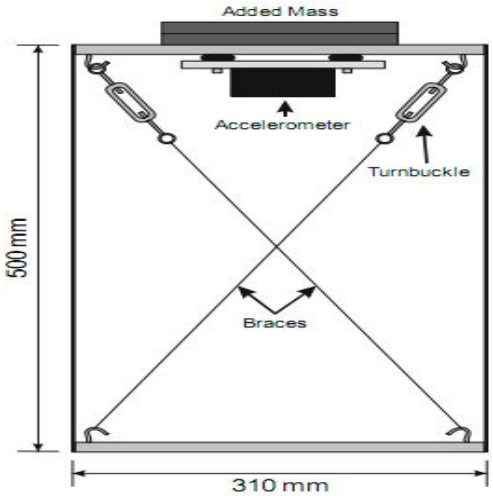

Normal high levels
Low level part with SMA braces

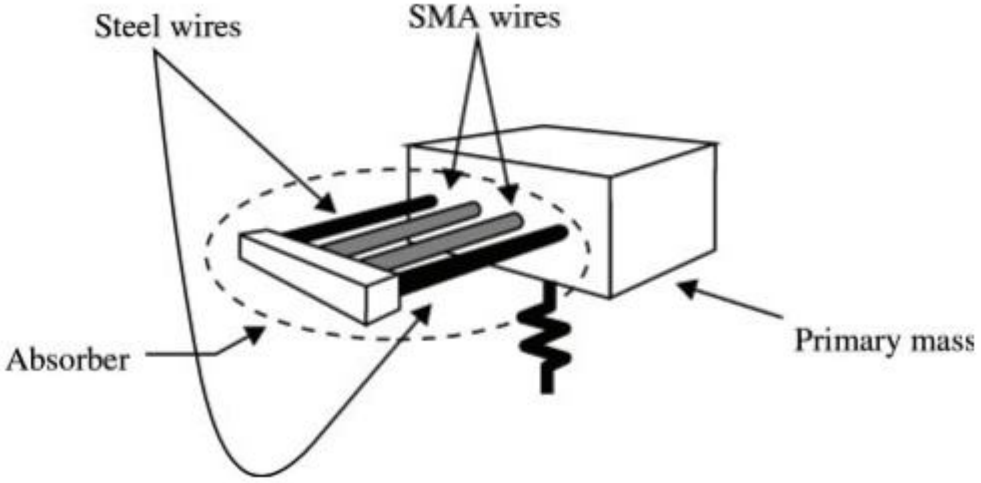

Beam
SMA
Rigid element

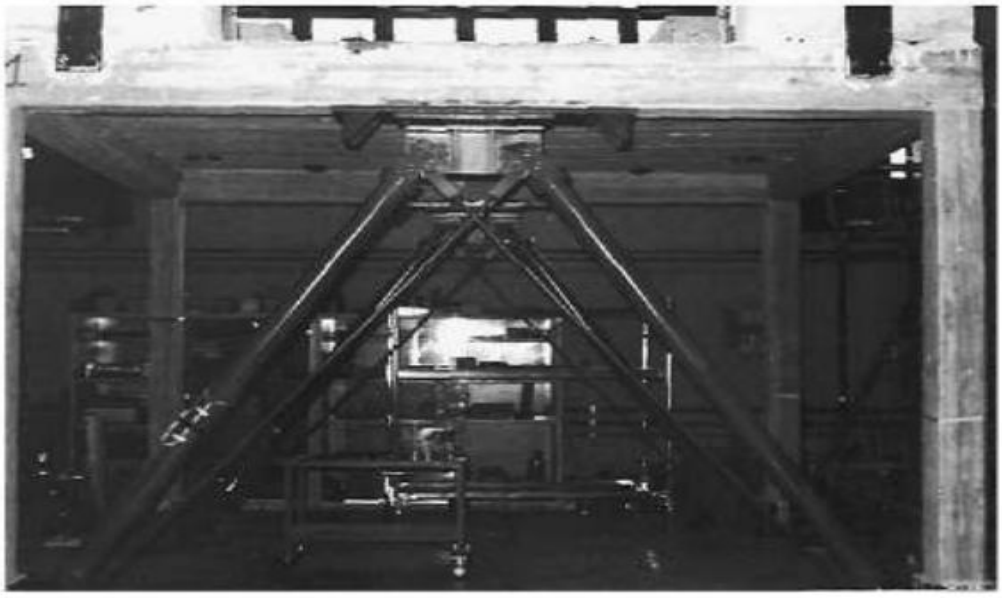

Hybrid devices


Hybrid devices

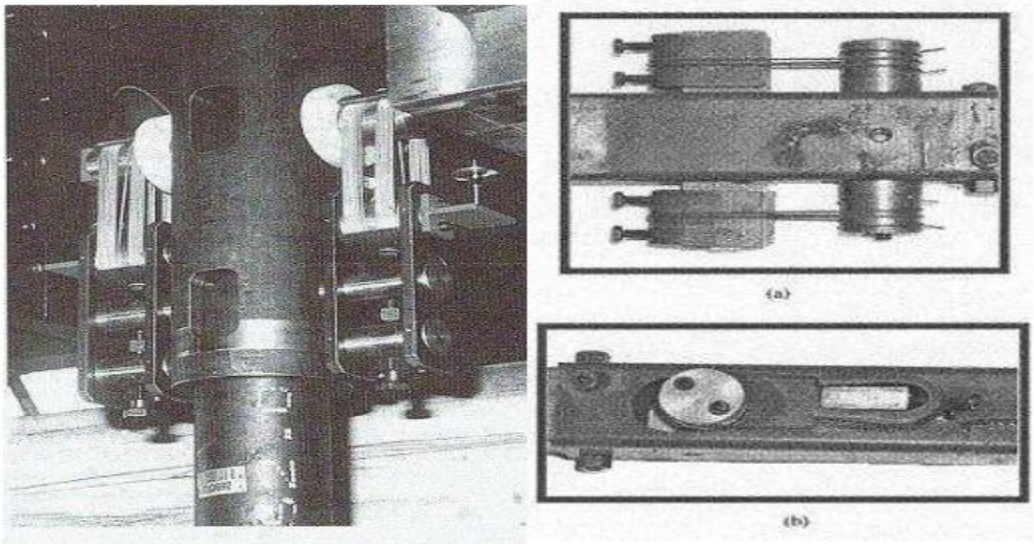


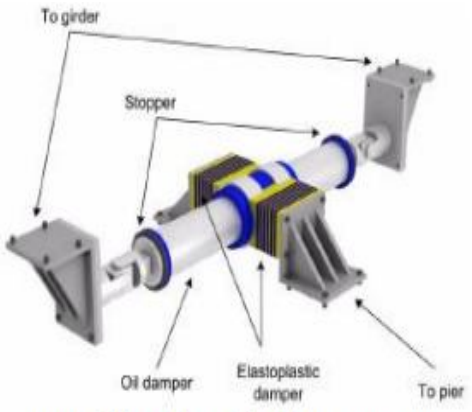

Added Mass
Accelerometer
Turnbuckle
Braces
500 mm
310 mm



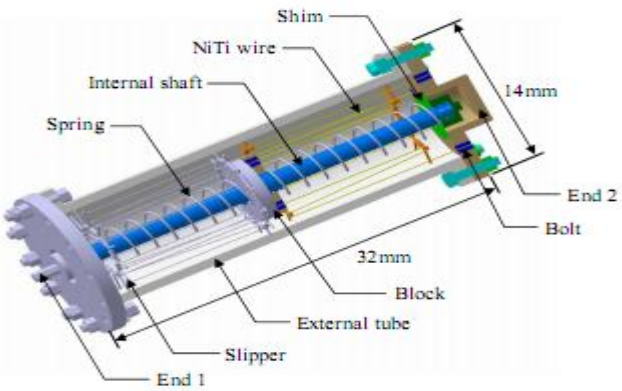


Reinforced concrete frame with SMAD bracing system



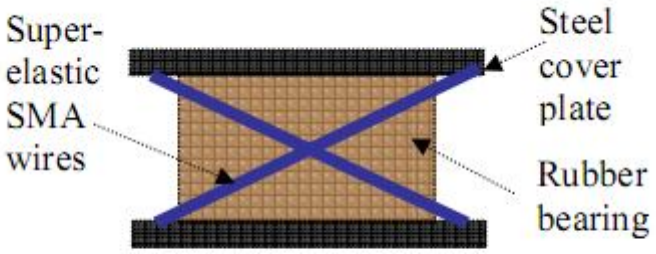


composition of complex damper system

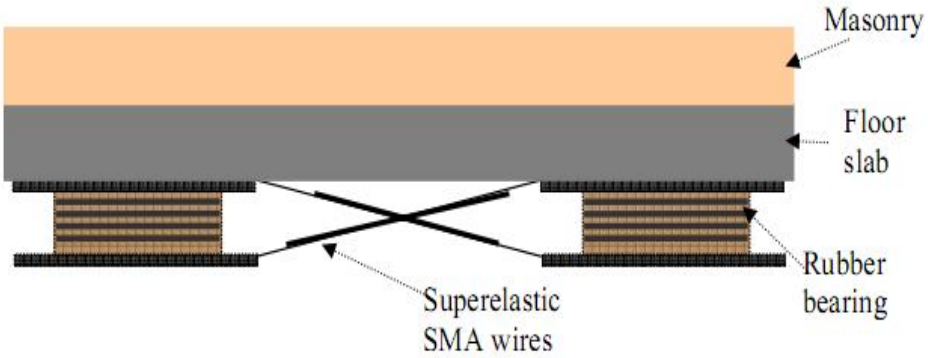


The prototype of SMA damper.

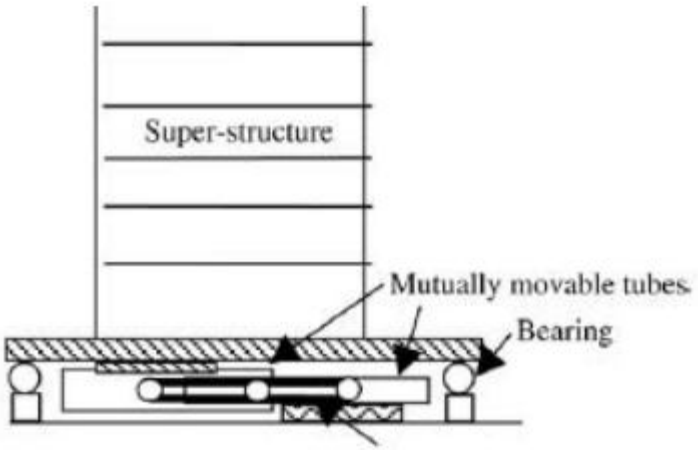
The installation of SMA wires.



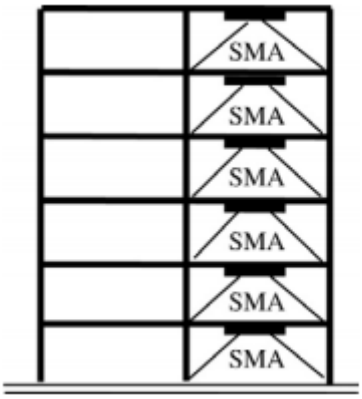
Hybrid HDRB+SMA configuration (HDRB+SMA1)



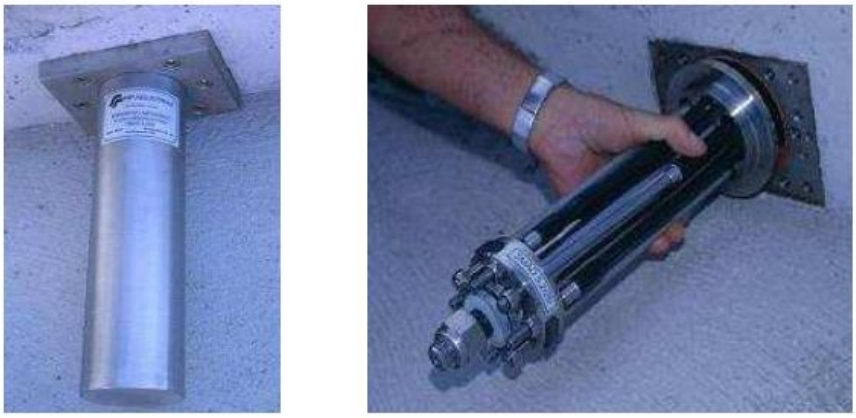
Hybrid HDRB+SMA alternative configuration (HDRB+SMA2)



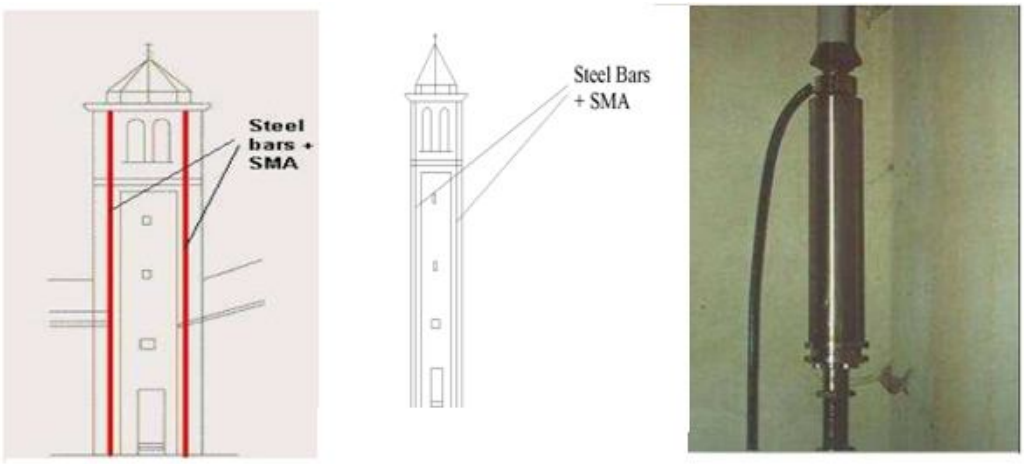
شماتیک سیستم جداساز SMAدر ساختمانها



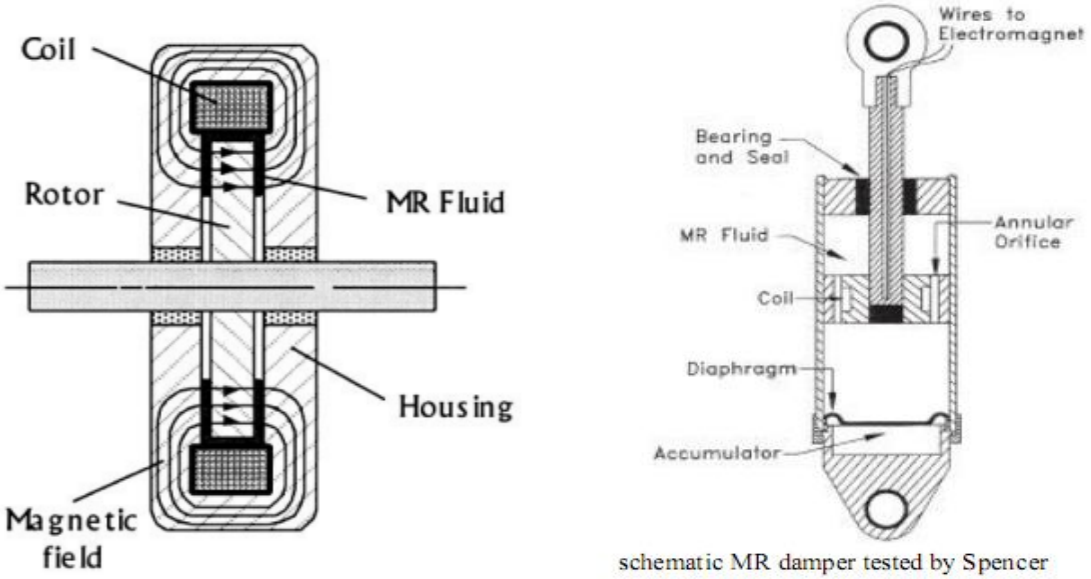
The smart beam-to-column connection



Seismic retrofit of the Basilica of San Francesco in Assisi: particular of the SMA devices.

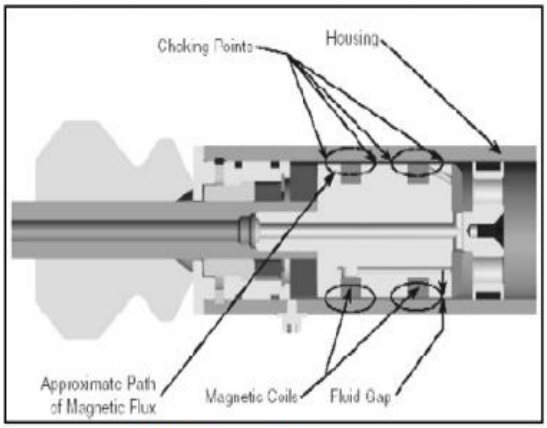


Seismic retrofit of the bell tower of the church of San Giorgio in Trignano: (left) elevation of the structure and (right) particular of the SMA rod used.



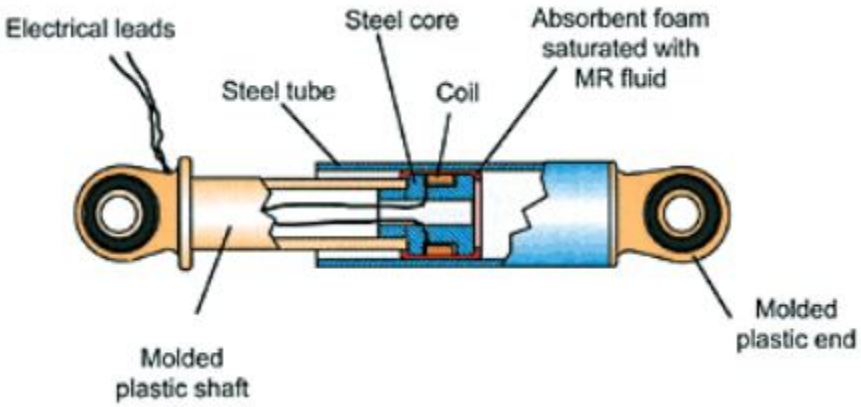
schematic MR damper tested by Spencer

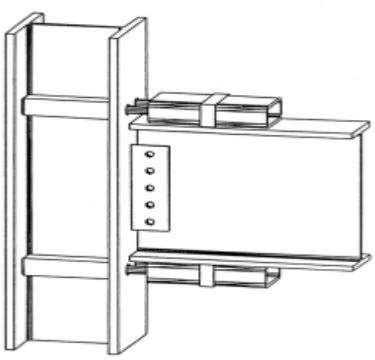
میراگرهای MR در پل Bin zhou

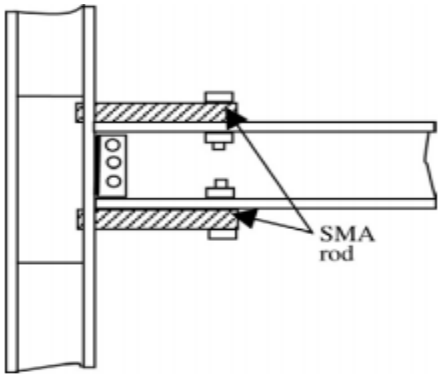


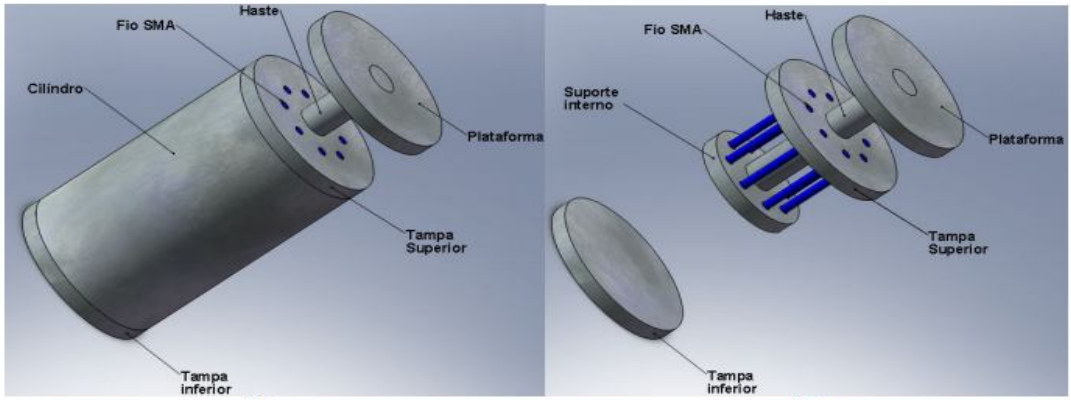
شماتیک میراگرMR

میراگرهای MR در پل Dongthng Lake









برخی از خواص آلیاژ حافظه دار شکلی

۱- میرایی هیسترزیس

۲- استهلاک انرژی با اطمینان و اعتماد بالا

۳- ظرفیت تمرکز

۴- مقاومت مناسب در برابرسیکلهای خستگی و فازهای الاستیک

۵- مقاومت مناسب در برابر خوردگی و شرایط بد محیطی و حرارت

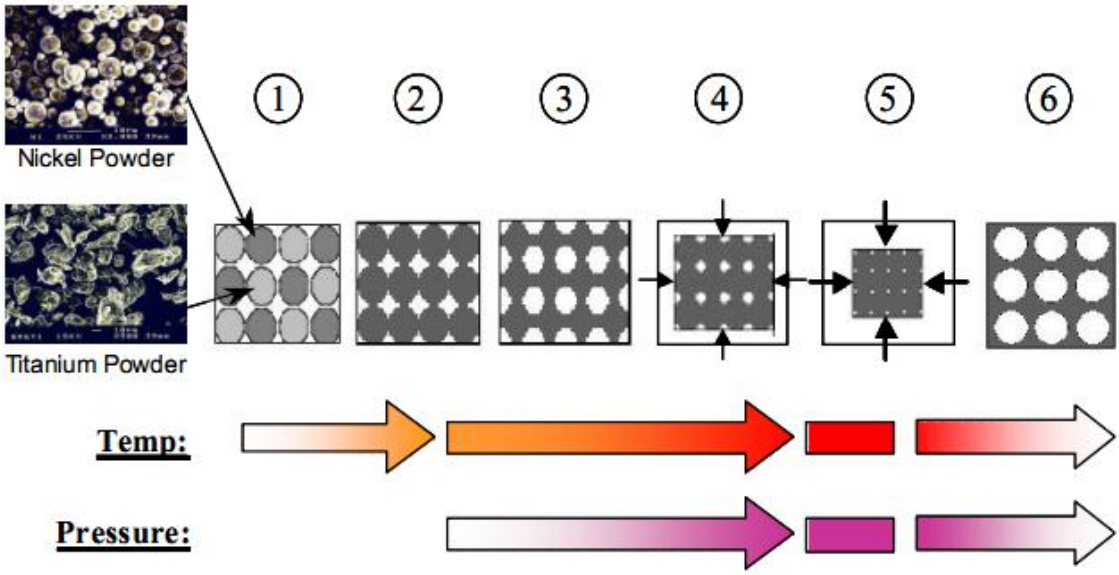
۶- دوام مناسب در طول غمر بهره برداری

۷- خواص مکانیکی مناسب

۸- قابلیت جوش پذیری

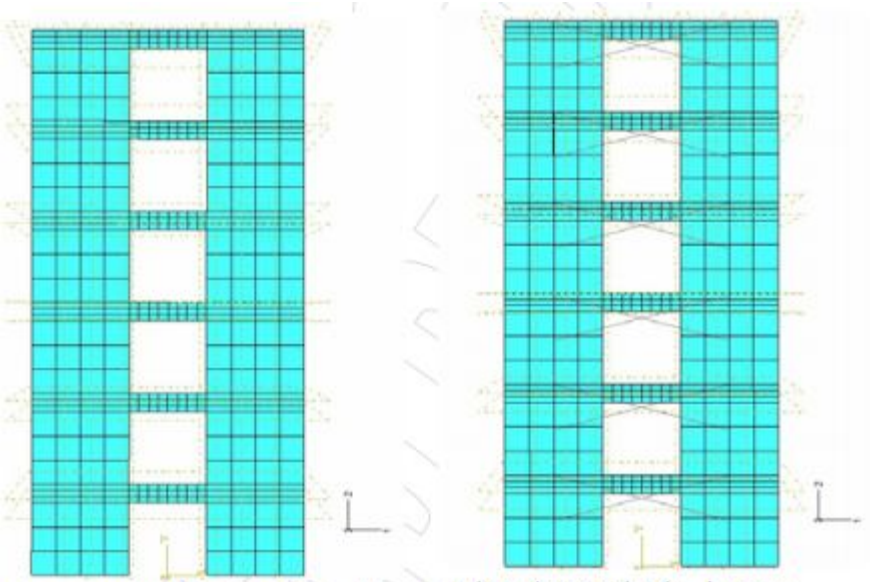
۹- سازگاری و تطابق فیزیکی با مواد یا محیطهای شیمیایی دیگر

۱۰- برشگت پذیری به چرخه طبیعی



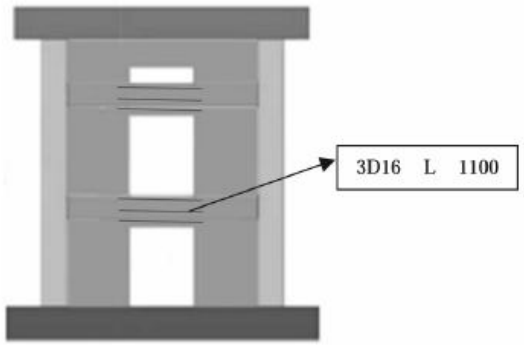
۱۱-

۱۲-

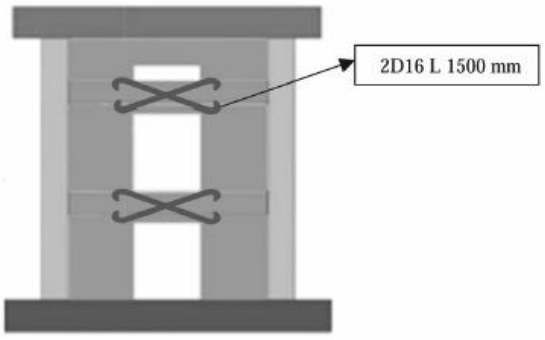


الف – مدل سازه اصلی (بدون تقویت)

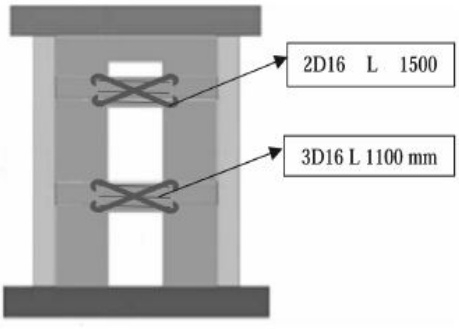
ب – مدل سازه با تقویت‌های مهاری



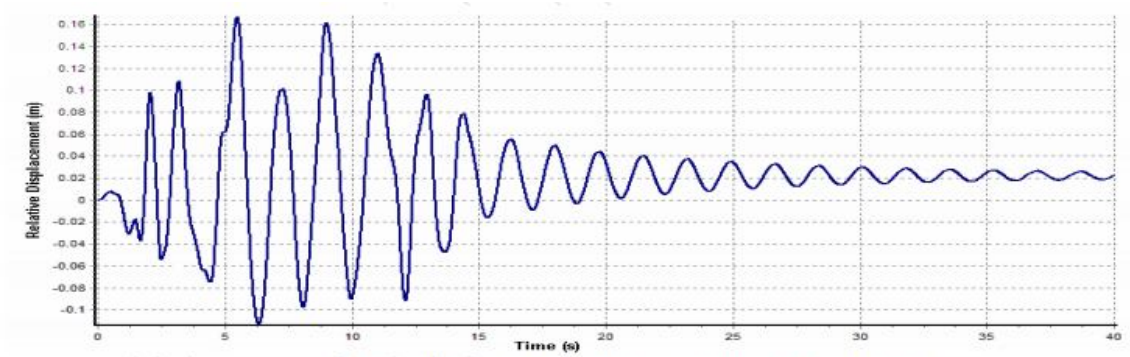
مدل اول: SMAs طولی در تیر پیوند دیوار برشی



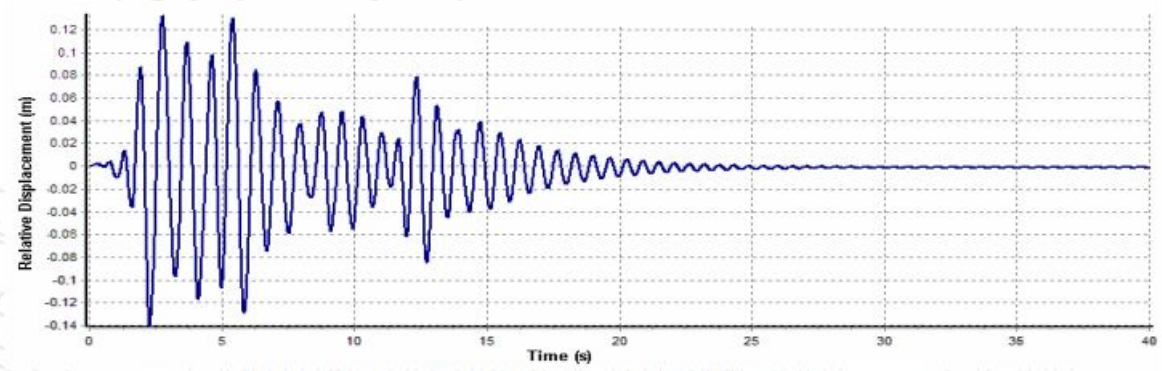
مدل دوم: SMAs ضربدری در تیر پیوند دیوار برشی



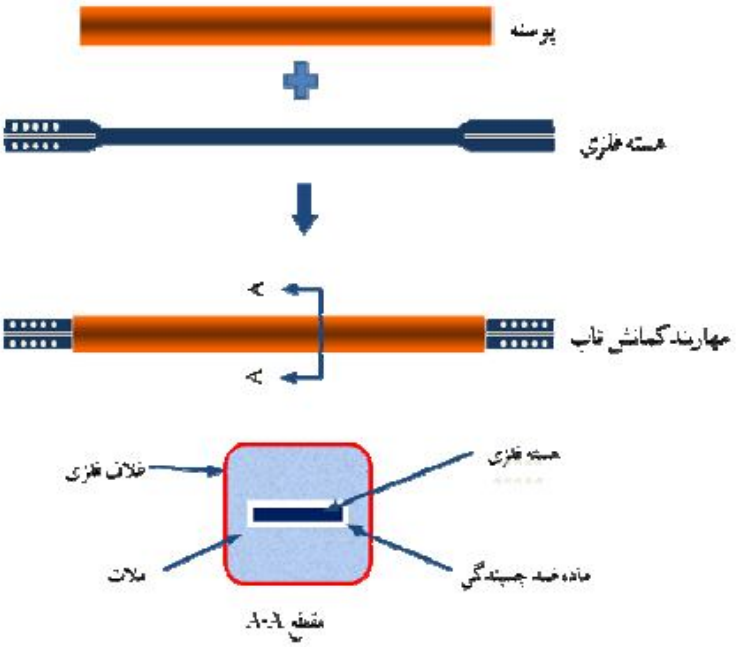
مدل سوم: SMAs ضربدری و طولی در تیر پیوند دیوار برشی



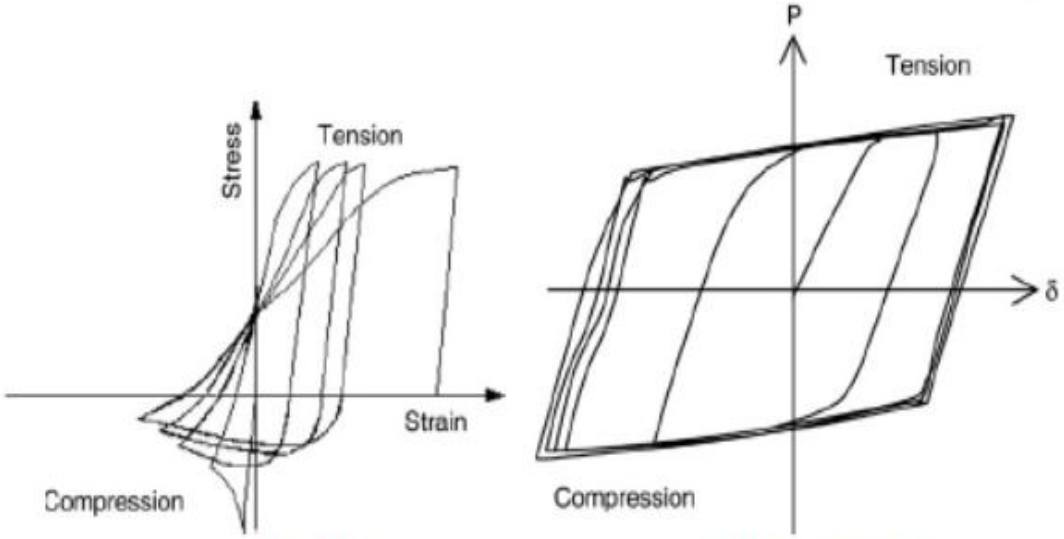
جابجایی راس سازه بدون تقویت در مدت‌زمان یک زلزله و نوسان آزاد پس از آن



جابجایی راس سازه تقویت‌شده در مدت‌زمان یک زلزله و نوسان آزاد پس از آن

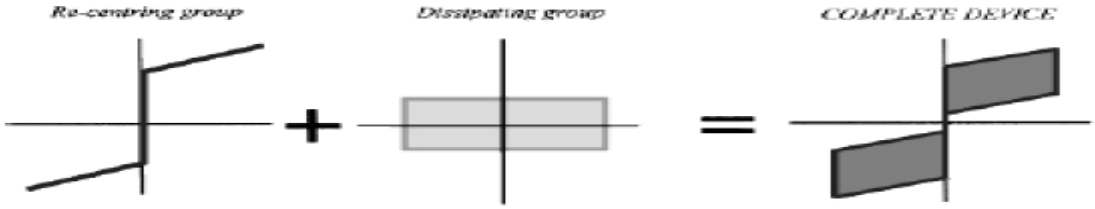


- اجزای مهاربند کمانش تاب

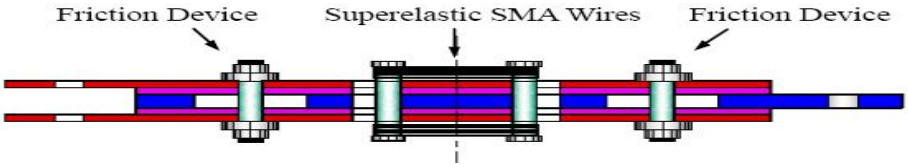


مهاربند فولادی معمولی

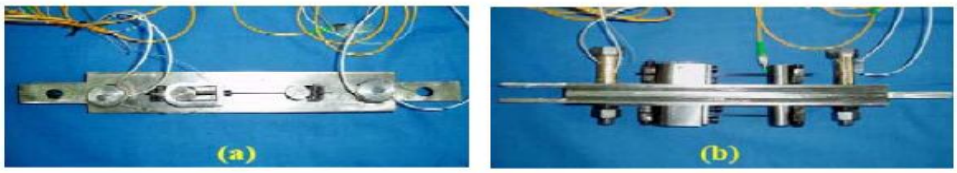
مهاربند مقید شده در برابر کمانش



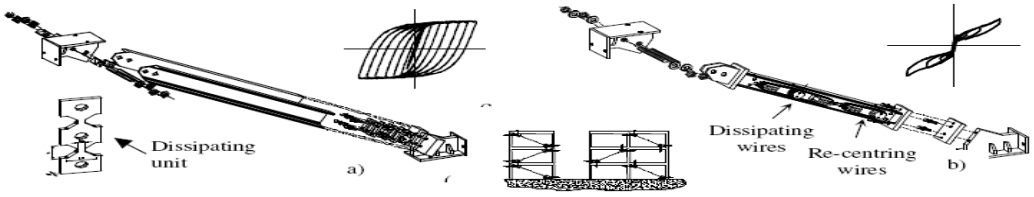
Idealized behavior of SMA device.



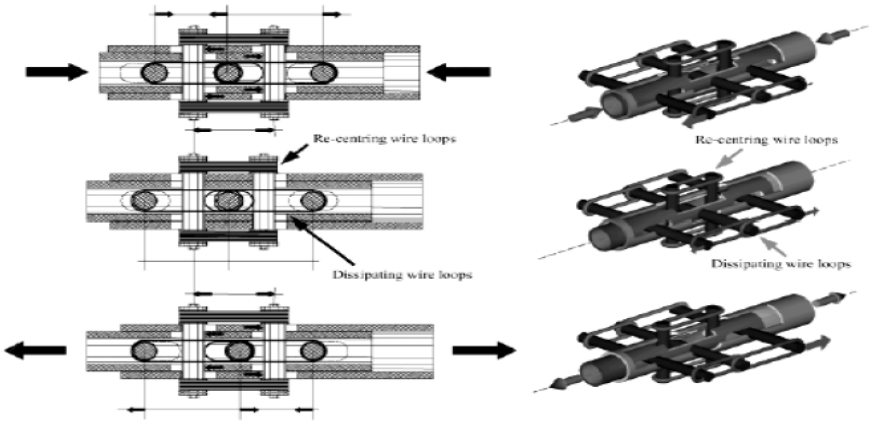
Scheme diagram of a HSMAFD



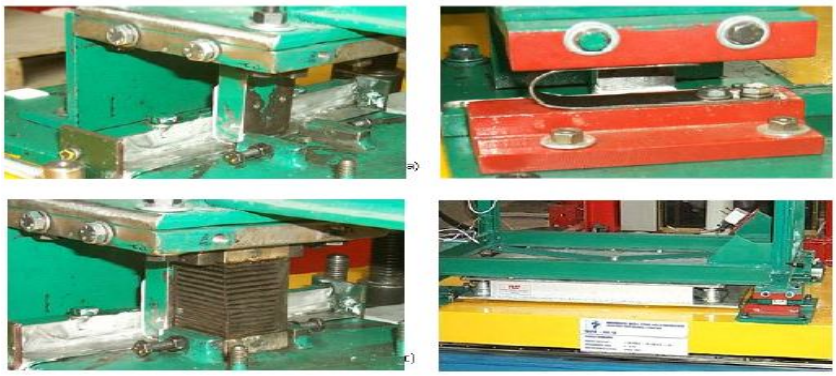
Photos of HSMAFD



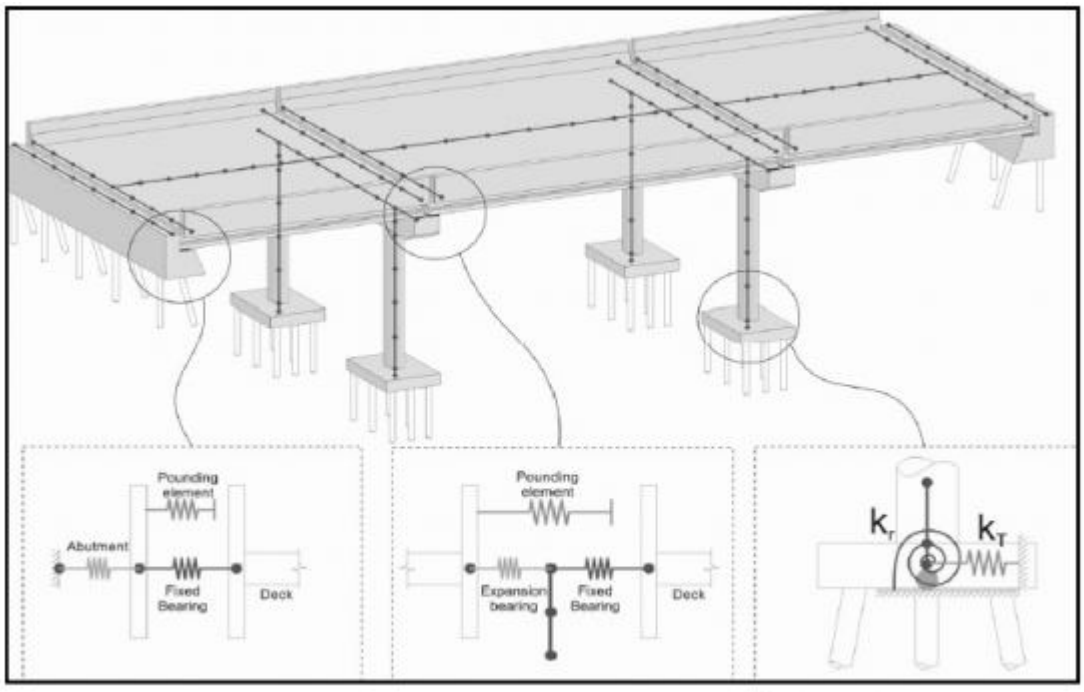
Braces arrangement; a) dissipative Steel based device; b) re-centring SMA based device



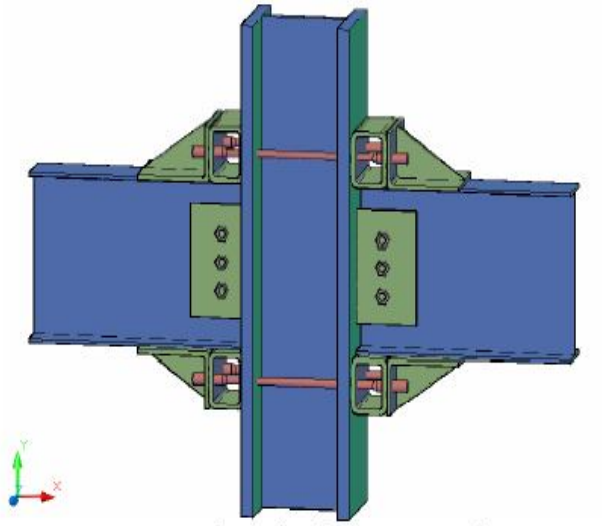
SMA damper (working mechanism) (*after* Dolce *et al.*, 2000)



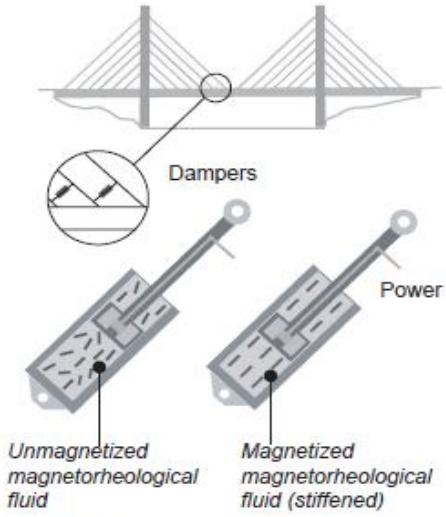
a) Steel-PTFE slider; b) steel based device; c) rubber based device; d) SMA based device



استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی در قسمت های مختلف پل



Schematic of SMA connection



Applying a controlled current creates a magnetic field that causes the viscosity of the magnetorheological fluid to vary and damp out unwanted cable vibrations

تغییر حالت مارتنزیتی به تغییر حالت متالورژیکی جامدات مربوط بوده و در آن تغییر آرایش اتمی بدون هیچ وابستگی به زمان و تغییری در ترکیب شیمیایی فاز جدید، به صورت هماهنگ و وابسته به دما انجام می گیرد

اثر حافظه داری به دو صورت یک طرفه و دو طرفه در آلیاژهای حافظه دار قابل بررسی است.

آلیاژهای حافظه دار به دو روش ۱-روش ذوب و ریخته گری ۲- متالورژی پودر ساخته می شوند.

آلیاژهای Ni-Ti به دلیل داشتن ویژگی هایی همچون مقاومت در مقابل خوردگی ،سازگاری زیستی بالا، قابلیت تولید در اندازه های خیلی کوچک ، خاصیت ارتجاعی بالا و تولید نیرو کاربردهای زیاد، به خصوص در تجهیزات مهندسی پزشکی دارند

REFERENCES

1. Otani S, Hiraishi H and Midorikawa M,Development of Smart Systems for building structures, Proceedings of SPIE 2000, 3988, pp 2-9.
2. Buehler WJ and Wiley RC, US patent 3,174,851,nickel-based alloys, 1965.
3. Perkins J, Shape Memory Effects in Alloys, Plenum Press, New York, 1975.
4. Árpád Peth˝o, Constitutive modeling of shape memory alloys based on a finite strain description, Periodica poly technical ser. Mech. Eng. 2000, Vol. 44,No. 1, pp. 115-126.
5. DOLCE M and CARDONE D, Mechanical behaviorof shape memory alloys for seismic application 1:Martensite and Austenite NiTi bars subjected to torsion,International Journal of Mechanical Sciences 2001,Vol. 43, pp 2631-56
6-I.Elyasian,Smart Materials and new technogies
7- I. Elyasian “Destructive & Non Destructive Tests in Concrete applications for Evaluation Deboning Failures of FRP Strengthened System”14th European conference of earthquake engineering 30 August to 3 September Ohrid2010, Macedonia”
8-I.Elyasian, “vulnerability assessment of structures and evaluation applicable techniques for rehabilitation and retrofit “book published 2009
9- Ballard, T. A., Krimotat, A., Mutobe, R., Treyger, S. (1997) "Nonlinear Seismic Analysis of Carquineaz Strait Bridges", Computers & Structures, Vol. 64, No. 5/6, pp. 1041-1052.
10- Donikian, R., Chang, C. Y., Tabatabaie, M., Polivka, R. (1994) "Technical Issues Associated with the Seismic Analysis of the San Mateo-Hayward Bridge", Proceedings of 5th National Conference on Earthquake Engineering, Vol. 64, No. 5/6, pp. 1041-1052.
11- Kumar, S., Usami, T., (1996) "Damage Evaluation in Steel Box Columns by Cyclic Loading Tests", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 122, No. 6, pp.626-634.

12- Watanabe, E., Sugiura, K., Nagata, K., Kitane, Y. (1997) "Performances and Damages to Steel Structures During the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake" Engineering Structures, Vol. 20, Nos. 4-6, pp. 282-290.
13- Kumar, S., Usami, T., (1996) "Inelastic Seismic Design Verification Method for Steel Bridge Piers Using A Damage Index Based Hysteretic Model", Engineering Structures, Vol. 20, Nos. 4- 6, pp. 472-480.
14- Dicleli, M., Bruneau, M. (1995) "Seismic Performance of Single-Span Simply Supported and Continuous Slab-on-Girder Steel Highway Bridges", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 121, No. 10, pp. 1497-1506.
15- Zahrai, S. M., Bruneau, M. (1998) "Impact of Diaphragms on Seismic Response of Straight Slab-on-Girder Steel Bridges", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 124, No. 8, pp. 938-947.
16- Saadeghvaziri, M. Ala, Rashidi, S. (1996) "Effect of Steel Bearings on Seismic Response of Bridge in Eastern United States" Proceedings of 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Published electronically
17- ATC/FHWA (1983) "Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges", Report ATC-6-2, Applied Technology Council, Redwood City, California. Also Published by Federal Highway. Administration as Report FHWA/RD-83/007.
18- Chile Earthquake Photos and Captions as of 3-1-10 compiled by CSSC Staff.
19-. H. N. Li, H. Qian, G. B. Song and D. W. Gao, "A type of shape memory alloy damper: design, experiment and numerical simulation", Journal of Vibration Engineering, vol. 21, no. 2, 179-184.
20- Wilde K, Gardoni P, Fujino Y. Base isolation system with shape memoryalloy device for elevated highway bridges. Engineering tructures 2000;22:222–9.
21- Dolce M, Cardone D, Marnetto R. SMA re-centering devices forseismic isolation of civil structures. Proceedings of SPIE 2001;4330:238–49.
22- Mayes JJ, Lagoudas D, Henderson BK. An experimental investigation of shape memory alloy pseudoelastic springs for passive vibration isolation.In: AIAA space 2001 conference and exposition. 2001.
23- Khan MM, Lagoudas D. "Modeling of shape memory alloy pseudoelasticspring elements using Preisach model for passive vibration isolation.Proceedings "of SPIE 2002;4693:336–47.
24- Corbi O. Shape memory alloys and their application in structuraloscillations attenuation. Simulation Modeling Practice and Theory 2003;11:387–402.
25- Tamai H, Kitagawa Y. Pseudoelastic behavior of shape memory alloy wires and its application to seismic resistance member for building. Computational Materials Science 2002;25:218–27.
26- Saadat S, Salichs J, Noori M, Hou Z, Davoodi H, Bar-on I, Suzuki Y,Masuda A. An overview of vibration and seismic application of NiTishape memory alloy. Smart Materials and Structures 2002;11:218–29.
27- DesRoches R, Delemont M." Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys". Engineering Structures 2002;24:325–32.
28- Leon RT, DesRoches R, Ocel J, Hess G. Innovative beam column using shape memory alloys. Proceedings of SPIE 2001;4330:227–37.
29- Clark P, Aiken I, Kelly J, Higashino M, Krumme R. Experimental and analytical studies of shape memory alloy dampers for structural control.In: Proceedings of passive damping. 1995.
30- Li H, Liu M, Ou JP. Vibration mitigation of a stay cable with one shapememory alloy damper. Structural Control and Health Monitoring 2004; 11:1–36.
31-Casciati F, Faravelli L, Petrini L. Energy dissipation in shape memory alloy devices. Computed-Aided Civil and Infrastructure Engineering 1998;13:433–42.
32- X. L. Li and H. N. Li. "Double-sigmoid model for magnetorheological damper and corresponding experiment verification," Journal of Vibration Engineering, vol. 19, no. 2, pp. 168-172, 2006. (in Chinese)
33- J. M. Ko, Y. Q. Ni, Z. Q. Chen and B. F. Spencer, "Implementation of MR dampers to Dongting Lake Bridge for cable vibration mitigation," Proceeding of the 3rd World Conference on Structural Control, Como, Italy, 2002.
34- J. P. Ou. "Structural vibration control-active, semi-active and smart control systems," Press of Science, China, 2003.

۳۵- چهارمین کنگره مهندسی عمران،دانشگاه تهران، اردیبهشت۱۳۸۷

۳۶-محمد کرمی ، محسن گرامی ، بررسی عملکرد میراگرهای فوق ارتجاعیSMA

37-Dolce M. Cardone D. and Marnetto R. (2000) Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 29, 945-68 .

38- Kumar G.R. Kumar S.R. and Kalyanaraman V. (2007) Behavior of frames with Non-Buckling bracings underearthquake loading. Journal of constructional steel research, 63, 254-262 .

39-Sabelli R. Mahin S. and Chang C. (3003) Seismic demands on steel braced frame buildings with Buckling -restrained Braces. Journal of Engineering Structures, 25, 655–666 .

40- Sabelli R. (2001) Research on Improving the Design and Analysis of Earthquake-Resistant Steel-Braced Frames. Professional Fellowship Report No. PF2000-9, NEHRP, USA .

41-Motahari S.A. (2006) AIMS (Analysis of Intelligent Materials and Structures): Visual Nonlinear Dynamic Multi Degree of Freedom Finite Element Program, University of Tehran, Iran.

42- Madsen L.P.B, Thambiratnam D.P. and Perera N.J. (2003) Seismic response of building structures with dampers in shear walls. Computers and Structures, 81, 239–253 .

43-Motahari S.A, Ghassemieh M. and Abolmaali S.A. (2007) Implementation of shape memory alloy dampersfor passive control of structures subjected to seismic excitations. Journal of Constructional Steel Research .۱۵۷۹-۱۵۷۰ ,۶۳ ,

44-Motahari S.A. and Ghassemieh M. (2007) Multilinear one-dimensional shape memory material model for use in structural engineering applications. Journal of Engineering Structures, 29; 904-913 .

45-Dolce M. and Cardone D. (2001) Mechanical behavior of shape memory alloys for seismic applications 2 .Austenite NiTi wires subjected to tension. International Journal of Mechanical Sciences, 43, 2657–2677 .

46-Motahari S.A. (2006) AIMS (Analysis of Intelligent Materials and Structures): Visual Nonlinear Dynamic Multi Degree of Freedom Finite Element Program, University of Tehran, Iran .

47- www.seismosoft.com (2007) The original source of the software SeismoStruct v.4.0.3.

48-Duerig, TW, KN Melton, D Stöckel and CM Wayman (1990) Engineering Aspects of Shape Memory alloys ,London: Butterworth Heinemann .

49- K. Shimizu and T. Tadaki (1987) Shape Memory Alloys, H. Funakubo, Ed., Gordon and Breach Science Publishers .

50-D.Z. Yang (2000) Smart Material and Smart System, Tianjin University Press, Tianjin, China .

51-L.C. Zhao,W. Cai, Y.F. Zheng (2002) Shape Memory Effect and Superelasticity in Alloys, National Defense Industry Press, Beijing, China .

52- Xiao-Bao Zuo, Wei Chang , Ai-Qun Li , Quing-Fu Chen (2006) Design and experimental investigation of a super elastic SMA damper, Materials Science and Engineering magazine