

بررسی عملکرد میراگرهای فوق ارتجاعی SMA

محمد کرمی^۱، محسن گرامی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه سمنان

۲- استادیار دانشگاه سمنان و پژوهشگر فوق دکتری سازه دانشگاه تربیت مدرس

Karami.semnan@ymail.com

چکیده

آلیاژهای شکل پذیر فوق ارتجاعی موادی هستند که از خصوصیات منحصر به فردی برخوردار می باشند. برخی از مشخصات این مواد حالت فوق ارتجاعی و اثر شکل پذیری با قابلیت برگشت پذیری آن ها می باشد. مهندسان و طراحان جهت کنترل ارتعاش سازه ها تحت اثر بارهای جانبی با بهره گیری از ویژگی های این مواد، میراگرهای جدیدی را طراحی و ساخته اند. در این مقاله پس از بررسی مشخصات آلیاژهای شکل پذیر فوق ارتجاعی، اثر دامنه جابجایی و فرکانس بر روی رفتار مکانیکی این میراگرها مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله ارائه می گردد.

کلمات کلیدی: آلیاژ شکل پذیر فوق ارتجاعی، اثر برگشت پذیری، فوق ارتجاعی، میراگر، رفتار مکانیکی

مقدمه

آلیاژهای شکل پذیر فوق ارتجاعی (SMA)^۱ موادی می باشند که از خود رفتار فوق ارتجاعی و اثر شکل پذیری با قابلیت برگشت پذیری نشان می دهند. چنانچه با اعمال بارگذاری بر روی نمونه SMA، تغییرشکلی حاصل گردد، با اعمال حرارت بر نمونه و یا همچنین اگر دمای محیط بالا باشد حتی با حذف بار اعمالی، نمونه به حالت اولیه خود بازمی گردد.^[۱] یکی از مشخصه های مهم آلیاژهای شکل پذیر فوق ارتجاعی ظرفیت میرایی بالای آن ها می باشد که مهندسان با بهره گیری از این ویژگی و بر پایه خاصیت فوق ارتجاعی آن ها، میراگرهای SMA را جهت کنترل ارتعاش سازه ها، طراحی نموده اند. این میراگرها در مقایسه با دیگر میراگرهای ساخته شده از مواد ویسکوالاستیک و فلزات با مقاومت تسلیم پایین از مزایای بالایی نظیر ظرفیت میرایی بالا، قابلیت برگشت پذیری تحت تغییرشکل های بزرگ و رفتارهای پایدار برخوردار می باشند.^[۳،۲]

نمونه هایی از آلیاژهای شکل پذیر فوق ارتجاعی

یکی از مهمترین آلیاژهای شکل پذیر فوق ارتجاعی آلیاژ نیکل - تیتانیوم می باشد که برای اولین بار در سال ۱۹۶۲ در آزمایشگاه Naval Ordnance Laboratory ساخته شد و تحت نام تجاری Nitinol (مخفف Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory) عرضه گردید.

¹ Shape Memory Alloys

نوع دیگری از آلیاژهای شکل پذیر فوق ارتجاعی ، SMA فرو مغناطیس می باشد که در میدان مغناطیسی قوی المان شکل اولیه خود را به دست می آورد. این مواد به لحاظ سرعت و کارایی بالاتر نسبت به SMA های محرک دمایی ، توجه بیشتری را به خود جلب کرده اند . برخی آلیاژها که تحت دماهای مختلف خاصیت برگشت پذیری را دارند^[1] ، 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

عملکرد آلیاژهای شکل پذیر فوق ارتجاعی

خاصیت فوق ارتجاعی و اثر برگشت پذیری، در فاز تغییرات حالت جامد مشاهده می گردد که با ایجاد تغییرات در خاصیت مولکولی SMA صورت می گیرد. عموماً وقتی صحبت از تغییرات فازی می گردد اولین چیزی که به ذهن خطور می کند تغییر فاز از جامد به مایع و یا مایع به گاز می باشد. تغییر فازی جامد همانند دیگر تغییر فازها با تغییر در حالت مولکولی روی می دهد اما مولکول ها به صورت فشرده در کنار هم قرار می گیرند و جسم حالت جامد بودن را حفظ می کند. در اکثر SMA ها تنها ۱۰ درجه تغییر دما لازم می باشد تا تغییر فازی روی دهد . دو فازی که در آلیاژهای شکل پذیر فوق ارتجاعی اتفاق می افتد، فاز Austenite و Martensite می باشد که در شکل ۱ نشان داده شده است.

نمای ماکروسکوپی

آستنیت



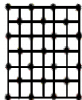
مارتنزیت تغییر شکل نیافته



مارتنزیت تغییر شکل یافته



نمای میکروسکوپی

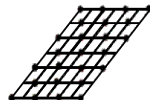


آستنیت

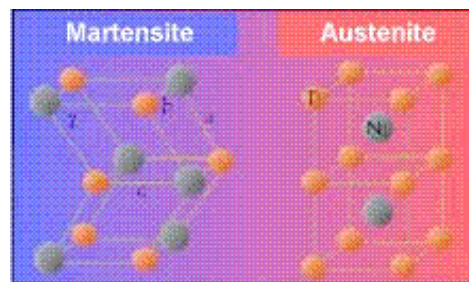


مارتنزیت

تغییر شکل نیافته



مارتنزیت تغییر شکل یافته

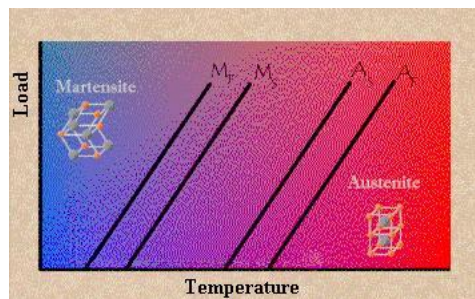


شکل ۲- نمای میکروسکوپی و ماکروسکوپی دو فاز SMA

شکل ۱- فاز Austenite و Martensite

فاز Martensite، فازی است که در آن SMA به نرمی و آسانی تغییر شکل می دهد و این حالت در دمای پایین رخ می دهد. ساختار مولکولی در این فاز به صورت شکل ۲ (وسط) تغییر می کند. فاز Austenite، قویترین حالت SMA می باشد که در دماهای بالاتر رخ می دهد. شکل ساختاری Austenite به صورت مکعبی می باشد که در شکل ۲ (سمت چپ) نشان داده شده است. در مقیاس میکروسکوپی، حالت تغییر شکل نیافته فاز Martensite از نظر شکل و اندازه همانند فاز Austenite، مکعبی می باشد؛ از این رو تا وقتی که Martensite تغییر شکل نیافته باشد، تغییری در اندازه و شکل SMA دیده نمی شود.^[۴]

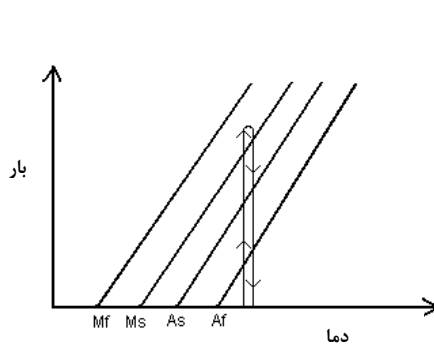
دماهای شروع و خاتمه این فازها عبارتند از: Ms, Mf, As, Af. با بارگذاری SMA مقادیر نام برده مطابق شکل ۳ افزایش می یابند.



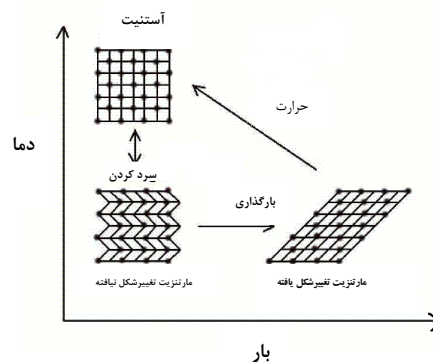
۳- رابطه دمای تغییر فاز با بارگذاری

مقادیر اولیه این متغیرها نیز عموماً متاثر از ساختار مولکولی این آلیاژها می باشد.

اثر برگشت پذیری زمانی مشاهده می شود که دمای SMA به زیر Mf کاهش داده می شود. در این مرحله آلیاژ SMA تماماً در حالت Martensite می باشد که به راحتی تغییر شکل می دهد. پس از ایجاد تغییر شکل در SMA می توان دمای آن را تا بالاتر از Af افزایش داد تا به حالت اولیه برگردد. با حرارت دادن SMA ساختار مولکولی آلیاژ تغییر می کند، که این حالت مانند ذوب یخ به آب می باشد اما با این تفاوت که حالت جامد بودن حفظ می شود. Martensite تغییر شکل یافته اکنون به حالت مکعبی Austenite که شکل اولیه SMA بود، برمی گردد.



۵- نمودار بارگذاری برای اثر فوق ارتجاعی



۴- نمودار میکروسکوپی اثر برگشت پذیری

خاصیت فوق ارتجاعی SMA ها معمولاً هنگامی که آلیاژ در حالت Austenite باشد روی می دهد (دمای بالاتر از Af). برخلاف اثر برگشت پذیری، خاصیت فوق ارتجاعی بدون تغییر در دما روی می دهد. بارگذاری SMA را تا تغییر حالت از Austenite به Martensite افزایش می دهیم. این روند در

شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. اگر بارگذاری را کاهش دهیم دوباره از حالت Austenite به Martensite برمی‌گردد و این در حالتی می‌باشد که دمای SMA بالای A_f می‌باشد و SMA به حالت اولیه خود برمی‌گردد. [۴۹]

مزایا و معایب آلیاژهای شکل‌پذیر فوق‌ارتجاعی

برخی از مزایای آلیاژهای شکل‌پذیر فوق‌ارتجاعی سازگاری با محیط، تنوع استفاده در زمینه‌های مختلف و مشخصه‌های مکانیکی مناسب و مطلوب نظیر مقاومت بالا و خاصیت ضد خوردگی می‌باشد و همچنین برخی از مشکلات استفاده از آن‌ها گران بودن این مواد در مقایسه با مواد دیگر نظیر فولاد و آلومینیوم بوده و اکثر SMAها از لحاظ خستگی عملکرد خوبی ندارند. این بدان معناست که تحت شرایط بارگذاری یکسان (پیچشی، خمشی، فشاری) یک عضو فولادی ۱۰۰ برابر سیکل رفت و برگشتی بیشتری از یک عضو SMA تحمل می‌کند.

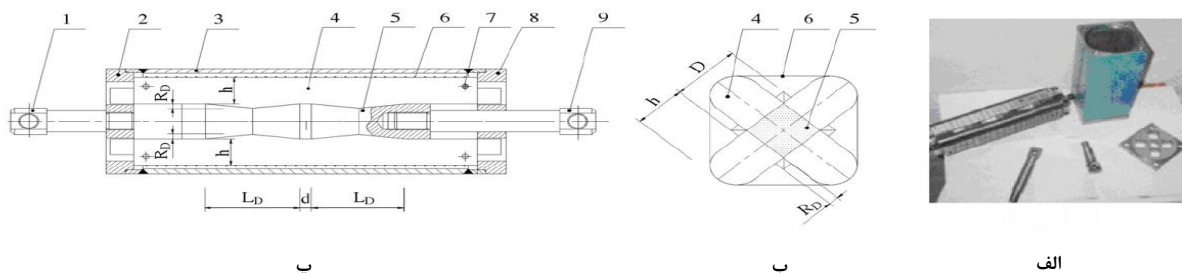
دماهایی که ساختار کریستالی SMAها تغییر می‌کند به خصوصیات آلیاژ مربوط می‌باشد و می‌توان با تغییر دادن نسبت عناصر، آن را تنظیم نمود.

شایان ذکر است که با استفاده چند باره از SMAها، مشخصه دماهای تغییر شکل تغییر می‌یابد که این امر به دلیل ایجاد خستگی در SMA و تغییر در ساختار میکروسکوپی و مشخصات ماده می‌باشد. [۴۹]

ساختار میراگر فوق‌ارتجاعی SMA

شکل ۶ شمای کلی یک میراگر فوق‌ارتجاعی SMA را نشان می‌دهد. اجزای اصلی عبارتند از: پوسته، قطعه لغزشی خارجی، قطعه لغزشی داخلی، درپوش چپ، درپوش راست، میله و سیم‌های SMA. پوسته جهت تحمل نیروهای حاصل از عقب و جلو رفتن میله و حفظ قسمت داخلی میراگر می‌باشد. قطعه‌های لغزشی خارجی از چهار قطعه لغزشی یکنواخت تشکیل شده‌اند. یک قسمت آنها به صورت انحنادار می‌باشد و به گونه‌ای طراحی شده است که سیم‌های SMA را در بر گیرد و قسمت دیگر آن به صورت محدب می‌باشد. تنها یک قطعه لغزش داخلی وجود دارد که به میله سمت راست متصل شده است. چهار وجه قطعه لغزشی داخلی به صورت مقعر می‌باشد که شیاری را ایجاد می‌کند. قسمت محدب و مقعر به صورت نر و مادگی می‌باشند 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 می‌باشد. در درپوش سمت راست و درپوش سمت چپ، چهار حفره وجود دارد تا از حرکت محوری قطعه‌های لغزشی خارجی ممانعت شود. [۵]

پارامترهای اصلی طراحی میراگر عبارتند از: d_{SMA} قطر سیم‌های SMA (Ni Ti)، N تعداد حلقه‌های سیم‌های SMA، 28 حلقه؛ h ارتفاع قطعه‌های لغزشی خارجی، 30 mm؛ D طول قطعه داخلی، 40 mm؛ R_D عمق شیاری، 5 mm؛ L_D طول شیاری، 80 mm؛ d فاصله شیاریها 10 mm.



شکل ۶- ساختار میراگر SMA. الف) تصویر میراگر SMA. ب) رابطه بین سیم‌های SMA و قطعه‌های 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) سیم‌های SMA. (۷) زبانه قفل. (۸) درپوش سمت راست. (۹) میله سمت راست.

اصول عملکرد میراگر

هنگامیکه میراگر SMA بر روی 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 جلو و عقب رفتن قطعه های لغزشی داخلی شده و منجر به حرکت نسبی محوری و قائم به ترتیب در قطعه های داخلی و خارجی می شود. اثر محدود کننده سیم های SMA در جابجایی های قائم منجر به ایجاد نیروی اندرکنش در سطوح تماس قطعه های داخلی و خارجی می گردد که این نیرو همان نیروی وارده از جانب میراگر SMA می باشد. هنگامیکه جابجایی نسبی بین دو انتهای میله کششی کم باشد، انرژی مستهلک شده در میراگر اساساً به اصطکاک بین سطوح تماس قطعه های داخلی و خارجی بستگی خواهد داشت. اما چنانچه این جابجایی نسبی زیاد باشد، میراگر SMA با بهره گیری از خاصیت فوق ارتجاعی سیم های SMA و اصطکاک بین سطوح تماس انرژی حاصل از ارتعاش را مستهلک می کند. به همراه استهلاک انرژی، میراگر نیروی مشخصی را به سازه اعمال می کند. اصل عملکرد میراگر نشان می دهد که رفتار میراگر به خصوصیات SMA و سطوح تماس بستگی دارد.

خصوصیات مکانیکی سیم های SMA

سیم های SMA توسط شرکت Jiangyin Fasten تولید می شود. قطر این سیم ۱ mm بوده و اجزای شیمیایی آن عبارتند از Ni 49.8 و Ti 50.2. با انجام آزمایش DSC، دمای تغییر شکل به شرح ذیل می باشد:

$$M_s = -18^{\circ}\text{C}, A_s = 0^{\circ}\text{C}, A_f = 8^{\circ}\text{C}, M_f = -25^{\circ}\text{C}$$

با انجام آزمایش بر روی رفتار مکانیکی، پارامترهای مربوط به سیم های SMA به صورت زیر به دست آمده است [5]:

$$\epsilon_L^t = 7.9\%, E_A = 51 \text{ GPa}, E_M = 13 \text{ GPa}, C_A = 5.0 \text{ MPa/K}, C_M = 9.2 \text{ MPa/K}$$

آزمایش

روش آزمایش

بار وارده به صورت هارمونیک $U = U_0 \sin \omega t$ به سیستم اعمال می گردد، به طوری که U_0 دامنه بارگذاری می باشد. دمای آزمایش 25°C ، فرکانس بارگذاری ۱-۰.۰۲ HZ و محدوده دامنه جابجایی $(1-6\%) L_0 \pm 1 \text{ mm}$ می باشد [5]. L_0 طول موثر یک حلقه از سیم های SMA بوده و $L_0 = 400$ mm

جدول ۱- انواع بارگذاری ها

فرکانس بارگذاری (Hz)	دامنه بارگذاری
۰.۰۲	۲، ۴، ۸، ۱۲
۰.۲	۲، ۴، ۸
۰.۵	۲، ۴
۱.۰	۲

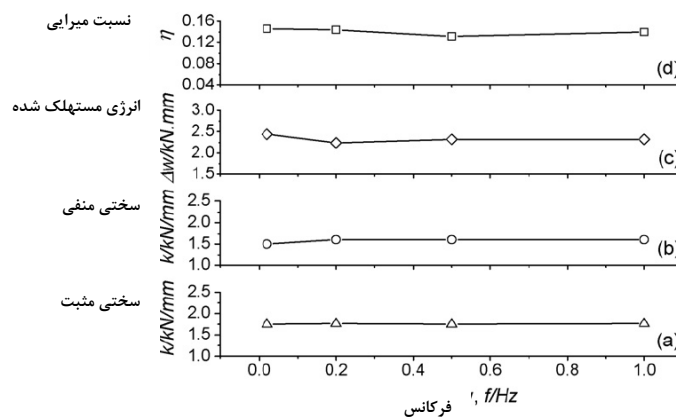
نتایج آزمایشگاهی

اثر فرکانس بارگذاری بر روی رفتار میراگر

شکل ۷ رابطه بین سختی، انرژی مستهلک شده، نسبت میرایی میراگر بر حسب فرکانس بارگذاری در دامنه ۲ mm را نشان می‌دهد. سختی k که اگر در جابجایی واحد ضرب شود نیروی اعمالی میراگر SMA را به دست می‌دهد برابر سختی و تری موثر می‌باشد و انرژی مستهلک شده ΔW که بیانگر مقدار انرژی ارتعاش مستهلک شده در میراگر SMA می‌باشد از سطح زیر منحنی نیرو - جابجایی به دست می‌آید. نسبت میرایی η مبین ظرفیت میرایی میراگر SMA بوده که از رابطه $\eta = \Delta W / (2\pi W)$ به دست می‌آید، به طوریکه w از منحنی های نیرو - جابجایی به دست می‌آید.

مطابق شکل ۷ هنگامیکه فرکانس بارگذاری از ۰.۰۲ HZ به ۱.۰ HZ افزایش می‌یابد، تغییرات مثبت و منفی سختی به ترتیب ۷.۴٪ و ۶.۳٪ بوده و اختلاف بین سختی مثبت و منفی در فرکانس بارگذاری مشابه حدود ۰.۲ kN/mm خواهد بود. شکل ۷-پ و ۷-ج به ترتیب رابطه بین انرژی مستهلک شده، نسبت میرایی میراگر بر حسب فرکانس های بارگذاری را نشان می‌دهد. تغییرات انرژی مستهلک شده و نسبت میرایی کم بوده و به ترتیب برابر ۸.۹٪ و ۹.۶٪ می‌باشد. هنگامیکه دامنه جابجایی ۲ mm باشد، خاصیت فوق ارتجاعی سیستم های SMA در حالت Austenite بوده و تغییر شکل های Martensite از خود نشان نمی‌دهند. بنابراین انرژی مستهلک شده میراگر SMA از اصطکاک بین قطعه های داخلی و خارجی که در حصار سیم های SMA می‌باشند، حاصل می‌شود. انرژی مستهلک شده حاصل از اصطکاک، به فرکانس بارگذاری مربوط نمی‌شود ولی به دامنه جابجایی ارتباط دارد. هر چند تحت دامنه جابجایی زیاد، میراگر با خاصیت فوق ارتجاعی SMA، مقداری از انرژی را مستهلک می‌کند، با این وجود نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که اثر فرکانس بارگذاری بر روی انرژی مستهلک شده میراگر بسیار اندک می‌باشد.

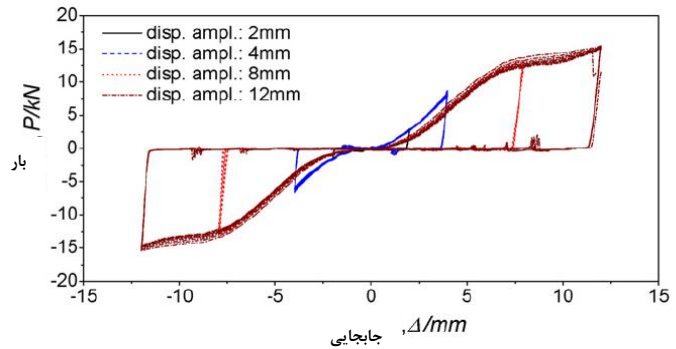
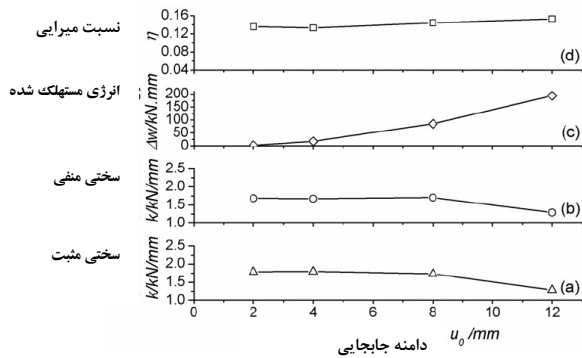
نتایج آزمایشگاهی فوق نشان می‌دهد که اثرات فرکانس بارگذاری بر روی رفتار میراگر SMA اندک می‌باشد. از این رو در حالت فرکانس کم (کمتر از ۱.۰ HZ) می‌توان از اثرات ناشی از فرکانس بارگذاری صرف نظر نمود^[۱۵].



شکل ۷- روابط بین فرکانس بارگذاری و پارامترهای میراگر SMA: الف) سختی مثبت، ب) سختی منفی، پ) انرژی مستهلک شده، ج) نسبت میرایی.

اثر دامنه جابجایی بر روی رفتار میراگر

منحنی نیرو - جابجایی میراگر SMA تحت دامنه های متفاوت در فرکانس بارگذاری ۰.۰۲ HZ در شکل ۸ نشان داده شده است و رابطه بین پارامترهای میراگر نظیر سختی، انرژی مستهلک شده، نسبت میرایی بر حسب دامنه جابجایی در شکل ۹ شرح داده شده است.



شکل ۹- روابط بین دامنه های جابجایی و پارامترهای میراگر SMA: الف)

شکل ۸- منحنی نیرو - جابجایی برای میراگر SMA

سختی مثبت. ب) سختی منفی. پ) انرژی مستهلک شده. ج) نسبت میرایی

شکل ۹ نشان می دهد که هنگامیکه دامنه جابجایی کمتر از ۷ mm باشد، SMA همواره در حالت Austenite خواهد بود. ضریب ارتجاعی SMA ثابت بوده و تغییرات سختی میراگر بسیار اندک می باشد. با افزایش جابجایی، انرژی مستهلک شده افزایش می یابد. زیرا سیم های SMA از خود تغییر شکل Martensite نشان نمی دهند تا انرژی را مستهلک کنند، بلکه انرژی مستهلک شونده از اصطکاک بین قطعه های داخلی و خارجی به دست می آید. هنگامی که دامنه جابجایی بیشتر از ۷ mm باشد، SMA از خود تغییر شکل های Martensite نشان می دهد. در حین فرآیند تغییر شکل، با افزایش جابجایی، انرژی مستهلک شده افزایش می یابد. شکل ۹-پ نشان می دهد که با افزایش دامنه جابجایی، انرژی مستهلک شده افزایش می یابد. پس از تغییر شکل Martensite سیم های SMA، میرایی فوق ارتجاعی SMA منجر به استهلاک انرژی می گردد. انرژی مستهلک شده میراگر عمدتاً از اصطکاک و میرایی فوق ارتجاعی حاصل می شود. نسبت میرایی با افزایش دامنه جابجایی افزایش می یابد، اما محدوده افزایش اندک می باشد. [۵] (شکل ۹-ج)

نتیجه گیری

- ۱- در محدوده فرکانس آزمایشگاهی، اثرات فرکانس بارگذاری بر روی پارامترهای مکانیکی اصلی میراگر SMA نظیر سختی، انرژی مستهلک شده و نسبت میرایی بسیار اندک می باشد. از این رو اثرات فرکانس بارگذاری بر روی رفتارهای آن قابل نظر کردن می باشد.
- ۲- دامنه جابجایی مهمترین عامل تاثیرگذار بر روی رفتارهای مکانیکی میراگر SMA می باشد. در صورتی که دامنه جابجایی از مقدار جابجایی که در آن SMA از خود تغییر شکل Martensite نشان می دهد کمتر باشد، تغییرات سختی میراگر اندک خواهد بود. رابطه بین انرژی مستهلک شده، میراگر و جابجایی به صورت خطی می باشد. سیم های SMA از خود تغییر شکل Martensite نشان نداده و انرژی را مستهلک نخواهند کرد. انرژی مستهلک شده میراگر به واسطه اصطکاک بین قطعه های لغزشی داخلی و خارجی حاصل می گردد. چنانچه دامنه جابجایی از مقدار جابجایی که در آن SMA از خود تغییر شکل Martensite نشان می دهد بیشتر باشد، سختی و تری میراگر کاهش یافته و انرژی مستهلک شده آن افزایش می یابد و انرژی مستهلک شده شامل انرژی مستهلک شده ناشی از اصطکاک و انرژی ناشی از میرایی فوق ارتجاعی SMA می باشد.
- ۳- نتایج حاصل از تحلیل و آزمایش های انجام گرفته نشان می دهد که میراگر فوق ارتجاعی SMA، یک میراگر وابسته به جابجایی و با سختی متغیر می باشد.

- [1] Duerig, TW, KN Melton, D Stöckel and CM Wayman (1990) Engineering Aspects of Shape Memory alloys, London: Butterworth Heinemann.
- [2] K. Shimizu and T. Tadaki (1987) Shape Memory Alloys, H. Funakubo, Ed., Gordon and Breach Science Publishers.
- [3] D.Z. Yang (2000) Smart Material and Smart System, Tianjin University Press, Tianjin, China.
- [4] L.C. Zhao, W. Cai, Y.F. Zheng (2002) Shape Memory Effect and Superelasticity in Alloys, National Defense Industry Press, Beijing, China.
- [5] Xiao-Bao Zuo, Wei Chang , Ai-Qun Li , Qing-Fu Chen (2006) Design and experimental investigation of a super elastic SMA damper, Materials Science and Engineering magazine