

بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی با استفاده از مهاربندهای ترکیبی از جنس فولاد و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

محمد هوشمند^۱، بهزاد رافضی^{۲*} و جعفر خلیل علافی^۳

^۱ کارشناس ارشد مهندسی عمران - سازه، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

چکیده

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی کاربردهای متنوعی در مهندسی سازه دارند. استفاده از این مصالح به عنوان میراگر در مهاربندها نمونه‌ای از کاربردها می‌باشد. هر چند تحقیق در مورد استفاده از این آلیاژها به عنوان میراگر بیشتر شده است، اما این میراگرها به دلیل داشتن هزینه‌های ساخت بالا، خیلی جنبه اجرایی به خود نگرفته و بیشتر حالت تحقیقاتی دارند. در این مقاله سعی شده است تا مهاربندهایی ترکیبی از جنس فولاد و آلیاژهای حافظه‌دار ارائه گردند. به طوری که این مهاربندهای ترکیبی، هم از لحاظ اقتصادی قابل توجه باشند و هم از لحاظ عملکرد لرزه‌ای، رفتار قابل قبولی را داشته باشند. به همین دلیل از شش مدل مهاربند ترکیبی استفاده شده است که در این مدل‌ها میزان مصرف طولی آلیاژ حافظه‌دار به ترتیب صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد می‌باشند. برای ارزیابی مدل‌ها از تحلیل دینامیکی غیر خطی استفاده شده است که تحت زلزله ال سنترو مقیاس شده با شتاب‌های حداکثر ۰.۶g و ۰.۹g قرار گرفته‌اند و در نرم‌افزار ANSYS v11 مدل‌سازی و تحلیل گردیده‌اند. نتایج مطالعات انجام شده مقادیر بهینه استفاده از درصد مهاربند ترکیبی را ارائه می‌دهد. به طوری که می‌توان با استفاده از طرح ارائه شده، سازه‌هایی با رفتار لرزه‌ای مناسب و با هزینه ساخت قابل توجه طراحی و اجرا نمود.

واژگان کلیدی: آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، مهاربند ترکیبی، تحلیل دینامیکی غیر خطی، زلزله ال سنترو.

۱- مقدمه

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به علت دارا بودن خصوصیات نظیر ظرفیت میرایی بالا، دوام، مقاومت در برابر خستگی و خوردگی و خصوصیات منحصر به فرد خود از قبیل حافظه شکلی^۱ و فوق ارتجاعی^۲ کاربردهای مختلفی در زمینه‌های مختلف مهندسی سازه اعم از کنترل فعال، نیمه فعال و غیرفعال پیدا کرده‌اند [۱]. یکی از مهمترین و مؤثرترین کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در مهندسی سازه، استفاده از این مواد به صورت مهاربند در سازه‌هاست؛ چرا که این آلیاژها به دلیل دارا بودن خصوصیات منحصر به فرد خود، قابلیت بازگرداندگی^۳ سازه به حالت اولیه و قابلیت استهلاک انرژی بالا را فراهم می‌کنند. ولی بسیاری از تحقیقات انجام یافته در مورد کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در مهندسی سازه در مرحله تئوری می‌باشند که تعداد کمی از آن‌ها آزمایشگاهی شده‌اند.

Dolce و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۰ در یک بررسی جامع

آزمایشگاهی، میراگرهای مختلفی با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی طراحی کردند. نتیجه کار منجر به معرفی سه نوع میراگر با رفتارهای مختلف شد که این سه نوع شامل میراگرهای بازگرداننده^۴ (RCD)، غیر بازگرداننده^۵ (NRCD) و بازگرداننده کمکی^۶ (SRCD) می‌باشند.

Salichs و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۱ مطالعه‌ای بر روی نمونه قاب ساختمانی یک طبقه که توسط سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی از نوع نیکل-تیتانیوم در حالت سوپرالاستیک به صورت قطری مهاربندی شده بود، انجام دادند و مدل فوق را تحت تحریک تکیه‌گاهی هارمونیک قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان دهنده کاهش قابل توجه تغییر مکان حداکثر قاب به علت ظرفیت میرایی بالای سیستم به کار رفته بود که موجب کاهش خرابی سازه‌ای در مقایسه با مهاربندهای فولادی

4- Recentering devices

5- Not-recentering devices

6- Supplemental recentering devices

1- Shape memory effect

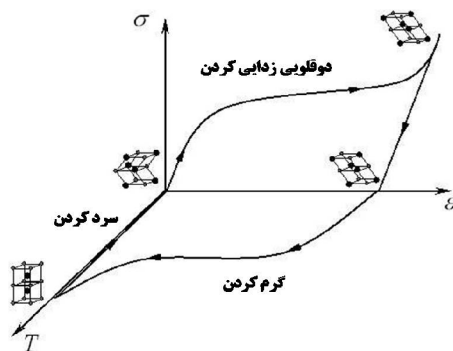
2- Superelastic

3- Re-centering

۱-۲- خاصیت حافظه‌داری شکلی

۱-۱-۲- اثر حافظه‌داری یک طرفه^۴

اگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی در فاز مارتنزیت دوقلویی^۵ قرار گیرد و دمای آن زیر M_f (دمای پایان تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت در حین سرد شدن) باشد، با اعمال تنش، آلیاژ تغییر شکل یافته و مارتنزیت دوقلویی به مارتنزیت دوقلویی زدایی شده^۶ تبدیل می‌شود که در این حالت آلیاژ به حالت اولیه خود بر نمی‌گردد و کرنش پسماند در آن بر جای می‌ماند. با گرم کردن آلیاژ تا بالای دمای A_f (دمای پایان تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت در حین گرم شدن)، آلیاژ تبدیل فاز داده و به فاز آستنیت تبدیل می‌شود و کرنش پسماند از بین می‌رود و آلیاژ به حالت اولیه خود برمی‌گردد. در شکل (۱) این حالت نشان داده شده است.



شکل ۱- نمودار تنش-کرنش آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در حالت حافظه‌داری یک طرفه^[۶]

۲-۱-۲- اثر حافظه‌داری دو طرفه^۷

در این حالت نیز همانند اثر حافظه‌داری یک طرفه، آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در فاز مارتنزیت قرار دارند. در این حالت بدون اعمال تنش، و فقط با گرم و سرد کردن نمونه، تغییر حالت مارتنزیت به آستنیت و بالعکس رخ می‌دهد و آلیاژ می‌تواند دو شکل متفاوت را در دمای بالا و پایین به خاطر بسپارد. البته قابل ذکر است که این خاصیت در تعداد کمی از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی دیده می‌شود و برای به دست آوردن این حالت باید روش تمرین و ممارست^۸ را به کار برد. از این خاصیت در ساخت بست‌های برگشت‌پذیر، محرک‌های حساس به دما و درون

با سختی یکسان گردید.

Han و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۳ رفتار دینامیکی یک مدل قاب فولادی را که توسط میراگرهایی از جنس فولاد و آلیاژ حافظه‌دار مهاربندی شده بود را مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج حاکی از کاهش حداکثر جابجایی قاب مهاربندی شده نسبت به قاب مهاربندی نشده است.

Auricchio و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۶ در تحقیقات خود مقایسه‌ای بین عملکرد دو نوع سیستم مهاربند آلیاژ حافظه‌دار فوق ارتجاعی و مهاربندهای مقاوم در برابر کمانش^۱ انجام دادند. در این تحقیق، نمونه‌ها شامل قاب سه طبقه یک دهانه و قاب شش طبقه یک دهانه می‌باشند. این محققین با توجه به نتایج تحلیل‌های انجام یافته به این نتیجه رسیدند که هر دو نوع مهاربندی‌ها به لحاظ جابجایی نسبی ایجاد شده عملکرد مشابهی دارند. اما در مورد جابجایی پسماند، مهاربندهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی عملکرد به مراتب بهتری از خود نشان داده‌اند. به طوری که برای مهاربندهای مقاوم در برابر کمانش، مقدار جابجایی پسماند ۱۹۲mm بوده در حالی که برای مهاربندهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی، مقدار جابجایی پسماند فقط ۲/۵mm می‌باشد.

۲- آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی دارای دو فاز کریستالی به نام‌های آستنیت^۲ و مارتنزیت^۳ می‌باشند. در حالت آستنیت تقارن بالا و در حالت مارتنزیت تقارن پایین می‌باشد. آستنیت در دماهای بالا و تنش‌های پایین و مارتنزیت در دماهای پایین و تنش‌های بالا پایدار می‌باشد. لذا با اعمال بارگذاری‌های حرارتی و یا مکانیکی این دو فاز می‌توانند به یکدیگر تبدیل شوند.

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی دارای خصوصیات ویژه‌ای می‌باشند که در مقایسه با سایر آلیاژها و فلزات آن‌ها را متمایز می‌کنند که این خصوصیات عبارتند از: خاصیت حافظه‌داری شکلی و خاصیت فوق ارتجاعی. در ادامه هر یک از این خصوصیات توضیح داده می‌شود.

4- One way shape memory effect
5- Twinned martensite
6- Detwinned martensite
7- Two way shape memory effect
8- Training

1- Buckling-restrained braces
2- Austenite
3- Martensite

۳- اهداف مقاله

در این مقاله سعی شده است که یک مهاربند ترکیبی از فولاد و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی ارائه شود. به طوری که این مهاربند ترکیبی هم از لحاظ اقتصادی قابل توجیه شود و هم از لحاظ رفتار لرزه‌ای قابل قبول باشد. برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای مهاربندها، مقدار تغییر مکان باقی‌مانده سازه و میزان جذب انرژی سازه ملاک مقایسه بین مدل‌ها می‌باشد.

۳-۱- صحت‌سنجی بر روی یک قاب سه طبقه در نرم‌افزار

ANSYS

همان طوری که قبلاً گفته شد، این مقاله درصدد پیشنهاد یک مهاربند ترکیبی از جنس SMA و فولاد می‌باشد. به همین دلیل صحت‌سنجی بر روی یک سازه فولادی دارای مهاربند انجام شده است که این سازه توسط قاسمیه و کاری با نرم‌افزار AIMS مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است [۸]. در ادامه به این سازه و نتایج تحلیل آن اشاره می‌گردد.

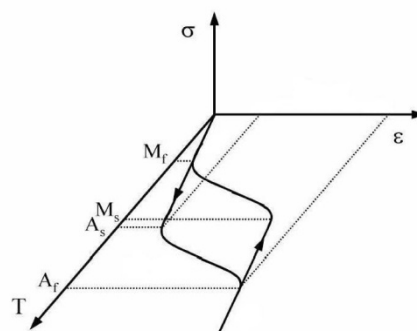
سازه بررسی شده، یک سازه سه طبقه است که توسط Sabelli پیشنهاد شده است. با فرض تقارن در پلان تنها یک قاب دو بعدی از سازه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. ارتفاع هر طبقه ۳/۹۶ متر بوده و پلان سازه ۹/۱۴ در ۹/۱۴ متر می‌باشد [۹]. طبقات دارای سقف کامپوزیت با ارتفاع قسمت فولادی ۷۶ میلی‌متر و ۵۰ میلی‌متر پوشش بتنی می‌باشند. هندسه و مقاطع طراحی شده برای این قاب در جدول (۱) و شکل (۴) ارائه شده است. مهاربندهای SMA در هر طبقه به نحوی انتخاب شدند که سختی محوری و نیروی محوری ($\sigma.A$) یکسانی با مهاربندهای BRBS داشته باشند. قابل ذکر است که از تغییر شکل محوری تیر صرف‌نظر شده است [۸].

مدول الاستیسیته اعضای فولادی برابر با ۲۰۰۰۰۰ MPa، تنش مدول پلاستیک اعضای فولادی برابر با ۲۰۰۰۰ MPa، تنش تسلیم اعضای فولادی برابر با ۲۴۰ MPa و درصد میرایی برابر با ۵ درصد در نظر گرفته شده است و مشخصات مکانیکی بادبندهای SMA فوق ارتجاعی مطابق جدول (۲) می‌باشد [۸].

جدول ۱- مشخصات هندسی به کار رفته در مدل Sabelli [۹]

ستون‌ها	تیرها	بادبندها	طبقه
۱۰۶x۱۲ W	۴۶x۱۸ W	۰/۵x۸x۸ HSS	۱
۱۰۶x۱۲ W	۴۶x۱۸ W	۰/۵x۶x۶ HSS	۲
۱۰۶x۱۲ W	۴۶x۱۸ W	۰/۳۷۵x۵x۵ HSS	۳

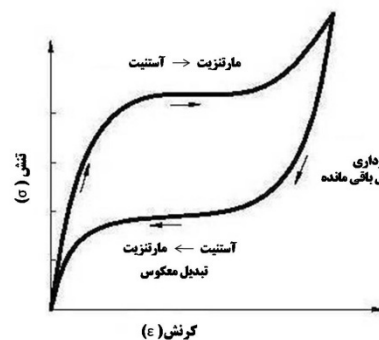
کاشت‌های پزشکی استفاده می‌شود [۷]. در شکل (۲) این حالت نشان داده شده است. قابل ذکر است که در شکل (۲)، M_s دمای شروع تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت در حین سرد شدن و A_s دمای شروع تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت را در حین گرم شدن نمونه مشخص می‌کنند.



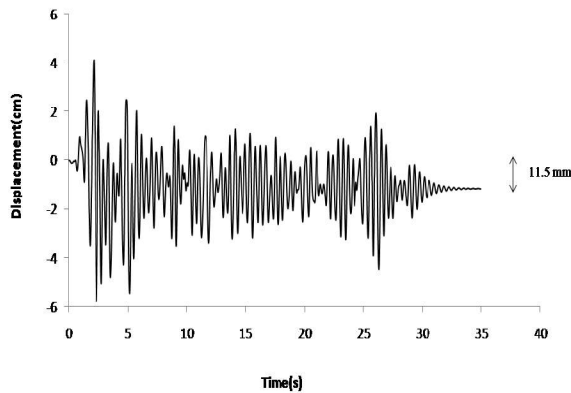
شکل ۲- نمودار تنش- کرنش آلیاژ حافظه‌دار شکلی در حالت حافظه‌داری دو طرفه [۶]

۲-۲- خاصیت فوق ارتجاعی

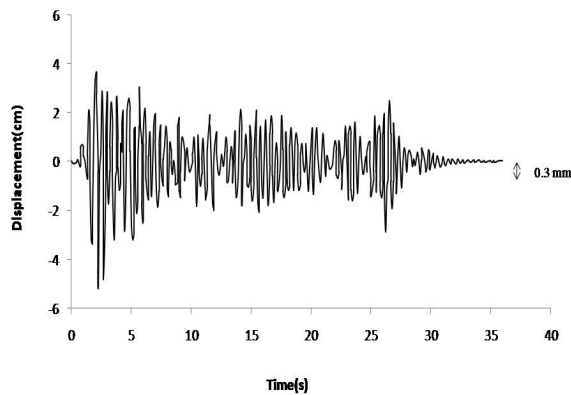
اگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی در فاز آستنیت قرار گیرد و دمای آن بالاتر از A_f و پایین تر از M_d (دمایی بالاتر از A_f که در این دما آلیاژ رفتار کاملاً الاستو - پلاستیک دارد) باشد، اعمال تنش به این ماده موجب تبدیل آستنیت به مارتنزیت ایجاد شده توسط تنش می‌شود. با انجام باربرداری، فاز مارتنزیت ناپایدار شده و تبدیل معکوس اتفاق می‌افتد که در نتیجه این تبدیل ماده به حالت اولیه خود باز می‌گردد و هیچ کرنش پسماندی برجای نمی‌ماند. این رفتار خاصیت فوق ارتجاعی (سوپر الاستیسیته یا شبه الاستیسیته) نامیده می‌شود. شکل (۳) رفتار سوپر الاستیسیته را در آلیاژ حافظه‌دار به وضوح نشان می‌دهد.



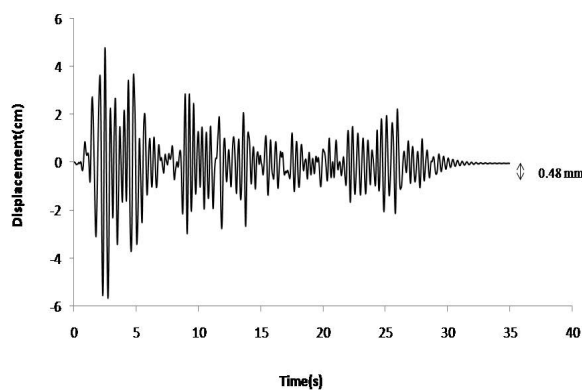
شکل ۳- نمودار تنش- کرنش آلیاژ حافظه‌دار شکلی در حالت فوق ارتجاعی [۶]



شکل ۶- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربند فولادی مقاوم در برابر کماتش به دست آمده از تحلیل ANSYS

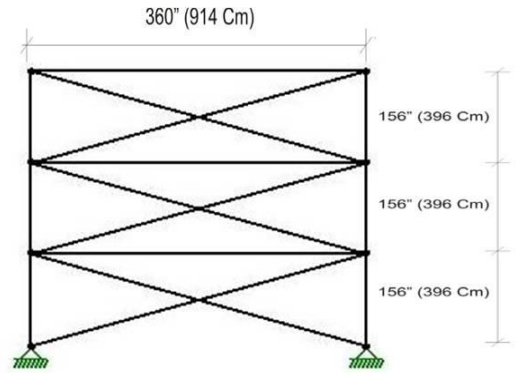


شکل ۷- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربند از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی به دست آمده از نتایج قاسمیه و کاری [۸]



شکل ۸- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربند از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی به دست آمده از تحلیل ANSYS

همان طوری که در شکل‌های (۵) تا (۸) دیده می‌شود، نتایج به دست آمده حاکی از تطابق قابل قبولی بین نمودارهای به دست آمده از نتایج قاسمیه و کاری و تحلیل ANSYS می‌باشد.

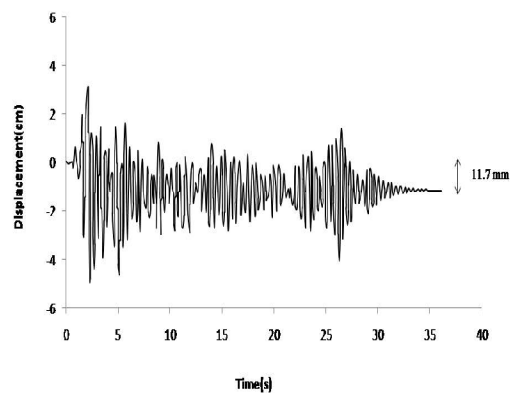


شکل ۴- مدل هندسه سازه نمونه [۹]

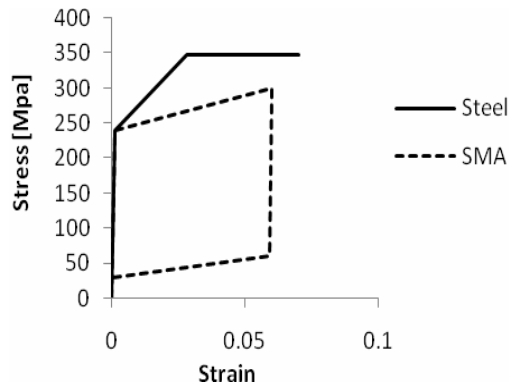
جدول ۲- پارامترهای بکار رفته در مدل رفتاری SMA

مقدار (MPa)	تنش تسلیم
۴۲۰	Martensite-to-Austenite start stress
۵۰۰	Martensite-to-Austenite finish stress
۳۰۰	Austenite-to-Martensite start reverse-stress
۲۰۰	Austenite-to-Martensite finish reverse-stress
۶/۵٪	phase transformation strain
۴۰۰۰۰	Martensite-to-Austenite Module of elasticity

در این صحت‌سنجی تنها دو نمونه از مدل‌های کاری بررسی شده است و این مدل‌ها بدین صورت می‌باشند که در هر دو حالت، سازه مورد نظر تحت زلزله ال سنترو با شتاب $0.6g$ قرار گرفته است. مدل اول دارای مهاربند فولادی مقاوم در برابر کماتش بوده و مدل دوم دارای مهاربند از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی می‌باشد. در شکل‌های (۵) تا (۸) نمودارهای به دست آمده توسط کاری [۸] و نمودارهای به دست آمده توسط نرم‌افزار ANSYS جهت مقایسه ارائه شده‌اند.



شکل ۵- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربند فولادی مقاوم در برابر کماتش به دست آمده از نتایج قاسمیه و کاری [۸]

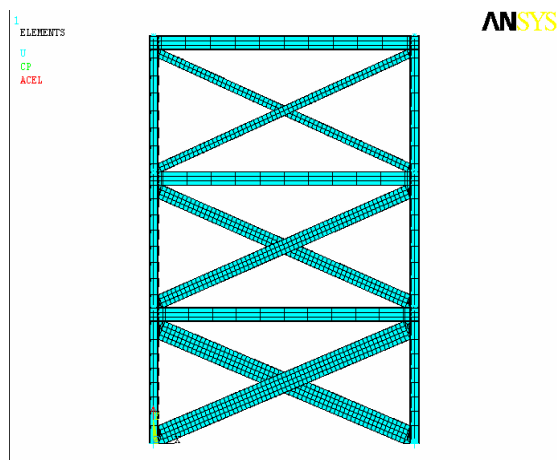


شکل ۱۰- نمودار تنش - کرنش فولاد و آلیاژ حافظه‌دار شکلی به کار برده شده در مهاربندها

جدول ۴- پارامترهای به کار رفته در مدل رفتاری SMA [۱۱]

مقدار	مفهوم	ثابت
۲۴۰ [MPa]	تنش مربوط به آغاز تبدیل فاز مستقیم	σ_s^{AS}
۳۰۰ [MPa]	تنش مربوط به پایان تبدیل فاز مستقیم	σ_f^{AS}
۶۰ [MPa]	تنش مربوط به آغاز تبدیل فاز معکوس	σ_s^{SA}
۳۰ [MPa]	تنش مربوط به پایان تبدیل فاز معکوس	σ_f^{SA}
۶ %	حداکثر کرنش ایجاد شده در اثر تبدیل فاز	ϵ_L
۸۰۰۰۰ [MPa]	مدول مارتنزیت	Y_{mrt}

برای مدل‌سازی المان‌های قاب در ANSYS، از Solid185 استفاده شده است و این به خاطر قابلیت معرفی مدل رفتاری آلیاژ حافظه‌دار در این المان می‌باشد. به دلیل استفاده از Solid، ایجاد مفصل کامل در اتصال مهاربند به تیر-ستون امکان‌پذیر نمی‌باشد و همین عمل باعث ایجاد نیروی اضافی در گوشه‌های مهاربندها می‌شود. در شکل (۱۱) نحوه مدل‌سازی قاب در ANSYS و در شکل (۱۲) نحوه مش‌بندی و اتصال مهاربند به تیر-ستون نشان داده شده است.



شکل ۱۱- نحوه مدل‌سازی قاب در ANSYS

البته قابل ذکر است که تفاوت جزئی بین مدل‌ها وجود دارد که دلیل اصلی آن را می‌توان در نحوه اتصال مهاربند به تیر-ستون دانست. بدین معنی که در مدل‌های بررسی شده در ANSYS امکان ایجاد مفصلی کامل میسر نگردیده است؛ در حالی که مدل‌های کاری به صورت مفصل کامل در نظر گرفته شده است. در بخش (۲-۳) نحوه اتصال مهاربند به تیر-ستون در ANSYS شرح داده شده است.

۲-۳- مشخصات مدل

سازه مورد بررسی، همان سازه سه طبقه پیشنهادی توسط Sabelli است که در بخش صحت‌سنجی ارائه و توضیح داده شده است. تفاوتی که در این بخش وجود دارد این است که مدل رفتاری آلیاژها متفاوت شده است. مدل‌هایی که برای این تحقیق استفاده شده بدین صورت می‌باشند که مهاربندها، ترکیبی از فولاد و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بوده و میزان مصرف طولی این آلیاژها به ترتیب صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد می‌باشند که مدل اول، همان مدل مهاربند فولادی و مدل آخر، همان مدل مهاربند آلیاژ حافظه‌دار شکلی می‌باشد. در جدول (۳) درصد میزان مصرف فولاد و SMA به کار برده شده در مهاربندها و در شکل (۹) شماتیکی از این مهاربندها نشان داده شده است.

جدول ۳- درصد میزان مصرف فولاد و SMA به کار برده شده

در مهاربندها

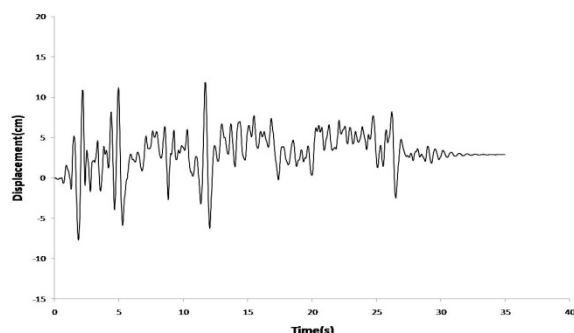
درصد مصرف طولی فولاد	درصد مصرف طولی آلیاژ حافظه‌دار شکلی	نوع مدل
۱۰۰	۰	مدل اول
۸۰	۲۰	مدل دوم
۶۰	۴۰	مدل سوم
۴۰	۶۰	مدل چهارم
۲۰	۸۰	مدل پنجم
۰	۱۰۰	مدل ششم



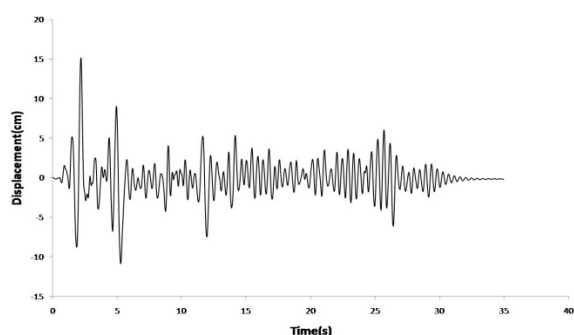
شکل ۹- شماتیک مهاربند به کار برده شده در سازه

مدل رفتاری فولاد و آلیاژ حافظه‌دار شکلی به کار برده شده در مهاربندها در شکل (۱۰) و جدول (۴) نشان داده شده است.

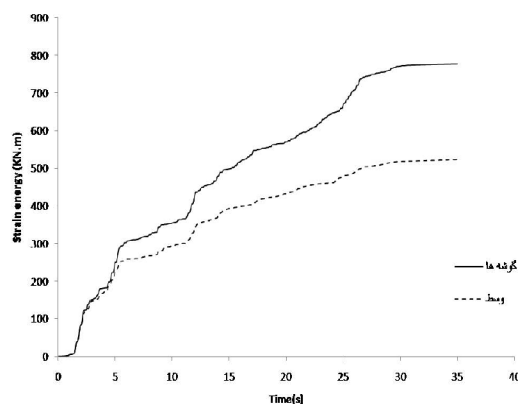
شکل‌های (۱۵) تا (۱۷)، برای حالتی که سازه تحت حداکثر شتاب $0.9g$ قرار گرفته است، جهت مقایسه نشان داده شده‌اند. جدول (۵) مقایسه عملکرد لرزه‌ای این دو مهاربند را تحت حداکثر شتاب‌های $0.6g$ و $0.9g$ ارائه می‌دهد.



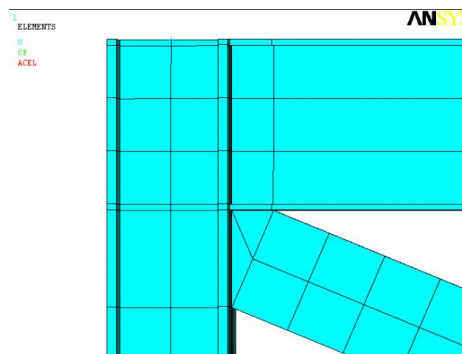
شکل ۱۵- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم تحت حداکثر شتاب $0.9g$ در حالتی که آلیاژ حافظه‌دار در وسط قرار گرفته است.



شکل ۱۶- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم تحت حداکثر شتاب $0.9g$ در حالتی که آلیاژ حافظه‌دار در گوشه‌ها قرار گرفته است.



شکل ۱۷- مقایسه نمودارهای انرژی کرنشی سازه تحت حداکثر شتاب $0.9g$ در حالتی که آلیاژ حافظه‌دار در وسط و در گوشه‌ها قرار گرفته‌اند.



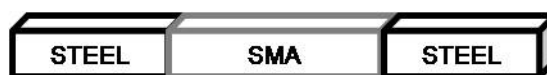
شکل ۱۲- نحوه مش‌بندی و اتصال مهاربند به تیر- ستون

۳-۳- تحلیل و نتایج آن

دو تفاوت عمده بین رفتار فولاد و آلیاژ حافظه‌دار وجود دارد که یکی از این تفاوت‌ها، این است که آلیاژ حافظه‌دار بعد از تحمل یک کرنش بزرگ، قادر است به حالت اولیه خود باز گردد و به اصطلاح تغییر مکان افقی سازه را به حداقل برساند و دیگری این که میزان جذب انرژی در سازه را افزایش می‌دهد. در این بخش سعی شده است تا با مقایسه نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی و نمودار انرژی کرنشی سازه در تمامی مدل‌ها، بهینه‌ترین مهاربند را هم از لحاظ مصرف آلیاژ حافظه‌دار شکلی و هم از لحاظ رفتار لرزه‌ای ارائه داد.

۳-۳-۱- نحوه قرارگیری فولاد و آلیاژ حافظه‌دار در مهاربند

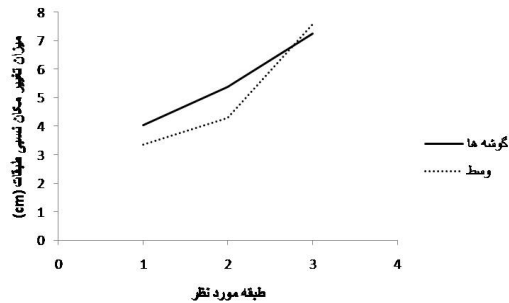
یکی از مسائلی که در این نوع مهاربندها به وجود می‌آید ترتیب قرارگیری آلیاژها در طول مهاربند می‌باشد. به طوری که بتوان عملکرد لرزه‌ای مناسب را از مهاربند به دست آورد. در این شرایط دو حالت قابل بررسی است که حالت اول این است که آلیاژ حافظه‌دار شکلی مصرفی در وسط مهاربند به کار برده شود (مطابق شکل (۱۳)) و در حالت دیگر، این آلیاژها در گوشه‌های مهاربند به کار برده شوند (مطابق شکل (۱۴)). ابتدا این دو حالت مقایسه و بهترین وضعیت ملاک عمل خواهد بود.



شکل ۱۳- قرارگیری آلیاژ حافظه‌دار در وسط مهاربند



شکل ۱۴- قرارگیری آلیاژ حافظه‌دار در گوشه‌های مهاربند

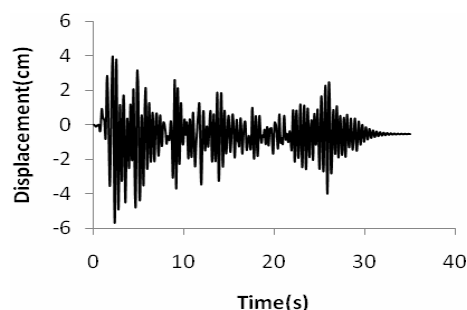


شکل ۱۹- مقایسه تغییر مکان نسبی طبقات تحت حداکثر شتاب ۰/۹g در حالتی که آلیاژ حافظه‌دار در وسط و در گوشه‌ها قرار گرفته‌اند.

اما میزان تغییر مکان نسبی طبقات تحت حداکثر شتاب ۰/۹g برای هر دو حالت متفاوت بوده و در طبقات اول و دوم، برای حالتی که SMA در گوشه‌ها قرار دارد بیشتر می‌باشد و در طبقه سوم برای حالتی که SMA در وسط قرار دارد بیشتر می‌باشد. اما مسئله‌ای که در اینجا پیش آمده است این است که در حالت دوم (که SMA در گوشه‌ها قرار دارد) سازه کنترل مناسبی نسبت به تغییر مکان نسبی طبقات از خود نشان داده و سازه کنترل شده عمل می‌کند. اما در حالت اول چنین نبوده و میزان تغییر مکان نسبی طبقه سوم افزایش بالایی را نسبت به طبقه دوم از خود نشان می‌دهد. پس از این، در تمامی مدل‌های ارائه شده در این مقاله، آلیاژ حافظه‌دار شکلی در گوشه‌های مهاربند به کار برده می‌شود.

۳-۲-۳- مقایسه تغییر مکان افقی باقی مانده و انرژی کرنشی در سازه

نمودارهای تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم تمامی مدل‌ها تحت حداکثر شتاب ۰/۶g در شکل‌های (۲۰) تا (۲۵) نشان داده شده است.

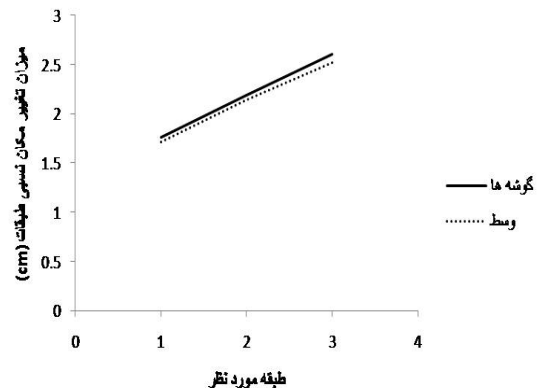


شکل ۲۰- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربندی با ترکیب 0% SMA و 100% Steel تحت حداکثر شتاب ۰/۶g

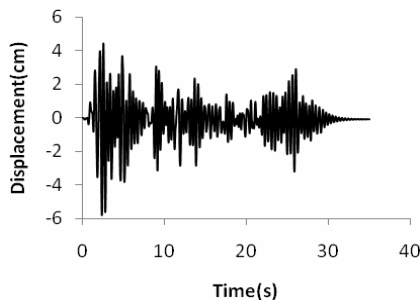
جدول ۵- مقایسه عملکرد سازه در حالتی که آلیاژ حافظه‌دار شکلی در وسط و در گوشه‌ها قرار گرفته است

مدل مورد نظر	تغییر مکان باقی مانده تحت حداکثر شتاب ۰/۶g (mm)	میزان انرژی کرنشی تحت حداکثر شتاب ۰/۶g (kN.m)	تغییر مکان باقی مانده تحت حداکثر شتاب ۰/۹g (mm)	میزان انرژی کرنشی تحت حداکثر شتاب ۰/۹g (kN.m)
SMA در وسط	5.53	455.8	28.73	522
SMA در گوشه	1.12	455.9	1.71	776
بهترین عملکرد	SMA در گوشه	SMA در گوشه	SMA در گوشه	SMA در گوشه

همان طوری که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، بهینه‌ترین حالت زمانی صورت می‌گیرد که آلیاژهای حافظه‌دار در گوشه‌ها قرار گیرد و دلیل اصلی آن این است که در مدل‌های بررسی شده، اتصال مهاربند به تیر و ستون، کاملاً مفصلی نبوده و این باعث می‌شود تا در گوشه‌ها نیروی اضافی تولید شده و باعث شود تا نیروی بیشتری به المان‌های گوشه وارد شود که در این حالت آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به دلیل قابلیت بازگرداندگی مهاربند به حالت اول و جذب انرژی بالا عکس‌العمل بهتری نسبت به فولاد از خود نشان می‌دهند. اما برای مقایسه بهتر این دو حالت، میزان تغییر مکان نسبی طبقات نیز بررسی گردید که در شکل (۱۸) برای حالت ۰/۶g و در شکل (۱۹) برای حالت ۰/۹g جهت مقایسه نشان داده شده است. با توجه به اشکال (۱۸) و (۱۹) مشاهده می‌شود که میزان تغییر مکان نسبی طبقات تحت حداکثر شتاب ۰/۶g برای هر دو حالت یکسان است که این به این دلیل است که در این میزان شتاب، فولاد و SMA رفتار مشابهی نسبت به هم دارند.



شکل ۱۸- مقایسه تغییر مکان نسبی طبقات تحت حداکثر شتاب ۰/۶g در حالتی که آلیاژ حافظه‌دار در وسط و در گوشه‌ها قرار گرفته‌اند.

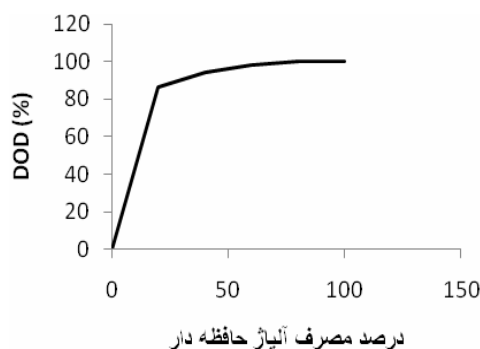


شکل ۲۵- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربندی با ترکیب 0% SMA و 100% Steel تحت حداکثر شتاب ۰/۶g

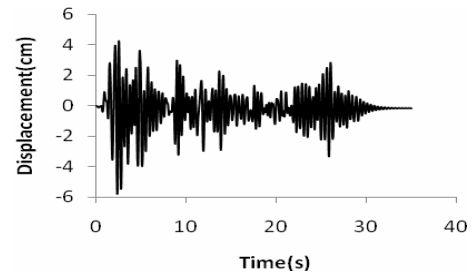
برای مقایسه بهتر، میزان تغییر مکان باقی‌مانده سازه در سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب ۰/۶g در جدول (۶) آورده شده است و همین مقایسه در شکل (۲۶) به صورت نموداری نشان داده شده است. این شرایط برای انرژی کرنشی نیز بررسی شده و در جدول (۷) و شکل (۲۷) نشان داده شده است (به جای DOD، از DOE استفاده شده است).

جدول ۶- مقایسه تغییر مکان باقی‌مانده سازه در سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب ۰/۶g

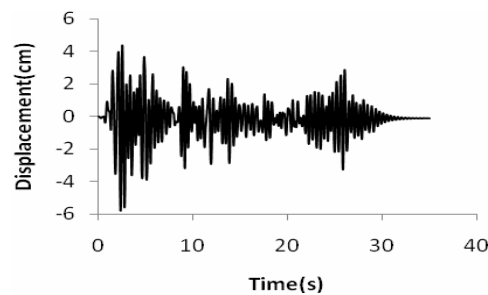
مدل مورد نظر	تغییر مکان باقی مانده در سازه (mm)	DOD (برحسب درصد)
سیستم مهاربندی 0% SMA و 100% Steel	۵/۳۱	٪۰
سیستم مهاربندی 20% SMA و 80% Steel	۱/۴۶	٪۸۶
سیستم مهاربندی 40% SMA و 60% Steel	۱/۱۰	٪۹۴
سیستم مهاربندی 60% SMA و 40% Steel	۰/۹۳	٪۹۸
سیستم مهاربندی 80% SMA و 20% Steel	۰/۸۵	٪۹۹/۸
سیستم مهاربندی 100% SMA و 0% Steel	۰/۸۴	٪۱۰۰



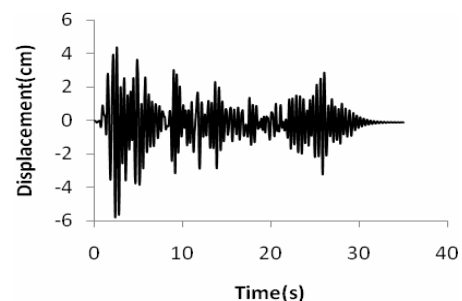
شکل ۲۶- مقایسه درصد مصرف آلیاژ حافظه‌دار با DOD تحت حداکثر شتاب ۰/۶g



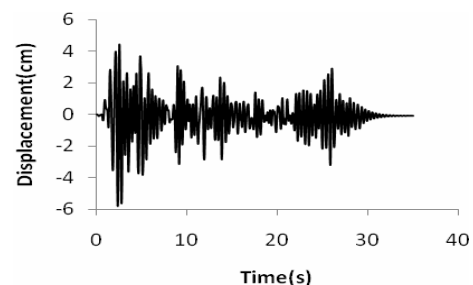
شکل ۲۱- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربندی با ترکیب 20% SMA و 80% Steel تحت حداکثر شتاب ۰/۶g



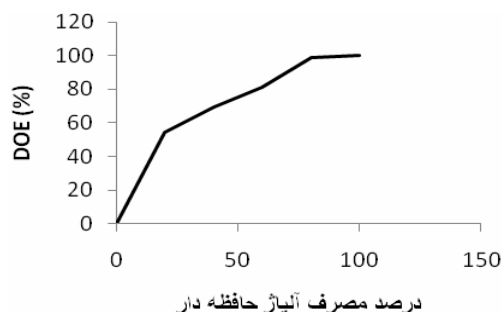
شکل ۲۲- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربندی با ترکیب 40% SMA و 60% Steel تحت حداکثر شتاب ۰/۶g



شکل ۲۳- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربندی با ترکیب 60% SMA و 40% Steel تحت حداکثر شتاب ۰/۶g



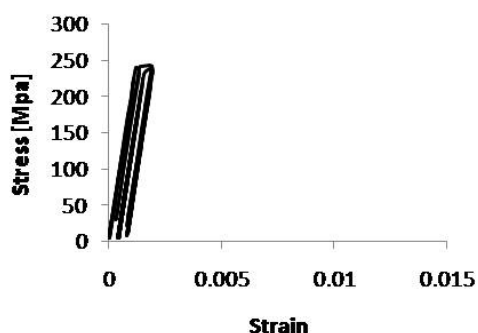
شکل ۲۴- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربندی با ترکیب 80% SMA و 20% Steel تحت حداکثر شتاب ۰/۶g



شکل ۲۷- مقایسه درصد مصرف آلیاژ حافظه‌دار با DOE تحت حداکثر شتاب ۰/۶g

اما باید به این نکته نیز اشاره کرد که هر چند عملکرد لرزه‌ای مهاربندها با افزایش SMA، بهبود می‌یابد، اما در حالت کلی تفاوت چندانی در بین مدل‌ها وجود ندارد و این بدین دلیل است که تحت حداکثر شتاب ۰/۶g، مهاربندها در حالت خطی باقی‌مانده و در بعضی مواقع کمتر وارد ناحیه غیر خطی می‌شوند و چون SMA و فولاد حالت خطی یکسانی دارند، به همین خاطر عملکرد لرزه‌ای یکسانی را از خود نشان می‌دهند (این حالت در مقایسه اشکال (۲۰) تا (۲۵) به وضوح مشاهده می‌شود). به همین خاطر به دلیل هزینه بالای SMA در مقایسه با فولاد، مصرف SMA خیلی به صرفه نخواهد بود. در شکل‌های (۲۸) و (۲۹)، به ترتیب نمودار هیستریزس مهاربندهای فولاد و SMA تحت حداکثر شتاب ۰/۶g برای مقایسه بهتر موضوع نشان داده شده‌اند.

همان طوری که گفته شد مدل‌ها تحت حداکثر شتاب‌های ۰/۶g و ۰/۹g بررسی شده‌اند که نتایج مدل‌های تحت حداکثر شتاب ۰/۹g را می‌توان در جدول‌های (۸) و (۹) و شکل‌های (۳۰) تا (۳۲) مشاهده کرد.



شکل ۲۸- نمودار هیستریزس مهاربند فولادی (مدل اول) تحت حداکثر شتاب ۰/۶g

قابل ذکر است که منظور از DOD و DOE، به ترتیب، میزان تغییر مکان باقی‌مانده و میزان انرژی کرنشی مهاربند مورد نظر در مقایسه با مهاربند فولادی و مهاربند آلیاژ حافظه‌دار بر حسب درصد می‌باشد که نحوه به دست آوردن DOD و DOE، در روابط (۱) و (۲) نشان داده شده است.

$$DOD = \frac{D_M - D_{ST}}{D_{SMA} - D_{ST}} \quad (1)$$

D_M مقدار تغییر مکان باقی‌مانده در سیستم مهاربندی با ترکیب مورد نظر

D_{ST} مقدار تغییر مکان باقی‌مانده در سیستم مهاربندی با ترکیب Steel 100% و SMA 0%

D_{SMA} مقدار تغییر مکان باقی‌مانده در سیستم مهاربندی با ترکیب Steel 0% و SMA 100%

$$DOE = \frac{E_M - E_{ST}}{E_{SMA} - E_{ST}} \quad (2)$$

E_M میزان انرژی کرنشی سازه در سیستم مهاربندی با ترکیب مورد نظر

E_{ST} میزان انرژی کرنشی سازه در سیستم مهاربندی با ترکیب Steel 100% و SMA 0%

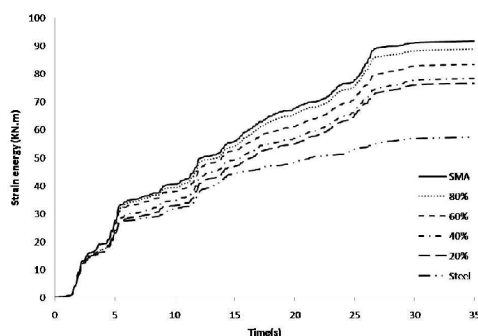
E_{SMA} میزان انرژی کرنشی سازه در سیستم مهاربندی با ترکیب Steel 0% و SMA 100%

جدول ۷- مقایسه میزان انرژی کرنشی سازه در سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب ۰/۶g

نوع مدل	میزان انرژی کرنشی (KN.m)	DOE (بر حسب درصد)
سیستم مهاربندی Steel 100% و SMA 0%	۲۵۲	٪۰
سیستم مهاربندی Steel 80% و SMA 20%	۴۵۵	٪۵۴
سیستم مهاربندی Steel 60% و SMA 40%	۴۵۶	٪۶۹
سیستم مهاربندی Steel 40% و SMA 60%	۴۵۶/۵	٪۸۱
سیستم مهاربندی Steel 20% و SMA 80%	۴۵۷/۴	٪۹۹
سیستم مهاربندی Steel 0% و SMA 100%	۴۵۷/۵	٪۱۰۰

همان طوری که در جداول (۶) و (۷) و اشکال (۲۶) و (۲۷) مشاهده می‌شود، مدل‌های دوم تا پنجم نسبت به میزان مصرف SMA، عملکرد لرزه‌ای مطلوبی را از خود نشان می‌دهند و مدل دوم یک مصرف بهینه‌ای را در مقایسه با عملکرد لرزه‌ای از خود نشان می‌دهد.

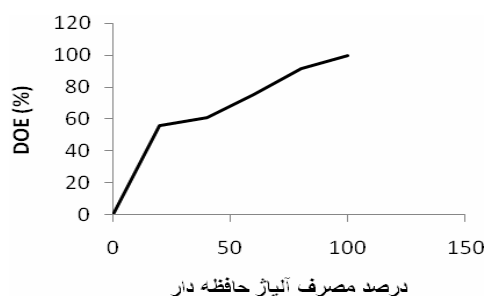
شکل (۳۱) مربوط به مقایسه نمودارهای انرژی کرنشی سازه در سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب $0.9g$ می‌باشد و جدول (۹) مقایسه میزان انرژی کرنشی سازه در سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب $0.9g$ را نشان می‌دهد. شکل (۳۲) مقایسه درصد مصرف آلیاژ حافظه‌دار شکلی با DOE تحت حداکثر شتاب $0.9g$ را به صورت نمودار نشان می‌دهد.



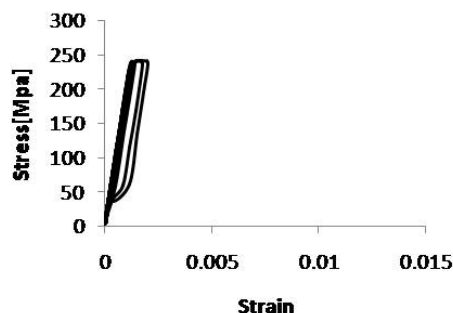
شکل ۳۱- مقایسه نمودارهای انرژی کرنشی سازه در سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب $0.9g$

جدول ۹- مقایسه میزان انرژی کرنشی سازه در سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب $0.9g$

نوع مدل	میزان انرژی کرنشی (kN.m)	DOE (بر حسب درصد)
سیستم مهاربندی SMA 0% و Steel 100%	۵۷۴	٪۰
سیستم مهاربندی SMA 20% و Steel 80%	۷۶۵	٪۵۵/۷
سیستم مهاربندی SMA 40% و Steel 60%	۷۸۳	٪۹۵/۷
سیستم مهاربندی SMA 60% و Steel 40%	۸۳۳	٪۹۸
سیستم مهاربندی SMA 80% و Steel 20%	۸۸۹	٪۹۹/۶
سیستم مهاربندی SMA 100% و Steel 0%	۹۱۷	٪۱۰۰



شکل ۳۲- مقایسه درصد مصرف آلیاژ حافظه‌دار با DOE تحت حداکثر شتاب $0.9g$



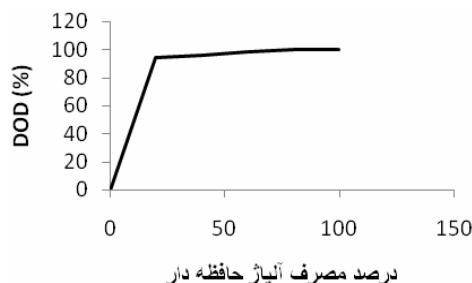
شکل ۲۹- نمودار هیستریزس مهاربند SMA (مدل ششم) تحت حداکثر شتاب $0.6g$

جدول (۸) مربوط به مقایسه تغییر مکان باقی‌مانده سازه، در تمامی مدل‌ها، تحت حداکثر شتاب $0.9g$ می‌باشد و همچنین مقایسه میزان مصرف آلیاژ حافظه‌دار شکلی با مقدار تغییر مکان باقی‌مانده سازه در مدل‌های مورد نظر، تحت حداکثر شتاب $0.9g$ ، در شکل (۳۰) نشان داده شده است.

سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب $0.9g$ می‌باشند و جدول (۹) مقایسه میزان انرژی کرنشی سازه در سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب $0.9g$ را نشان می‌دهد.

جدول ۸- مقایسه تغییر مکان باقی‌مانده سازه در سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب $0.9g$

مدل مورد نظر	تغییر مکان باقی‌مانده در سازه (mm)	DOD (بر حسب درصد)
سیستم مهاربندی SMA 0% و Steel 100%	۱۷	٪۰
سیستم مهاربندی SMA 20% و Steel 80%	۱/۹۸	٪۹۴
سیستم مهاربندی SMA 40% و Steel 60%	۱/۷۰	٪۹۵/۷
سیستم مهاربندی SMA 60% و Steel 40%	۱/۳۳	٪۹۸
سیستم مهاربندی SMA 80% و Steel 20%	۱/۰۸	٪۹۹/۶
سیستم مهاربندی SMA 100% و Steel 0%	۱/۰۱	٪۱۰۰



شکل ۳۰- مقایسه درصد مصرف آلیاژ حافظه‌دار با DOD تحت حداکثر شتاب $0.9g$

حافظه‌دار در گوشه‌ها قرار گیرند و دلیل اصلی آن این است که در مدل‌های بررسی شده، اتصال مهاربند به تیر و ستون، کاملاً مفصلی نبوده و این باعث می‌شود تا در گوشه‌های مهاربند نیروی اضافی تولید شده و باعث شود تا نیروی بیشتری به المان‌های گوشه وارد شود که در این حالت عکس‌العمل آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بهتر از فولاد می‌باشد و البته باید اشاره کرد که در عمل نیز ایجاد مفصل کامل امکان پذیر نیست.

۲- در این تحقیق، برای به دست آوردن بهینه‌ترین ترکیب در مهاربند باید حالتی را انتخاب کنیم که در نمودارهای درصد مصرف آلیاژ حافظه‌دار شکلی به DOD و DOE، شیب تنیدی را داشته باشد که این حالت در سیستم مهاربند با ترکیب 20% SMA و 80% Steel می‌باشد که تنها با استفاده ۲۰٪ از آلیاژ حافظه‌دار شکلی، در کمترین حالت، عملکرد ۵۴ درصدی و در بیشترین حالت، عملکرد ۴۹ درصدی را نسبت به سیستم مهاربند با ترکیب 100% SMA و 0% Steel دارد.

۳- استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در این مهاربندها برای مقابله با زلزله‌های با حداکثر شتاب ۰/۶g تفاوت چندانی با فولاد نداشته و به کارگیری آن‌ها از لحاظ اقتصادی، خیلی قابل توجهی نمی‌باشد و دلیل اصلی آن این است که در این مهاربندها از تمامی ظرفیت‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی به خوبی استفاده نمی‌شود.

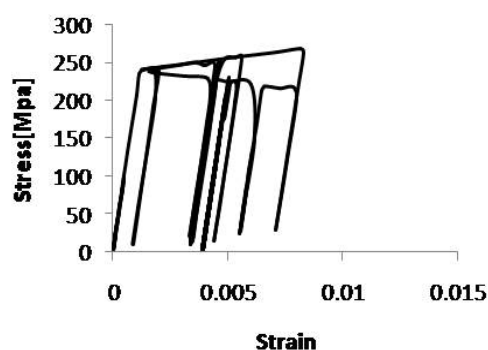
۵- مراجع

[۱] منصوری، ع.، "بررسی ضریب رفتار قاب بتنی مهاربندی شده با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMAs)"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ۱۳۸۷.

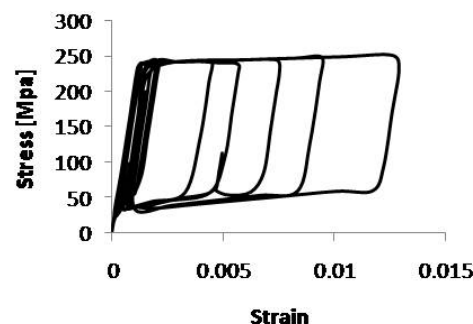
- [2] Dolce, M., Cardone, D., Marnetto, R., Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29, 945-968.
- [3] Salichs, J., Hou, Z., Noori, M., Vibration suppression of structures using passive shape memory alloy energy dissipation devices, Intelligent Material Systems and Structures, 2001, 12, 671-680.
- [4] Hon, Y. L., Li, Q. S., Li, A. Q., Leung, A. Y. T., Lin, P. H., "Structural Vibration Control by Shape Memory Alloy Damper", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32, 483-494.

با توجه به جدول‌های (۶) تا (۹) و شکل (۳۱)، مشاهده می‌شود که در مدل‌های ارائه شده، با افزایش مصرف آلیاژ حافظه‌دار شکلی میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد و با افزایش شدت زلزله (از ۰/۶g به ۰/۹g)، این حالت واضح‌تر می‌شوند که دلیل اصلی آن را می‌توان در خصوصیات ویژه آلیاژهای حافظه‌دار شکلی مشاهده کرد. یعنی بازگشت سازه به حالت اولیه بعد از باربرداری و مقاومت در برابر خستگی که هر دو باعث می‌شود تا حلقه‌های هیستریزس آلیاژ حافظه‌دار شکلی بزرگتر از فولاد باشد و این توانایی‌های آلیاژهای حافظه‌دار شکلی را در کنترل سازه و بهتر میرا کردن آن نشان می‌دهد.

در شکل‌های (۳۳) و (۳۴)، به ترتیب نمودار هیستریزس مهاربندهای فولاد و SMA تحت حداکثر شتاب ۰/۹g برای مقایسه بهتر نشان داده شده‌اند.



شکل ۳۳- نمودار هیستریزس مهاربند فولادی (مدل اول) تحت حداکثر شتاب ۰/۹g



شکل ۳۴- نمودار هیستریزس مهاربند SMA (مدل ششم) تحت حداکثر شتاب ۰/۹g

۴- نتیجه‌گیری

۱- ترتیب قرارگیری آلیاژها در طول مهاربند مهم می‌باشد. به طوری که بهینه‌ترین حالت زمانی صورت می‌گیرد که آلیاژهای

- [9] Sabelli, R., "Research on Improving the Design and Analysis of Earthquake-Resistant Steel-Braced frame", Professional Fellowship Report No. PF 2000-9, NEHRP, USA, 2001.
- [10] Desroches, R., McCormick, J., d Delemont, M. A., "Cyclical Properties of Superelastic Shape Memory Alloy", ASCE Journal of Structural Engineering, 2004, 130 (1), 38-46.
- [۱۱] کاظمی چوبی، ک.، "بررسی تبلور مجدد و رشد دانه در آلیاژ حافظه‌دار NiTi غنی از نیکل کار سرد شده"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، ۱۳۸۹.
- [5] Auricchio, F., Fugazza, D., Desroches, R., "Earthquake Performance of Steel Frames with Nitinol Braces", Earthquake Engineering, 2006, 10, 45-66.
- [6] Otsuka, K., Wayman, C. M., "Shape Memory Materials", Cambridge University Press, 1998.
- [7] Auricchio, F., Marfia, S., Sacco, E., "Modelling of SMA Materials: Training and Two Way Memory Effects", Computers and Structures, 2003, 81, 2301-2317.
- [۸] قاسمیه، م.، کاری، ا.، "مقایسه بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های دارای بادبندهای ساخته شده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی و بادبندهای مقید شده در برابر کمانش"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.

EXTENDED ABSTRACT

Study of Seismic Behaviour in Steel Structures by Using of Combination Braces of Steel and SMA

Mohammad Hooshmand^{a,*}, Behzad Rafezy^a, Jafar Khalil-Allafi^b

^a M.Sc., Department of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

^b Associate professor, Research Center for Advanced Materials and Mineral Processing, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Received: 24 June 2012; **Accepted:** 17 April 2012

Keywords:

Shape memory alloys, Combination braces, Nonlinear dynamic analysis, El Centro earthquake

1. Introduction

Shape memory alloys (SMA) have found various applications in structural engineering such as active, semi active and passive control due to its characteristics such as high damping capacity, durability, resistance to fatigue and corrosion and its unique characteristics such as shape memory and superelasticity [1]. One of the most important and effective applications of SMA in civil engineering is using these materials as braces, because of the superelastic and shape memory properties of SMA. They have the ability to re-center the original state and to provide high energy dissipation. However, most of the researches about the use of shape memory alloys in structural engineering are in theory level and few of them are experimental.

2. Methodology

For the comparison of models, a three-story structure has been used which was proposed by Sabelli. Assuming symmetry in the plan, only a two-dimensional frame of the structure has been analyzed. The height of each floor is 3.96 m and the construction plan is 9.14 in 9.14 m. Ceilings of the floors are composite that the height of the steel part is 76 mm and the height of concrete cover is 50 mm. It is noteworthy that the axial deformation of the beam is ignored [2].

The models used for this study are in such a way that bracings, a combination of steel and SMA, have the consumption of 0, 20, 40, 60, 80 and 100 percent respectively in which the first model is the model of steel brace and the last one is the model of SMA brace. A schematic of the bracing is shown in Fig. 1.



Fig. 1. Schematic brace used in construction

Behavioral model of steel and SMA used in the brace is shown in Fig. 2.

* Corresponding Author

E-mail addresses: m_Hooshmand@sut.ac.ir (Mohammad Hooshmand), rafezyb@sut.ac.ir (Behzad Rafezy), allafi@sut.ac.ir (Jafar Khalil-Allafi).

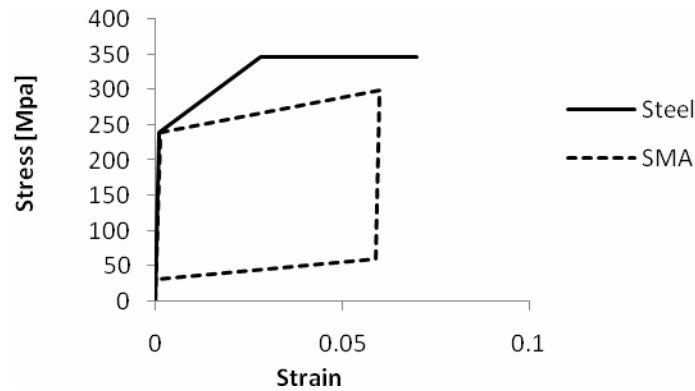


Fig. 2. Graph of steel and SMA stress - strain used in bracings

3. Results and discussion

There are two major differences between the behaviors of steel and SMA both of which are introduced as the special properties of shape memory alloys. One of the properties is that this alloy is able to return to its primary state after bearing a large strain; in other words, to minimize the horizontal displacement of the structure; and the other one is that it increases the strain energy in the structure. This section has attempted to provide the most optimum brace through comparing the graphs of the history of horizontal displacement and diagram of structural strain energy in all models, both in terms of SMA consumption and seismic behavior.

Table 1. The comparison of the residual displacement of structure in the used bracing systems under the maximum acceleration of 0.6g

Considered model	Residual displacement of structure (mm)
Bracing System SMA 0% and Steel 100%	5.31
Bracing System SMA 20% and Steel 80%	1.46
Bracing System SMA 40% and Steel 60%	1.10
Bracing System SMA 60% and Steel 40%	0.93
Bracing System SMA 80% and Steel 20%	0.85
Bracing System SMA 100% and Steel 0%	0.84

The use of SMA, resistant to earthquakes which has a maximum acceleration of 0.6g, has not a significant difference with steel and utilizing them is not economically justifiable since the entire capacity of the SMA is not properly used. To have a better understanding, hysteresis graph of steel and SMA bracings under maximum acceleration of 0.6g is shown in figs. 3 and 4, respectively.

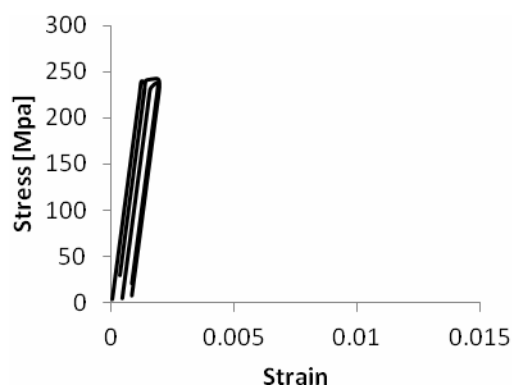


Fig. 3. Hysteresis graph of steel bracing (1st model) under maximum acceleration of 0.6g

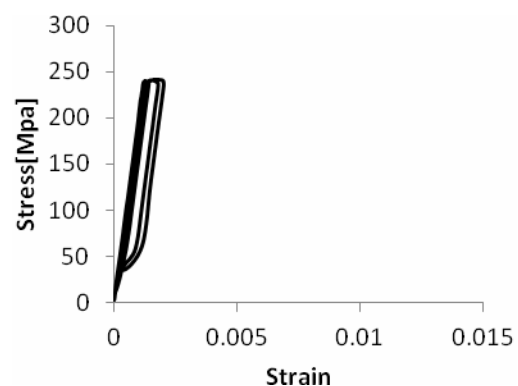


Fig. 4. Hysteresis graph of SMA bracing (6th model) under maximum acceleration of 0.6g

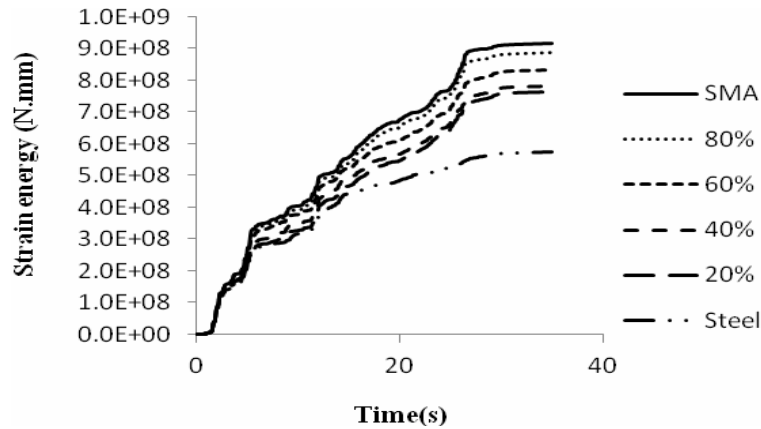


Fig. 5. Comparison of the graphs of structural strain energy in the used bracing systems under maximum acceleration of 0.9g

According to fig. (5), it is observable that in the presented models, an increase in SMA consumption increases the value of energy absorption and an increase in the intensity of earthquakes (from 0.6g to 0.9g) indicates this result more clearly. The main reason is due to the special properties of SMA. It means that the return of the structure to its primary state after unloading and resistance against fatigue both cause the hysteresis loops of SMA to be bigger than that of steel and it shows the higher ability of SMA in structure controlling and better energy damping.

To have a better comparison, figs. 6 and 7 show hysteresis graphs of SMA braces and steel braces under maximum acceleration of 0.9g.

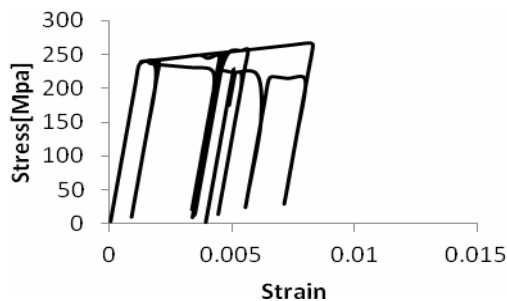


Fig. 6. Hysteresis graphs of steel bracing (1st model) under maximum acceleration of 0.9g

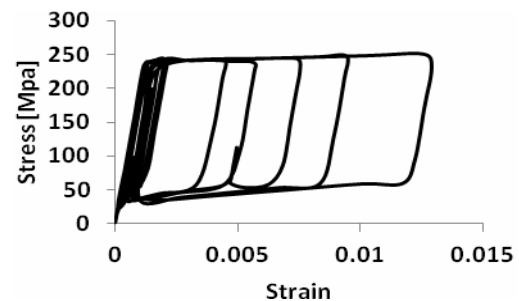


Fig. 7. Hysteresis graph of SMA bracing (6th model) under maximum acceleration of 0.9g.

4. Conclusions

The performances of bracing containing 20, 40, 60, 80 and 100% of shape memory alloy and steel bracing have been studied. The seismic response of the braced frames are determined and compared to the braced frame with steel brace. The results indicate that the most suitable location for putting shape memory alloy is the ends of bracing. Also, the secondary moment which is produced in bracing at the connection with gusset plate has transmitted better by shape memory alloy than steel. The total capacity of these alloys is not used in records with maximum acceleration of 0.6g and there is no difference between the behavior of steel brace and alloyed brace. Therefore, it is not necessary to use alloyed brace in low-intensity of earthquake due to economic considerations. It is observed that using 20% SMA in the alloyed brace improves 54% in seismic performance by 54% while by using 100% SMA, the amount of improvement is 94%. It is concluded that the application of bracing which contains 20% SMA, leads to the improvement of seismic performance without considerable increase in constructional cost.

5. References

- [1] Mansouri, A., "Coefficient Behavior of Concrete Frame with Shape Memory Alloys (SMAs) Bracing", MSc thesis, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran, 2008 [In Farsi].
- [2] Ghassemyeh, M., Kari, M., "Comparison of the Seismic Performance Improvement in the Structures with Braces Made of SMA and Buckling-Restrained Braces (BRB)", Fourth National Congress of Civil Engineering, Tehran University, Iran, 2008 [In Farsi].