

ارزیابی بهبود عملکرد سازه های قابی تحت بارگذاری چرخه ای با استفاده از مهاربندهای از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی

مهدی قاسمیه*

استادیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

امیرحسین ایرانمنش

دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۴/۱۰/۱۵، تاریخ تصویب ۸۵/۷/۸)

چکیده

یکی از ابزارهای کنترل غیرفعال سازه ها استفاده از مهاربندهای با آلیاژهای حافظه دار شکلی می باشد. این مقاله تحقیقی را در زمینه میزان بهبودی که در عملکرد سازه های فولادی در اثر استفاده از مهاربندهای از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی نسبت به مهاربندهای فولادی مقید در برابر کمانش پدید می آید، ارائه می نماید. در این راستا رفتار یک قاب فولادی با ابعاد واقعی هم در حالتیکه توسط المانهای از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی مهاربندی شده و هم در وضعیتی که به وسیله اعضای فولادی مقید در برابر کمانش مهاربندی شده است، تحت اثر بارگذاری چرخه ای بررسی شده است. مدل رفتار فوق ارتجاعی آلیاژهای حافظه دار شکلی و مدل پلاستیسیته فولاد در تحلیل به روش اجزاء محدود غیر خطی بکار گرفته شده است. قاب فولادی با هر دو حالت مهاربندی تحت بارگذاری تغییر مکانی چرخه ای و همچنین بارگذاری نیرویی گذاشته شده است.

واژه های کلیدی: آلیاژهای حافظه دار شکلی - اجزاء محدود غیر خطی - مهاربندهای فولادی مقید در برابر

کمانش - رفتار فوق ارتجاعی

مقدمه

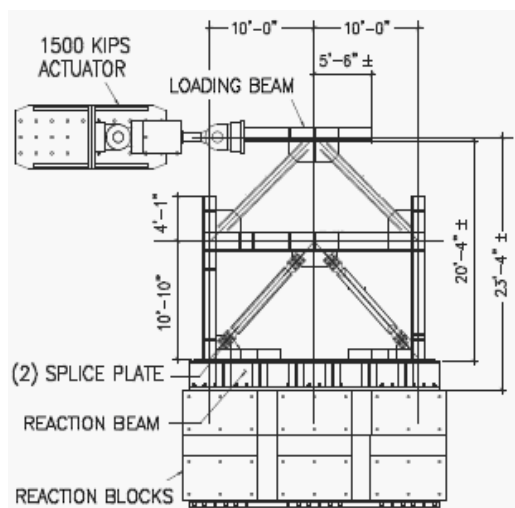
مشخصی بالاتر بروند دارای خاصیت فوق ارتجاعی و یا شبه ارتجاعی میگردند، که این خواص قابلیت آلیاژ را علاوه بر تحمل تغییر شکلهای بزرگ پس از آنکه در حالت بارگذاری و باربرداری مکانیکی در دمای ثابت قرار گرفت به حالت و شکل اولیه باز گردد. آلیاژهای حافظه دار شکلی به علت برخورداری از چنین خواص ماکروسکوپی ممتازی که در مصالح سنتی موجود نمی باشد، دارای کاربردهای وسیعی می باشند. از ابزارهای تصحیح قرارگیری نامطلوب دندانها (سیمهای قوسی ارتودنسی) گرفته تا ریز ساختارهای خود انبساط یابنده برای درمان انسداد اعضای توخالی بدن انسان و از ریز محرکها گرفته تا ابزارهای لازم برای محافظت از ساختمانها در برابر زلزله، تماماً از کاربردهای این مصالح نوین می باشند [۱].

طراحی ایمن ساختمانها در برابر زلزله همچنان یکی از پرچالش ترین زمینه هایی است که مهندسی سازه با آن مواجه است. اما با افزایش دانش و اطلاعات نسبت به فعالیتهای لرزه ای و پاسخهای سازه ای و با دسترسی

آلیاژهای حافظه دار شکلی^۱ معروف به SMA رفتارهای مکانیکی حرارتی، الکتریکی حرارتی و شیمیایی بخصوصی را تحت شرایط مختلف از خود بروز می دهند. مثالهایی از این نوع مصالح با پایه های مسی، نیکلی، آهنی، سرامیکهای حافظه دار شکلی و پلیمرهای حافظه دار شکلی می باشند.

آلیاژهای حافظه دار شکلی با پایه نیکل و تیتانیوم معروف به نایتنول^۲ در دهه شصت میلادی ابداع گردیدند و این نوع آلیاژها به طور خاص رفتارهای منحصر به فردی را دارند، مانند خاصیت فوق ارتجاعی^۳ یا شبه ارتجاعی^۴ که باعث جذابیت کاربرد آنها در کنترل ارتعاشات سازه ای شده است. درصد وزنی نیکل در ترکیب این آلیاژها حدوداً ۵۵ درصد است که باعث میگردد این آلیاژها خواص غیر متعارفی از جمله تغییر شکلهای با کرنش پسماند بین ۸ تا ۱۵ درصد، که با اعمال یک سیکل حرارتی به شکل اولیه خود باز میگردند، را از خود بروز بدهند. این آلیاژها در دماهایی که از حد

نزدیکی به گسل احتمال وقوع آنها می باشد، مقاوم کنند. این مهاربندها نوع ویژه ای از مهاربندهای مقید در برابر کمانش می باشند که توسط شرکت فولاد ژاپن ابداع گردیده است. در این مهاربندها یک غلاف متشکل از بتن که توسط یک لوله فولادی احاطه شده است به دور یک هسته فولادی مرغوب کشیده شده است [۳]. با چنین تمهیداتی این مهاربندها در کشش و فشار رفتار یکسانی را از خود بروز می دهند و این قابلیت را پیدا می کنند تا سیکلهای تغییرمکانهای غیرارتجاعی متعددی را تحمل کنند. کمیته بازنگری لرزه ای دانشگاه برکلی در کالیفرنیا یکسری آزمایشات فیزیکی را به عنوان مکمل فاز طراحی این سیستم پیشنهاد نموده است [۸]. یکی از این نمونه های آزمایشی با ابعاد واقعی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: نمای شماتیک قاب مورد آزمایش.

از اهداف دیگر این مقاله ارزیابی رفتار این نمونه آزمایشی با ابعاد واقعی در شرایطی است که قاب به جای اعضای مقید در برابر کمانش به وسیله سیمهای ضخیم از جنس آلیاژهای حافظه دار شکل استفاده گردد. جهت این ارزیابی هم نمونه آزمایشی و هم نمونه پیشنهادی در نرم افزار ANSYS مدل می شوند و تحت یک پروتکل تغییرمکان بارگذاری یکسان قرار می گیرند. این مدلها به کمک برنامه با در نظر گرفتن مصالح غیرخطی و هندسه غیرخطی تحلیل می شوند. در راستای رسیدن به این هدف ابتدا نمونه آزمایشی دارای مهاربندهای فولادی مقید در کمانش تحلیل میگردند و نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود با نتایج بدست آمده از آزمایش مقایسه می شود. این کار توانایی نرم افزار و صحت مدلسازی و روش تحلیل

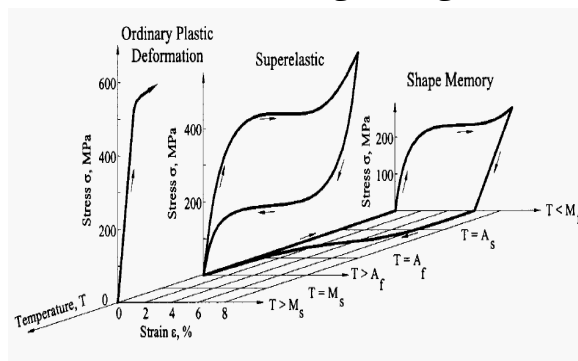
به فناوری جدید، تمرکز فکری طراحان تغییر پیدا کرده است. به جای طراحی ساده جهت جلوگیری از تخریب سازه ها، سعی طراحان بر آنست که در مدت زمان وقوع زلزله از پدید آمدن خسارات سازه ای ماندگار در سازه جلوگیری کنند و حتی بهره برداری از سازه را پس از وقوع زلزله امکان پذیر سازند. در سالهای اخیر پیشرفت های زیادی در زمینه مهاربندی های سازه ای انجام شده است. مهاربندهای سازه ای اعضای هستند که در بیشتر سازه ها مسؤولیت کنترل و مقاومت در برابر بارهای جانبی وارده را به عهده دارند. الزامات طراحی لرزه ای برای قاب های مهاربندی شده به طور قابل ملاحظه ای در دهه های گذشته تغییر کرده است، و مفهوم قابلیت های مهاربندی شده هم مرکز ویژه مطرح شده است [۲]. همچنین تحقیقات زیادی در زمینه بهبود عملکرد سازه هایی که به صورت هم مرکز مهاربندی شده اند انجام شده است. این تحقیقات به طور عمده شامل استفاده از عملکرد مواد مرکب [۳]، تسلیم فلزات [۴] و آلیاژهای حافظه دار شکلی بوده است [۵].

در این مقاله استفاده از مهاربندهای با جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی و خواص منحصر به فرد آنها مورد بررسی قرار گرفته اند. به جهت خاصیت فوق ارتجاعی یا شبه ارتجاعی آلیاژهای حافظه دار شکلی، عضوی که از این آلیاژها ساخته می شود پس از تغییر شکل میتواند به شکل اولیه خود باز می گردد. بعلاوه چنین عضوی از خاصیت جذب انرژی بسیار خوبی به جهت تغییرشکلهای فوق ارتجاعی زیادی که در آن پدید می آید، برخوردار می باشد. از آنجا که آلیاژهای حافظه دار شکلی مانند نایتول دارای مقاومت بسیار زیاد (۱۰۰۰ Mpa) و سختی قابل توجهی (۴۰ Mpa) در مقایسه با فولاد می باشند [۶] به سادگی بعنوان اعضای مقاوم لرزه ای با ابعاد مناسب قابل استفاده می باشند. همچنین، امروزه مفتول یا سیمهایی از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی با قطرهای بزرگ (۲۰ الی ۳۰ میلیمتر) قابل ساخت میباشد [۷]. بنابراین با توجه به دلایل ذکر شده، کاربردهای متعددی به عنوان عضو مقاوم لرزه ای سازه های ساختمانی برای این آلیاژها پیشنهاد شده است. اخیراً شکل نوینی از مهاربندهای جانبی در یکی از ساختمانهای جدید دانشگاه برکلی کالیفرنیا بکار رفته است تا آن را در برابر زلزله های بسیار مخربی که به علت

اینگونه آلیاژها در شکل (۲) نشان داده شده است.

خاصیت آلیاژهای حافظه دار شکلی و فوق ارتجاعی

زمانیکه تنش محوری به یک نمونه مارتنزیتی وارد می شود (شکل ۳)، یک مقدار بحرانی وجود دارد که در آن پروسه چرخش متغیرهای مارتنزیتی اتفاق می افتد [۱]. این فرایند در حقیقت تغییر جهت فضایی متغیرهای مارتنزیتی اصلی می باشد. در صورتیکه در یک حالت تنش، تمایل بیشتری برای انجام تبدیل خاصی وجود داشته باشد، تنها متغیری که بیشتر مورد تمایل است شکل می گیرد. در مدت زمان چنین روندی، تنش تا زمان تغییر جهت کامل متغیرهای مارتنزیتی عملاً ثابت می ماند. اعمال بار پس از تغییر جهت کامل متغیرهای مارتنزیتی سبب ایجاد تغییرشکلهای ارتجاعی در نمونه می شود. پس از باربرداری کرنش های پسماند بزرگی باقی می ماند. اما با اعمال حرارت به دمایی بالاتر از A_f ، مارتنزیت به آستنیت تبدیل می شود و نمونه به شکل تغییر شکل نداده اولیه خود باز می گردد. این شکل در خلال سرد کردن نمونه تا دمایی پایین تر از M_f ثابت نگاه داشته می شود. این پدیده به طور کلی خاصیت حافظه شکلی نامیده می شود.



شکل ۲: رفتار مکانیکی آلیاژهای SMA.

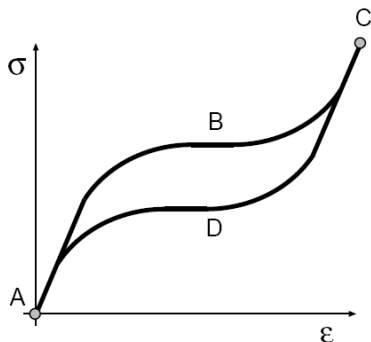
زمانیکه یک تنش تک محوری به یک نمونه آستنیتی در دمایی بزرگتر از A_f اعمال می شود (شکل ۴)، در یک مقدار تنش خاص تبدیل فاز از آستنیت به مارتنزیت شروع می شود. از زمانیکه تغییر شکل در شرایط همدمای شروع می شود تا زمان پایان آن مقدار تنش تغییر نسبتاً کمی می کند. هنگام باربرداری از آنجا که مارتنزیت بدون اعمال تنش در دمایی بزرگتر از A_f

را برای ما آشکار می کند. سپس نمونه آزمایشی دارای مهاربندهای از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی تحلیل می شود تا میزان بهبودی که در اثر استفاده از این مهاربندها در رفتار سازه پدید می آید را برای ما روشن نماید.

خواص عمومی

خواص منحصر به فرد SMA ها مربوط به تبدیل فاز برگشت پذیر مارتنزیتی^۵ می باشد که یک فرایند تبدیل فاز جامد به جامد بین فاز آستنیت^۶ (دارای ساختار بلوری منظم تر) و مارتنزیت (دارای ساختار بلوری نامنظم تر) می باشد. بطور کلی فاز آستنیت در تنشهای کمتر و حرارت های بالا تر پایدار است و برعکس فاز مارتنزیت در تنشهای زیادتر و در حرارت های کمتر پایدار می باشد. این تبدیل فازها می توانند هم در اثر اعمال حرارت و هم در اثر اعمال تنش اتفاق بیفتند [۱]. در درجه حرارت های نسبتاً زیادتر یک آلیاژ از نوع SMA در حالت آستنیت می باشد. زمانی که حرارت بشدت کاهش میابد (سرما)، تبدیل فاز به حالت مارتنزیت صورت می گیرد. فاز آستنیت دارای ساختار بلوری مکعبی می باشد در صورتیکه ساختار بلوری فاز مارتنزیت، مونوکلینیک می باشد. تبدیل از آستنیت به مارتنزیت از طریق یک فرایند اعوجاج تغییر مکانی ایجاد می شود، هرچند که هیچ تغییرات ماکروسکوپی در شکل نمونه پدیدار نمی شود. این پدیده به این علت رخ می دهد که چندین صفحه مارتنزیتی با جهت گیریهای مختلف (که به طور کلی متغیر نامیده می شوند) از یک دانه آستنیت ساده به وجود می آیند. متغیرهای مارتنزیتی در گروههایی که هر یک از آرایش مناسبی برخوردار هستند جمع می شوند و شکل نمونه را دست نخورده نگه می دارند.

در حالت بدون اعمال تنش، یک آلیاژ SMA دارای چهار حرارت تبدیل فازی می باشد: M_s و M_f در زمان سرد کردن و A_s و A_f در زمان حرارت دادن. دو درجه حرارت اولی (یعنی $M_s > M_f$) دماهایی هستند که تبدیل فاز از آستنیت به مارتنزیت شروع می شود و به پایان می رسد و دو درجه حرارت ثانویه (یعنی $A_s < A_f$) دماهایی هستند که تبدیل فاز از مارتنزیت بر آستنیت آغاز می شود و به اتمام میرسد. رفتار عمومی



شکل ۴: خاصیت فوق ارتجاعی.

مشخصه های اصلی که برای مدلسازی رفتار فوق ارتجاعی در نظر گرفته شده است مشابه مدلی است که در قسمت قبل ارائه گردید، با این تفاوت که این مدل برای شرایط با دمای ثابت در نظر گرفته شده است. دو تبدیل فاز در مدل فوق ارتجاعی در نظر گرفته شده است. اول تبدیل فاز مستقیم از آستنیت به مارتنزیت (A→S) و دوم تبدیل فاز معکوس از مارتنزیت به آستنیت (S→A). دو متغیر داخلی نسبت مارتنزیت ξ_S و نسبت آستنیت ξ_A در نظر گرفته می شوند. یکی از آنها یک متغیر وابسته است و از طریق رابطه زیر به یکدیگر وابسته هستند:

$$\xi_S + \xi_A = 1 \tag{1}$$

متغیر مستقلی که در اینجا انتخاب شده است عبارت است از ξ_S . همچنین میتوان رابطه ای ذیل را بین نرخ رشد نسبتهای آستنیت و مارتنزیت استخراج کرد:

$$\dot{\xi}_S + \dot{\xi}_A = 0 \tag{2}$$

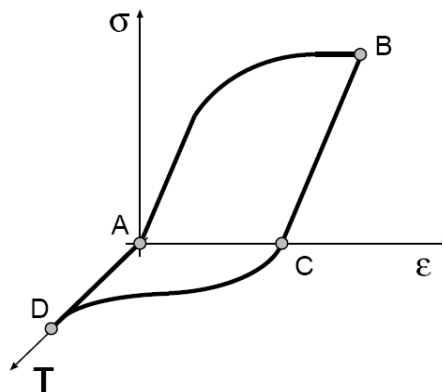
رفتار مصالح، قبل از ورود به بخش غیرخطی همسان فرض شده است. تبدیل فاز با معرفی تابع بارگذاری دراکر-پراگر زیر مدل شده است:

$$F = \|s\| + 3\alpha p \tag{3}$$

که در آن براکتها، $\| \cdot \|$ ، بیانگر نرم اقلیدسی است و s تانسور برشی تنش است. α پارامتر مادی و p فشار است. برای تانسور برشی (بخش انحراف آور) تنش میتوان نوشت:

$$s = \sigma - \text{tr}(\sigma) \frac{\delta}{3} \tag{4}$$

ناپایدار می شود، تبدیل فاز معکوس اتفاق می افتد، ولی مقادیر تنش مربوط به تبدیل فاز معکوس از مقادیر تنش مربوط به تبدیل فاز مستقیم کوچکتر می باشند. در صورتیکه دمای ماده از A_f بزرگتر باشد کرنشی که در اثر بارگذاری در ماده پدید می آید پس از باربرداری به طور کامل و فوری به صفر می رسد. این ویژگی قابل توجه که دربرگیرنده قابلیت های جذب انرژی و کرنش پسماند صفر می باشد، رفتار فوق ارتجاعی یا شبه ارتجاعی نام دارد. اگر دمای ماده از A_f کمتر باشد، تنها بخشی از مارتنزیت اعمال تنش شده مجدداً به آستنیت تبدیل می شود. مقداری کرنش پسماند در انتهای باربرداری برجای می ماند که با حرارت دادن در دمایی بالاتر از A_f به حالت اولیه خود بازمی گردد. این پدیده به طور کلی نیمه فوق ارتجاعی نامیده می شود.



شکل ۵: خاصیت حافظه شکلی.

مدل فوق ارتجاعی بکار رفته

مدل فوق ارتجاعی بکار رفته در نرم افزار برای آلیاژهای حافظه دار شکلی از نوع نایتنول در نظر گرفته شده است. در این مدل فرض گردیده هنگامیکه آلیاژهای حافظه دار شکلی در دمای ثابت تحت تغییر شکلهای بزرگ قرار میگیرند، هیچ تغییر شکل پسماندی از خود به جای نمی گذارد. شکل (۴) رفتار فوق ارتجاعی در دمای ثابت را که در این مدل در نظر گرفته شده است را نشان می دهد. در این شکل ماده ابتدا در مسیر ABC بارگذاری می شود و یک رفتار غیرخطی از خود بروز می دهد. زمانیکه در مسیر CDA باربرداری گردید، تبدیل معکوس اتفاق می افتد. این رفتار، یک رفتار چرخه ای بدون کرنش پسماند دائمی می باشد.

$tr(\sigma)$ اثر ماتریس تنش (مجموع مؤلفه های قطری ماتریس تنش) می باشد و δ معرف دلتای کرونگر است. رشد نسبت مارتنزیت ξ_S به صورت زیر تعریف می شود:

$$\xi_S = \begin{cases} -H^{AS}(1-\xi_S)\frac{\dot{F}}{F-R_f^{AS}} & A \rightarrow S \\ H^{SA}\xi_S\frac{\dot{F}}{F-R_f^{SA}} & S \rightarrow A \end{cases} \quad (5)$$

که در آن:

$$R_f^{AS} = \sigma_f^{AS}(\sqrt{2/3} + \alpha) \quad (6)$$

$$R_f^{SA} = \sigma_f^{SA}(\sqrt{2/3} + \alpha) \quad (7)$$

σ_f^{SA} و σ_f^{AS} پارامترهای مادی هستند که در شکل (5) نشان داده شده اند. پارامترهای دیگر عبارتند از:

$$H^{AS} = \begin{cases} 1 & \text{if } \begin{cases} R_S^{AS} < F < R_f^{AS} \\ F > 0 \end{cases} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

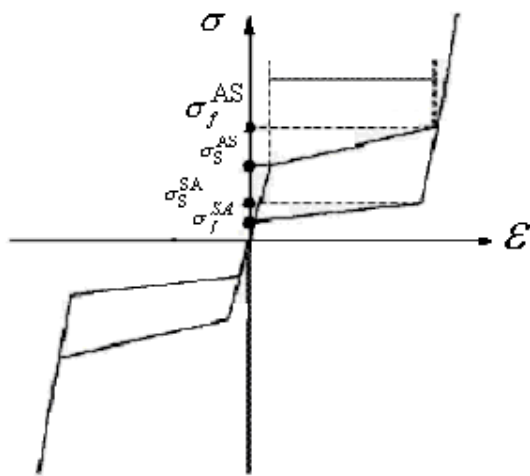
$$H^{SA} = \begin{cases} 1 & \text{if } \begin{cases} R_f^{SA} < F < R_S^{SA} \\ F < 0 \end{cases} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$R_S^{AS} = \sigma_S^{AS}(\sqrt{2/3} + \alpha) \quad (10)$$

$$R_S^{SA} = \sigma_S^{SA}(\sqrt{2/3} + \alpha) \quad (11)$$

در روابط فوق σ_S^{SA} و σ_S^{AS} پارامترهای مادی هستند که در شکل (5) نشان داده شده اند. فرض شده است تبدیل فاز مستقیم از آستنیت به مارتنزیت ($A \rightarrow S$) زمانی اتفاق می افتد که $H^{AS} = 1$ و تبدیل فاز معکوس از مارتنزیت به آستنیت هنگامی آغاز می شود

که $H^{SA} = 1$



شکل 5: شبیه سازی کششی- فشاری فوق ارتجاعی.

کرنش کل ϵ به دو بخش ارتجاعی ϵ^e و تبدیل فاز ϵ^{tr} تقسیم می شود.

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^{tr} \quad (13)$$

رابطه تنش - کرنش افزایشده به صورت زیر نوشته می شود:

$$\{\Delta\sigma\} = \{D\} (\{\Delta\epsilon\} - \{\Delta\epsilon^{tr}\}) \quad (14)$$

$$\{\Delta\epsilon^{tr}\} = \Delta\xi_S \epsilon_L \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \quad (15)$$

در این روابط $\{\Delta\sigma\}$ ، $\{\Delta\epsilon\}$ و $\{\Delta\epsilon^{tr}\}$ به ترتیب بردارهای افزایش تنش، افزایش کرنش و افزایش کرنش تبدیل می باشند و $\{D\}$ ماتریس استحکام ارتجاعی می باشد.

آنچه که ذکر شد خلاصه ای از معادلات کلیدی بود که در مدلسازی رفتار فوق ارتجاعی SMA را در بر می گرفت. این مدل در برنامه اجزاء محدود ANSYS 8.0 بکار گرفته شده است.

شبیه سازی به روش اجزاء محدود

شبیه سازی عددی با استفاده از پروسه حل استاتیکی غیرخطی تحت بارگذاری چرخه ای در نرم افزار

پروتکل بارگذاری که در آزمایش قاب دارای مهاربندهای مقید در برابر کمانش بکار رفته است براساس الزامات توصیه شده از سوی آئین نامه فولادی آمریکا [۲] برای طراحی قابهای دارای مهاربندهای مقید در برابر کمانش، طراحی شده است. این پروتکل بارگذاری در شکل (۶) نشان داده شده است. شتاب دهنده ای (جک بارگذاری) که در شکل (۱) نشان داده شده است، تغییرمکانهای رفت و برگشتی را به تیر بارگذاری اعمال می کند. برای بارگذاری مدل‌های شبیه سازی شده اجزاء محدود، علاوه بر پروتکل بارگذاری تغییر مکانی یک پروتکل بارگذاری نیرویی هم طراحی شده است که در شکل (۷) نشان داده شده است. هردو پروتکل بارگذاری به مدل اجزاء محدود اعمال می شوند. اعمال پروتکل بارگذاری نیرویی از آنروست که تغییرشکلهای باقی مانده در قابها با هم مقایسه شوند.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه دار شکلی.

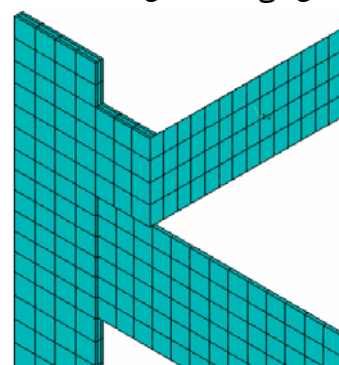
مقدار	مفهوم	ثابت
۴۲۰ (Mpa)	تنش مربوط به آغاز تبدیل فاز مستقیم	σ_s^{AS}
۵۰۰ (Mpa)	تنش مربوط به پایان تبدیل فاز مستقیم	σ_f^{AS}
۳۰۰ (Mpa)	تنش مربوط به آغاز تبدیل فاز معکوس	σ_s^{SA}
۲۰۰ (Mpa)	تنش مربوط به پایان تبدیل فاز معکوس	σ_f^{SA}
۰,۰۶۵	حد اکثر کرنش ایجاد شده در اثر تبدیل فاز	ε_L
۰,۱۵	کمیتی که بیانگر تفاوت رفتار ماده در کشش و فشار است	α
۶۰ (Gpa)	مدول مارتنزیت	$Ymrt$

مدلسازی مهاربندها با آلیاژهای حافظه دار شکلی

در تحلیل قابی که دارای مهاربندهای از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی می باشد، فرض شده است که

ANSYS انجام می شود. تحلیل از نوع شبه استاتیکی می باشد و دقیقاً طبیعت شبه استاتیکی رفت و برگشتی آزمایشهای انجام شده را شبیه سازی می کند. تحلیل قاب دارای مهاربندهای فولادی مقید در برابر کمانش، جهت اجتناب از اثر کمانش مهاربندها، در محدوده تغییرشکلهای کوچک انجام شده است. این در حالیست که تحلیل قابل دارای مهاربندهای از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی با در نظر گرفتن تغییر شکلهای بزرگ انجام شده است.

نمای شماتیک نمونه آزمایش شده در شکل (۱) نشان داده شده است. طبقه پایین قابی است که مورد آزمایش قرار گرفته است. مهاربندها و تیر فوقانی طبقه بالا، یک روش رایج برای اعمال بارگذاری جانبی می باشد [۹]. همه مقاطع تیر و ستون مقاطع مستطیلی معادل هستند که مساحت و اینرسی برابر با مقاطع I بکار رفته در نمونه آزمایش شده را دارا می باشند. این رویکرد مدلسازی اتصالات تیر به ستون با استفاده از المانهای Solid را بسیار ساده تر می کند و تعداد المانها را به شدت کاهش می دهد (شکل ۶).



شکل ۶: مش بندی اتصال تیر، ستون و مهاربند فوقانی.

در این شبیه سازی فرض شده است که فولاد از مدل رفتاری سخت شونده سینماتیک دو خطی با فرض تابع بارگذاری و تسلیم فون میسس تبعیت می کند. بسته به نحوه ساخت و ترکیب آلیاژهای حافظه دار شکلی، پاسخ رفتاری آنها کاملاً متفاوت خواهد بود. همانطور که ذکر شد پاسخ رفتاری این مصالح به درجه حرارت نیز حساس است. مشخصات آلیاژ حافظه دار شکلی از نوع نایتنول که در این تحلیل به کار رفته است [۱۰] در جدول (۱) ارائه شده است. مشخصات مکانیکی ارتجاعی خطی SMA بکار رفته عبارتند از $E = 40$ (Gpa) و $\nu = 0.3$.

مهاربندها نیز مانند نقاط دیگر مدل با استفاده از المانهای Solid مش بندی شده اند. برای مدل کردن مهاربندها که سبب شود آنها تنها تنشهای کششی را تحمل کنند و تنش های فشاری در آنها به وجود نیاید از یکی از امکانات نرم افزار بنام قابلیت تولد و مرگ المان^۷ استفاده گردیده است. این ویژگی نرم افزار امکان فعال سازی و غیرفعال سازی المانهای مدل را در هر گام بارگذاری فراهم می کند. با استفاده از این خاصیت دو نوع پروتکل بارگذاری را که دارای تفاوت هایی نیز می باشند، به انجام رسانیده ایم.

الف) بارگذاری تغییرمکانی (کنترل تغییرمکان)

در روند حل مسأله در دو گام نخست بارگذاری یک المان در مهاربند سمت راست غیرفعال شده و در دو گام بعدی بارگذاری یک المان در مهاربند سمت چپ غیرفعال می شود. این روند تا پایان اعمال بار گام به گام ادامه پیدا می کند. هر المان که در دو گام بارگذاری غیرفعال بوده، در دو گام بعدی فعال می شود و بالعکس. شکل (۸) نشان دهنده تنشهای محوریست که توسط هریک از مهاربندهای چپ و راست در خلال بارگذاری تغییرمکانی تحمل می شود.

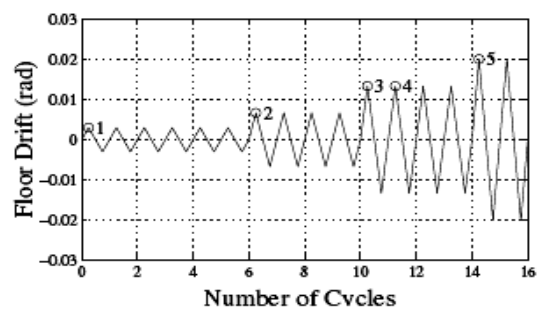
ب) بارگذاری نیرویی (کنترل نیرو)

در این نوع بارگذاری زمان فعال سازی و غیرفعال سازی المانهای قاب تا اندازه ای با حالت قبلی متفاوت است. در بارگذاری نیرویی از گام دوم بارگذاری به بعد، برای رساندن میزان بار از صفر تا یک مقدار حداکثر به بیش از یک گام بارگذاری نیاز است و باید در نقاط مناسبی (که با تجربه مشخص می شود) از ویژگی تولد و مرگ المانها استفاده کرد.

نتایج مربوط به بارگذاری تغییر مکانی

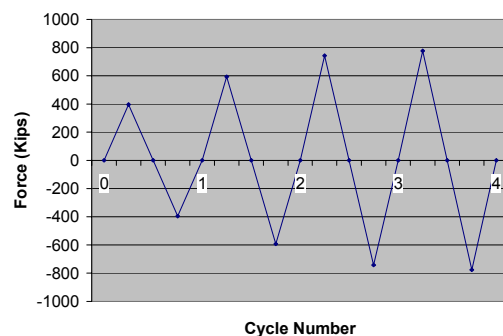
رفتار چرخه ای قاب دارای مهاربندهای فولادی که از آزمایش [۹] و تحلیل اجزاء محدود بدست آمده است در اشکال (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. نتایج آزمایش و نتایج اجزاء محدود، همخوانی مناسبی را بین دو نمودار بدست آمده نشان می دهد. پاسخهای غیر ارتجاعی ویژه ای که مهاربندهای SMA و فولادی از خود

مهاربندهای از جنس SMA تنها تنش کششی را تحمل می کنند. مهاربند یک مقطع مربعی ۲۵*۲۵ در مقیاس میلیمتر میباشد که تقریباً ابعاد یک سیم زخیم از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی است. لذا فرض اینکه مهاربندهای از جنس SMA رفتاری مشابه کابل یا سیم دارند و تنها در کشش کار می کنند، کاملاً منطقی می نماید. از طرف دیگر می توان فرض نمود هر مهاربند به واسطه تعدادی پیچ کششی به قاب متصل شده است. مهاربندهایی که توسط پیچ های کششی به قاب متصل شده اند دارای مکانیزمی هستند که از پدید آوردن نیروی فشاری در مهاربندها جلوگیری می نمایند. حتی در صورت زیاد بودن نسبت لاغری مهاربندها، آنها هیچگاه دچار کماتش نمی شوند. از اینرو تغییرمکان های بزرگ و تکرار شونده ای که در زلزله های بزرگ به قاب وارد می شود هیچ گونه اختلالی را در حلقه های هیستریزس مهاربند به وجود نمی آورد.

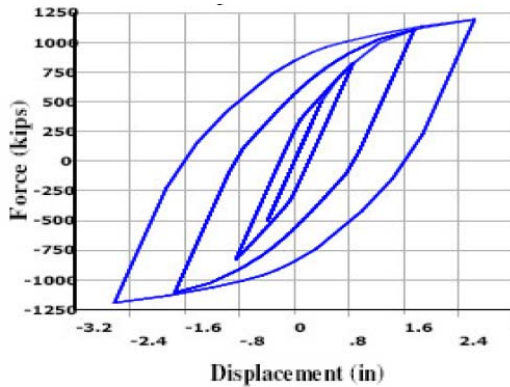


- Set 1: 6 Cycles $\Delta_{by} = 0.39''$
- Set 2: 4 Cycles $\Delta_{bm} = 0.86''$
- Set 3: 4 Cycles $\Delta_{bm} = 1.75''$
- Set 4: 2 Cycles $\Delta_{bm} = 2.63''$

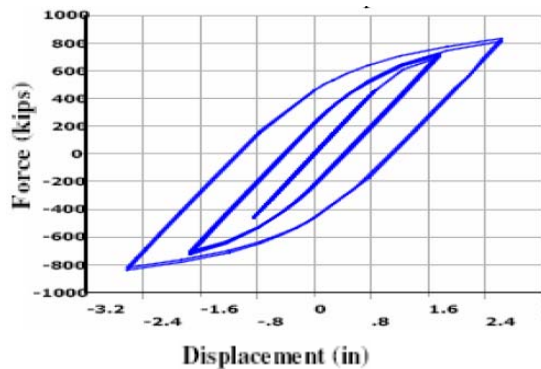
شکل ۶: پروتکل بارگذاری تغییر مکانی.



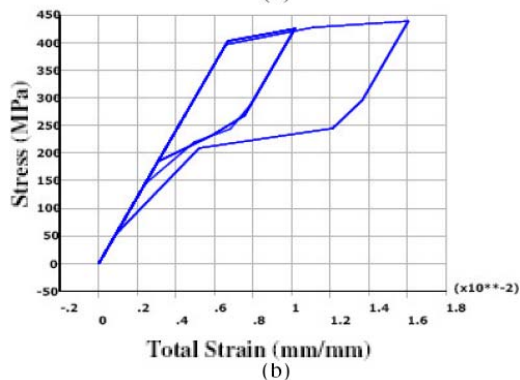
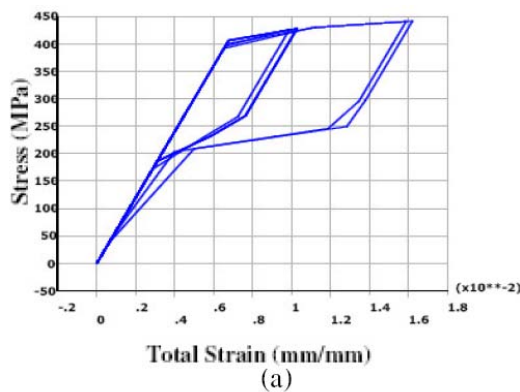
شکل ۷: پروتکل بارگذاری نیرویی.



شکل ۱۰: نمودار نیرو-تغییر مکان قاب با مهار بندهای فولادی (تحلیل ANSYS).

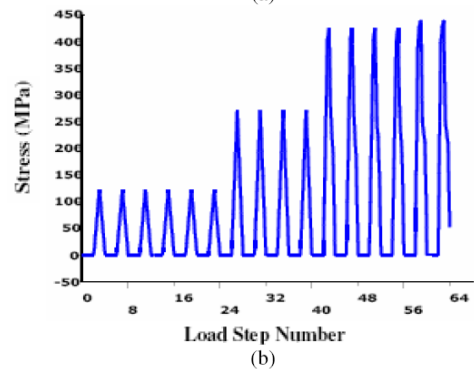
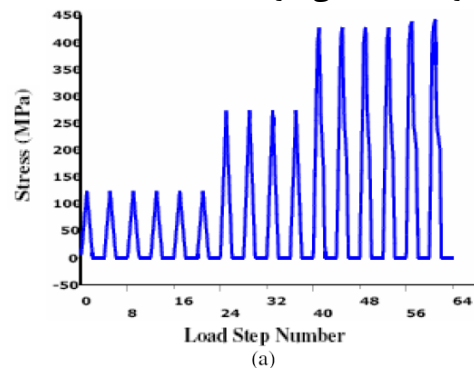


شکل ۱۱: نمودار نیرو-تغییر مکان قاب با مهار بندهای SMA (تحلیل ANSYS).

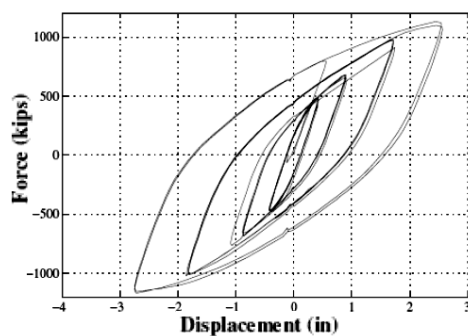


شکل ۱۲: نمودار تنش- کرنش محوری در مهار بند های SMA (a) مهار بند سمت چپ (b) مهار بند سمت راست.

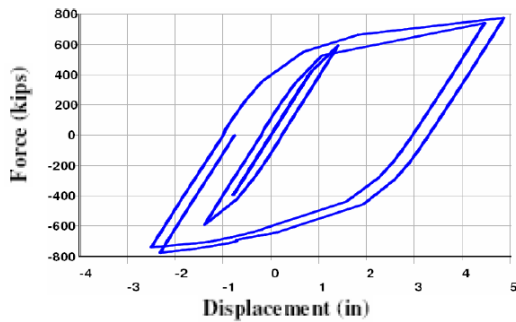
بروز می دهند به خوبی در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به تصویر کشیده شده است. این نمودارها رابطه تنش و کرنش را در هر یک از مهاربندها نشان می دهد. همانطور که قبلاً ذکر شد در مدلسازی رفتار مهاربندهای SMA فرض بر این بوده است که این مهاربندها تنها در کشش کار می کنند. بنابراین در هر گام بارگذاری تنها یک مهاربند کششی در مقاومت جانبی قاب مشارکت می کند. این در حالیتیست که در قابل مهاربند شده توسط اعضای فولادی هر دو مهاربند کششی و فشاری با هم در تحمل بارگذاری جانبی مشارکت می کنند. این مسأله منجر به پیدایش تنشهای بزرگتری در تیر و ستون قاب مهار بندی شده توسط SMA می شود.



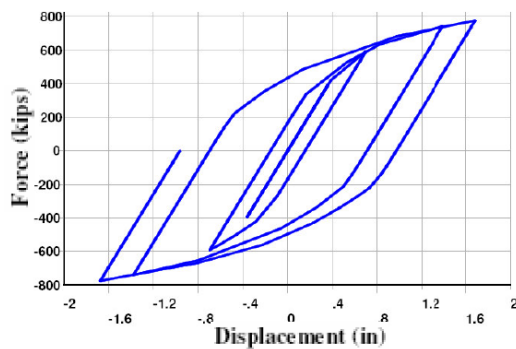
شکل ۸: (a) تنش محوری در مهاربند سمت چپ (b) تنش محوری در مهاربند سمت راست.



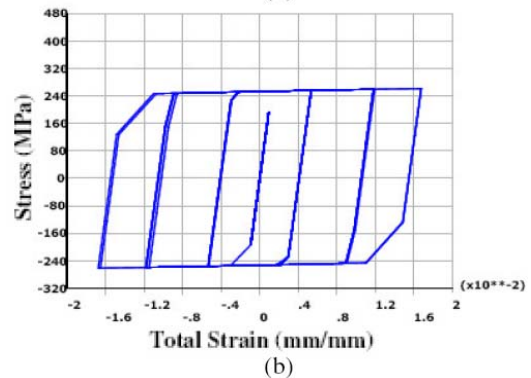
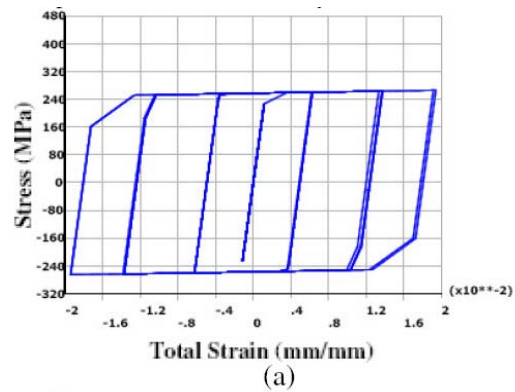
شکل ۹: نمودار نیرو-تغییر مکان قاب با مهار بندهای فولادی (آزمایش فیزیکی [۹]).



شکل ۱۴: رفتار چرخه ای قاب دارای مهاربندهای SMA تحت بارگذاری نیرویی.



شکل ۱۵: رفتار چرخه ای قاب دارای مهاربندهای فولادی تحت بارگذاری نیرویی.

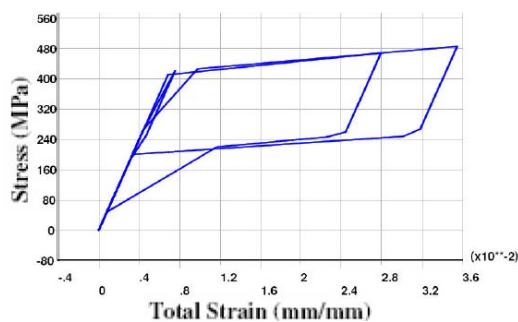


شکل ۱۳: نمودار تنش- کرنش محوری در مهار بند های فولادی (a) مهار بند سمت چپ (b) مهار بند سمت راست.

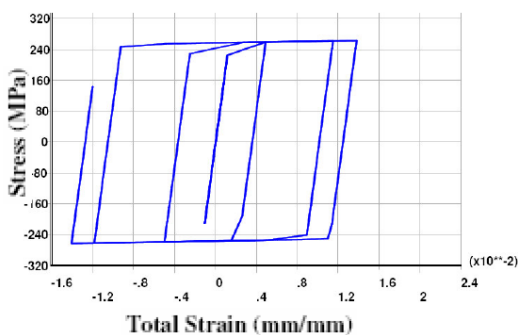
نتایج مربوط به بارگذاری نیرویی

همانطور که قبلاً ذکر شد بارگذاری نیرویی برای مقایسه تغییر مکانهای دائمی که در قابها باقی می ماند استفاده شده است. بارگذاری نیرویی بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل قاب تحت بارگذاری تغییرمکانی ایجاد شده است. رفتار چرخه ای قاب دارای مهاربندهای SMA و قاب دارای مهاربندهای فولادی مقید در برابر کماتش تحت پروتکل بارگذاری نیرویی در شکلهای (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. نتایج حاکی از آنست که تغییرمکان باقی مانده در قاب دارای مهاربندهای SMA از قاب دارای مهاربندهای فولادی مقید در برابر کماتش کمتر است.

پاسخهای غیرارتجاعی ویژه ای که مهاربندهای SMA و مهاربندهای فولادی مقید در برابر کماتش از خود تحت بارگذاری نیرویی اعمال شده، بروز می دهند در شکلهای (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده اند.



شکل ۱۶: نمودار تنش-کرنش محوری در مهار بند های SMA.



شکل ۱۷: نمودار تنش-کرنش محوری در مهار بند های فولادی.

نتیجه گیری

همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است رفتار چرخه ای قاب مهارشده به کمک اعضای فولادی که از تحلیل اجزاء محدود بدست آمده است به نمودار بدست آمده از آزمایش فیزیکی (شکل ۹) بسیار نزدیک است. با وجود آنکه سطح مقطع مهاربند از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی در این تحلیل در حدود ۱۴٪ سطح مقطع مهاربند فولادی می باشد، قابی که به وسیله سیمهای ضخیم از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی مهاربندی شده است عملکرد مناسب تری را از خود نشان می دهد.

از تحلیل قاب تحت بارگذاری تغییرمکانی چنین برمی آید که نیروی لازم برای اعمال بارگذاری تغییرمکانی رفت و برگشتی به قاب مهاربندی شده با SMA در حدود ۷۵٪ نیروی لازم برای اعمال تغییرمکانهای مشابه به قاب مهاربندی شده با اعضای فولادی مقید در برابر کمانش می شد. با مقایسه نمودارهای (۱۴) و (۱۵) که از تحلیل قاب تحت بارگذاری نیرویی بدست آمده اند، مشخص می شود که تغییر مکانی که در قاب دارای مهاربندهای SMA باقی می ماند در حدود ۷۵٪ تغییر مکانی است که در قاب دارای مهاربندهای فولادی مقید در برابر کمانش برجای می ماند. این نتیجه نیز بر عملکرد بهتر قاب مهاربندی شده توسط SMA صحت می گذارد. البته لازم به توضیح است که مطابق آنچه که در مراجع معتبر آمده مهاربندی فولادی مقید در برابر کمانش نسبت به

مهاربندهای سنتی و معمولی فولادی دارای عملکرد بسیار مناسب تری می باشد.

نمودارهای تنش - کرنش مهاربندهای از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی تطابق بسیار خوبی را با آزمایشهای تجربی که بر روی رفتار رفت و برگشتی سیمها و میله های از این جنس انجام شده و در بخش های قبل به آنها اشاره شده است، دارند. این نمودارها به خوبی توانایی SMA ها در بازگشت به شکل اولیه بعد از تحمل تغییر مکانهای بزرگ را به معرض نمایش می گذارد.

با در نظر گرفتن همه نکاتی که ذکر شد به این نتیجه می توان رسید که با توجه به قابلیت مهاربندهای SMA در بازگرداندن قاب به شکل اولیه و به حداقل رساندن کرنشهای پس ماند در داخل قاب و با توجه به اینکه این مهاربندها با سطح مقطع بسیار کوچکتر کارایی بهتری را نسبت به مهاربندهای فولادی مقید در برابر کمانش از خود بروز می دهند، استفاده از آنها در سازه های قابی بسیار مطلوب به نظر می رسند.

مراجع

- 1 - Auricchio, F., Taylor, R. L. and Lubliner, R. L. (1997). "Shape-memory alloys: macromodelling and numerical simulations of the super-elastic behavior." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 146, PP. 281-312.
- 2 - AISC (American Institute of Steel Construction), (1997). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, Chicago, USA.
- 3 - Liu, Z. and Goel, S. (1987). "Investigation of concrete filled steel tubes under cyclic bending and buckling." *Research Report UMCE 87-3*, Dept. of Civil Eng., Univ. of Michigan, Ann Arbor, USA.
- 4 - Kamura, H., Katayama, T., Shimokawa, H. and Okamoto, H. (2000). "Energy dissipation characteristics of hysteretic dampers with low yield strength steel." *Proc., U.S.-Japan Joint Meeting for Advanced Steel Structures*, Building Research Institute, Tokyo, Japan.
- 5 - Ohi, K., Shimawaki, Y., Lee, S. and Otsuka, H. (2001). "Pseudo-dynamic tests on pseudo-elastic bracing system made from shape memory alloy." *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center*, 34, PP. 21-28.

- 6 - Huang, W. (1999). "Modified shape memory alloy (SMA) model for SMA wire based actuator design." *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 10, PP. 221-231.
- 7 - Tamai, H. and Kitagawa, Y. (2000). "Pseudo-elastic Behavior of Shape Memory Alloy Wire and Its Application to Seismic Resistance Member For Building." IWCMM10, Galway, Ireland.
- 8 - Saadat, S., Salichs, J., Noori, M., Davoodi, H., Bar-on, I., Suzuki, Y. and Masuda, A. (2002). "An overview of vibration and seismic application of NiTi shape memory alloy." *Smart Material and Structures*, Vol. 11, PP. 218-229.
- 9 - Mahin, S. A. and Urx, P. (2003). "Seismic performance assessment of special concentrically braced frames." *Proc., International Workshop on Steel and Concrete Composite Construction (IWSCCC-2003)*, Report No. NCREE-03-026, National Center for Research on Earthquake Engineering, Taipei.
- 10 - DesRoches, R., McCormick, J. and Delemont, M. (2004). "Cyclic properties of shape memory alloy wires and bars." *J. of Structural Engineering*, Vol. 130, No.1, PP. 38-46.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Shape Memory Alloy
 - 2 - Nitinol
 - 3 - Superelasticity
 - 4 - Pseudoelasticity
 - 5 - Martensite
 - 6 - Austenite
 - 7 - Element death and birth
-