Archive of SID

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 توجیه 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 0.6g و 0.9g 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 توجیه طراحی و اجرا نمود.

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

۱- مقدمه

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به علت دارا بودن خصوصیاتی نظیر ظرفیت میرایی بالا، دوام، مقاومت در برابر خستگی و خوردگی و خصوصیات منحصر به فرد خود از قبیل حافظهٔ 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 بازگردانندگی[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] درسال 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 دهندهٔ 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

1- Shape memory effect
2- Superelastic
3- Re-centering

4- Recentering devices
5- Not-recentering devices
6- Supplemental recentering devices

دریافت ۹۱/۵/۲ پذیرش ۹۲/۱/۲۸

* نویسنده مسئول

www.SID.ir

Archive of SID

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. مقایسهٔ 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[1]، انجام دادند. در این تحقیق، نمونه‌ها شامل قاب سه طبقهٔ یک دهانه و قاب شش طبقهٔ 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

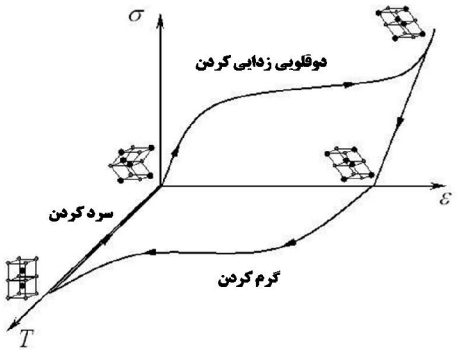
آلیاژهای حافظه‌دار شکلی دارای دو فاز کریستالی به نام‌های آستنیت[2] و مارتنزیت[3] می‌باشند. در حالت آستنیت تقارن بالا و در حالت مارتنزیت تقارن پایین می‌باشد. آستنیت در دماهای بالا و تنش‌های پایین و مارتنزیت در دماهای پایین و تنش‌های بالا پایدار می‌باشد. لذا با اعمال بارگذاری‌های حرارتی و یا مکانیکی این 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.

۲-۱- خاصیت حافظه‌داری شکلی

۲-۱-۱- اثر حافظه‌داری یک طرفه[4]

اگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی در فاز مارتنزیت دوقلویی[5] 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[6] تبدیل می‌شود که در این حالت آلیاژ به حالت اولیهٔ 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[7]

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[8] را به کار برد. از این خاصیت در ساخت بست‌های برگشت‌پذیر، محرک‌های حساس به دما و درون

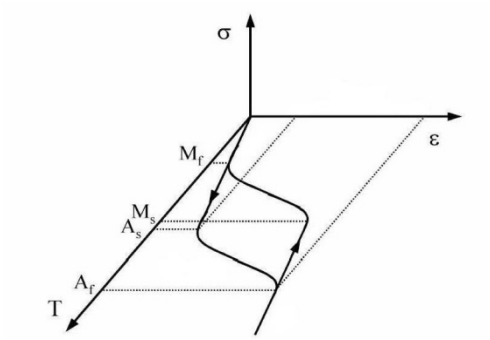
1- Buckling-restrained braces
2- Austenite
3- Martensite

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

www.SID.ir

Archive of SID

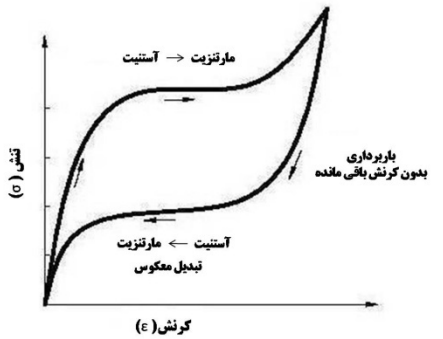
کاشت‌های پزشکی استفاده می‌شود [۷]. در شکل (۲) این حالت نشان داده شده است. قابل ذکر است که در شکل (۲)، M_S دمای شروع تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت در حین سرد شدن و A_S دمای شروع تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت را در حین گرم شدن نمونه مشخص می‌کنند.



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 ایجادشده توسط تنش می‌شود. با انجام باربرداری، فاز مارتنزیت ناپایدار شده و تبدیل معکوس اتفاق می‌افتد که در نتیجهٔ این تبدیل ماده به حالت اولیهٔ 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]

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 وپلان 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].

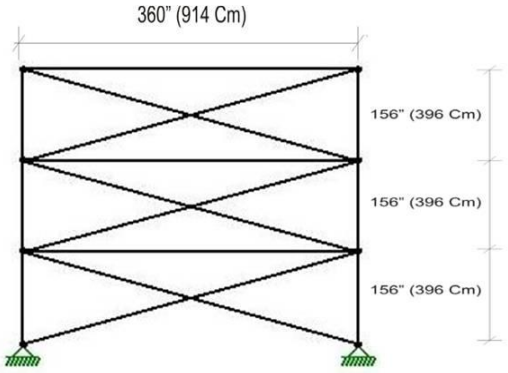
مدول الاستیسیته اعضای فولادی برابر با MPa ۲۰۰۰۰۰، مدول پلاستیک اعضای فولادی برابر با MPa ۲۰۰۰۰، تنش تسلیم اعضای فولادی برابر با MPa ۲۴۰ و درصد میرائی برابر با ۵ درصد در نظر گرفته شده است و مشخصات مکانیکی بادبندهای SMA فوق ارتجاعی مطابق جدول (۲) می‌باشد [۸].

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

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

www.SID.ir

Archive of SID

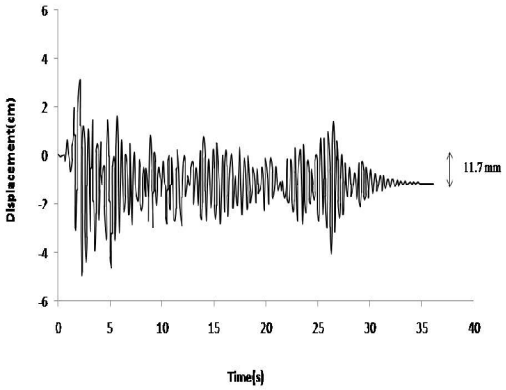


شکل ۴- مدل هندسه سازه نمونه [۹]

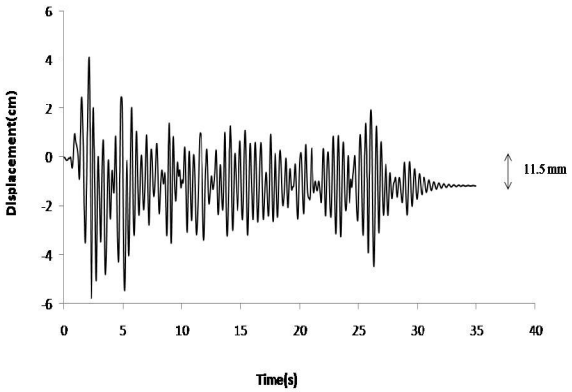
جدول ۲- پارامترهای بکار رفته در مدل رفتاری SMA

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

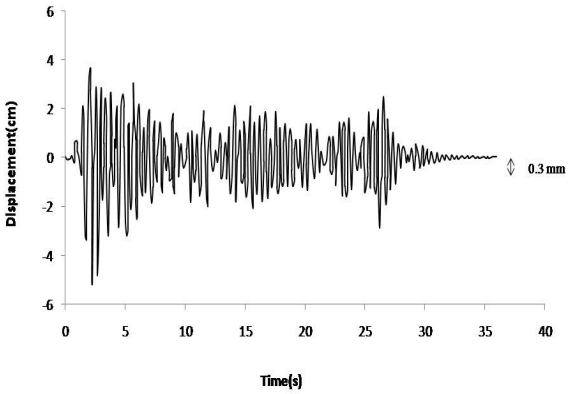
در این صحت‌سنجی تنها دو نمونه از مدل‌های کاری بررسی شده است و این مدل‌ها بدین صورت می‌باشند که در هر دو حالت، سازه مورد نظر تحت زلزله ال سنترو با شتاب ۰/۶g قرار گرفته است. مدل اول دارای مهاربند فولادی مقاوم در برابر کمانش بوده و مدل دوم دارای مهاربند از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی می‌باشد. در شکل‌های (۵) تا (۸) نمودارهای به دست آمده توسط کاری [۸] و نمودارهای به دست آمده توسط نرم‌افزار ANSYS جهت مقایسه ارائه شده‌اند.



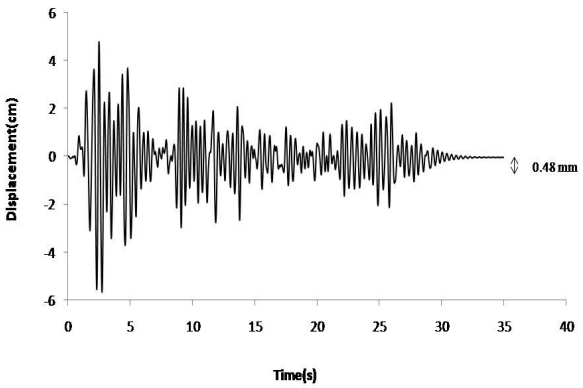
شکل ۵- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربند فولادی مقاوم در برابر کمانش به دست آمده از نتایج قاسمیه و کاری [۸]



شکل ۶- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربند فولادی مقاوم در برابر کمانش 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 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.

www.SID.ir

Archive of SID

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 (۳-۲) نحوه اتصال مهاربند به تیر- ستون در ANSYS شرح داده شده است.

۳-۲- مشخصات مدل

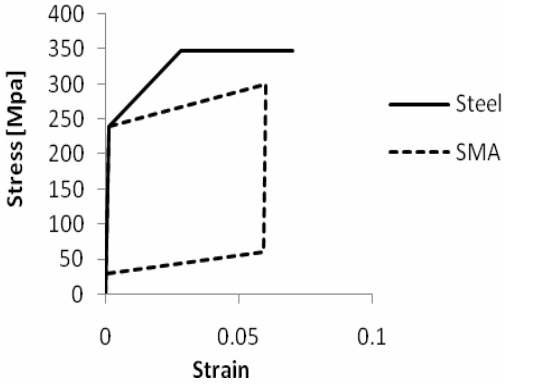
سازه مورد بررسی، همان سازه سه طبقه پیشنهادی توسط Sabelli است که در بخش صحت‌سنجی ارائه و توضیح داده شده است. تفاوتی که در این بخش وجود دارد این است که مدل رفتاری آلیاژها متفاوت شده است. مدل‌هایی که برای این تحقیق استفاده شده بدین صورت می‌باشند که مهاربندها، ترکیبی از فولاد و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بوده 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

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

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.

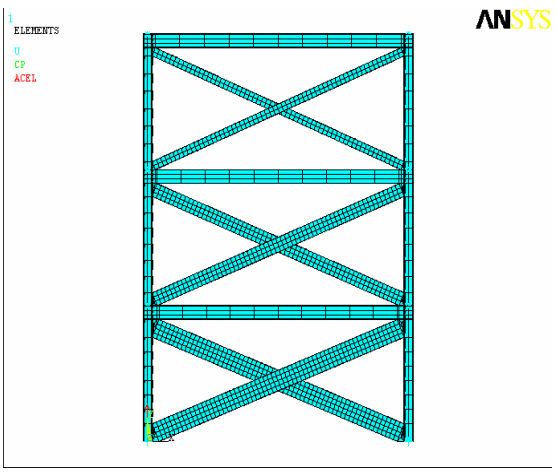


شکل ۱۰- نمودار تنش- کرنش فولاد و آلیاژ حافظه‌دار شکلی به کار برده شده در مهاربندها

جدول ۴- پارامترهای به‌کار 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 دراثر تبدیل فاز	ε_L
۸۰۰۰۰ [MPa]	مدول مارتنزیت	Y_{mrt}

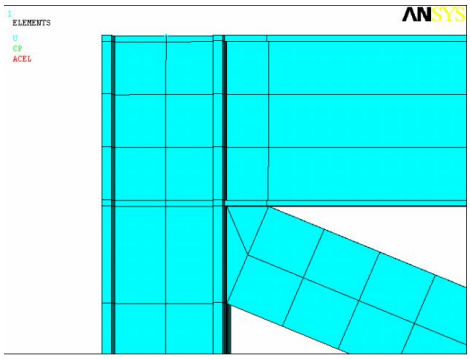
برای مدل‌سازی المان‌های قاب در ANSYS، از Solid185 استفاده شده است و این به خاطر قابلیت معرفی مدل رفتاری آلیاژ حافظه‌دار در این المان می‌باشد. به دلیل استفاده از Solid، ایجاد مفصل کامل در اتصال مهاربند به تیر-ستون امکان‌پذیر نمی‌باشد و همین عمل باعث ایجاد نیروی اضافی در گوشه‌های مهاربندها می‌شود. در شکل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

www.SID.ir

Archive of SID



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.

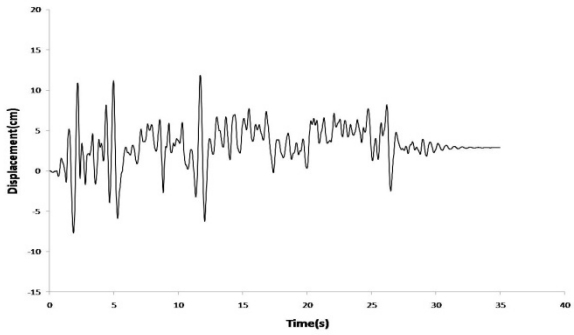
۳-۳-۱- نحوه قرارگیری فولاد و آلیاژ حافظه‌دار در مهاربند

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.

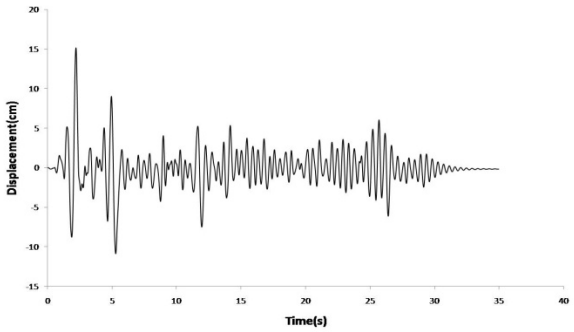
شکل ۱۳- قرارگیری آلیاژ حافظه‌دار در وسط مهاربند

شکل ۱۴- قرارگیری آلیاژ حافظه‌دار در گوشه‌های مهاربند

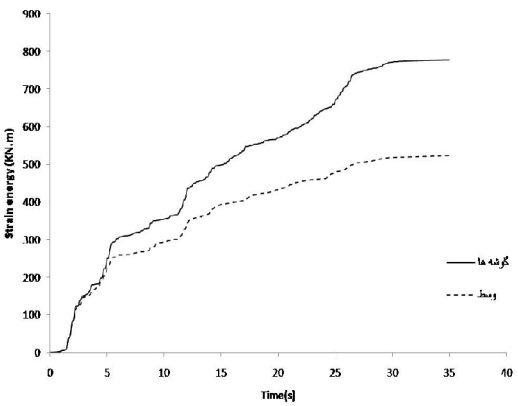
شکل‌های (۱۵) تا (۱۷)، برای حالتی که سازه تحت حداکثر شتاب ۰/۹g قرار گرفته است، جهت مقایسه نشان داده شده‌اند. جدول (۵) مقایسه عملکرد لرزه‌ای این دو مهاربند را تحت حداکثر شتاب‌های ۰/۶g و ۰/۹g ارائه می‌دهد.



شکل ۱۵- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم تحت حداکثر شتاب ۰/۹g در حالتی که آلیاژ حافظه‌دار در وسط قرار گرفته است.



شکل ۱۶- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم تحت حداکثر شتاب ۰/۹g در حالتی که آلیاژ حافظه‌دار در گوشه‌ها قرار گرفته است.



شکل ۱۷- مقایسه نمودارهای انرژی کرنشی سازه تحت حداکثر شتاب ۰/۹g در حالتی که آلیاژ حافظه‌دار در وسط و در گوشه‌ها قرار گرفته‌اند.

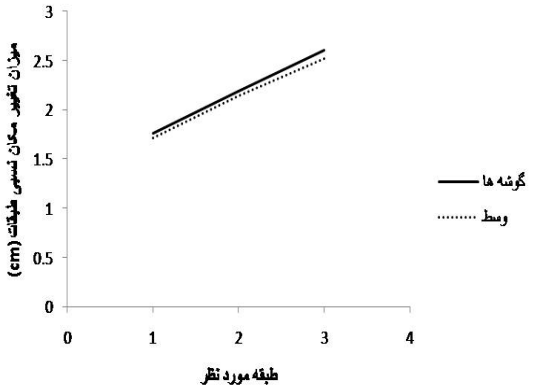
www.SID.ir

Archive of SID

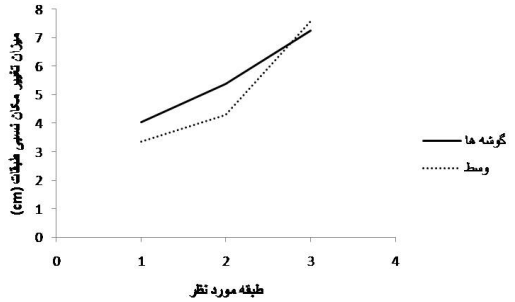
جدول ۵- مقایسه عملکرد سازه در حالتی که آلیاژ حافظه‌دار شکلی در وسط و در گوشه‌ها قرار گرفته است

مدل مورد نظر	تغییر مکان باقی‌مانده تحت حداکثر شتاب (mm)۰/۶g	میزان انرژی کرنشی تحت حداکثر شتاب ۰/۶g (kN.m)	تغییر مکان باقی‌مانده تحت حداکثر شتاب (mm)۰/۹g	میزان انرژی کرنشی تحت حداکثر شتاب ۰/۹g (kN.m)
SMA دروسط	5.53	455.8	28.73	522
SMA درگوشه	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 بازگردانندگی 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.

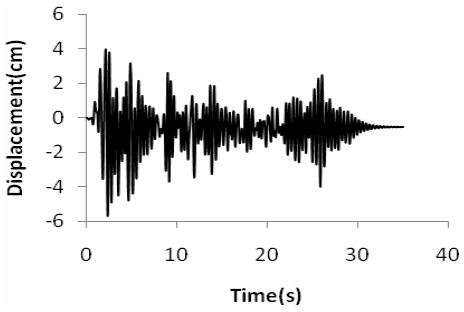


شکل ۱۹- مقایسه تغییر مکان نسبی طبقات تحت حداکثر شتاب ۰/۹g در حالتی که آلیاژ حافظه‌دار در وسط و در گوشه‌ها قرار گرفته‌اند.

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.

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

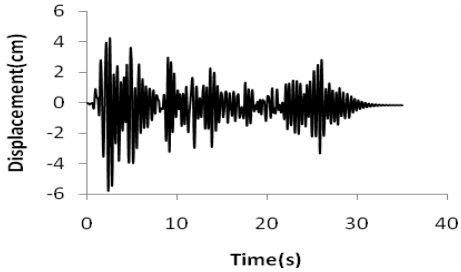
نمودارهای تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم تمامی مدل‌ها تحت حداکثر شتاب ۰/۶g در شکل‌های (۲۰) تا (۲۵) نشان داده شده است.



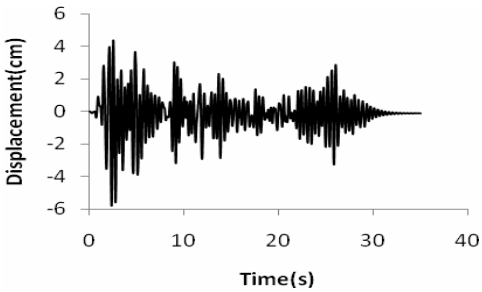
شکل ۲۰- تاریخچه زمانی تغییرمکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربندی با ترکیب 0% SMA و 100% Steel تحت حداکثر شتاب ۰/۶g

www.SID.ir

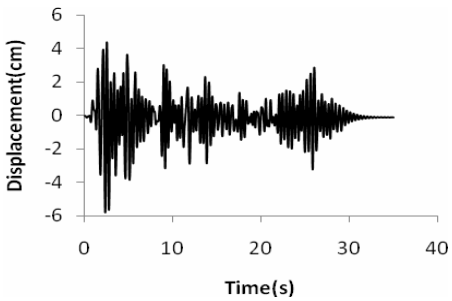
Archive of SID



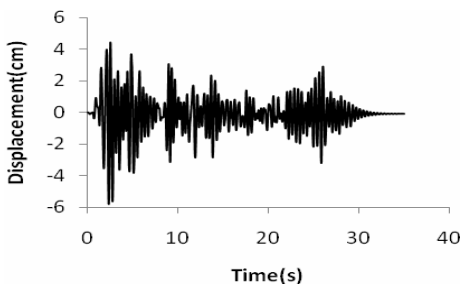
شکل ۲۱- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربندی با ترکیب SMA 20% و Steel 80% تحت حداکثر شتاب ۰/۶g



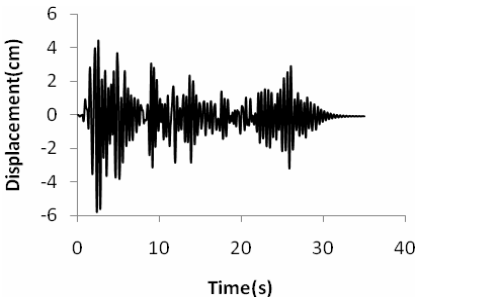
شکل ۲۲- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربندی با ترکیب SMA 40% و Steel 60% تحت حداکثر شتاب ۰/۶g



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



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

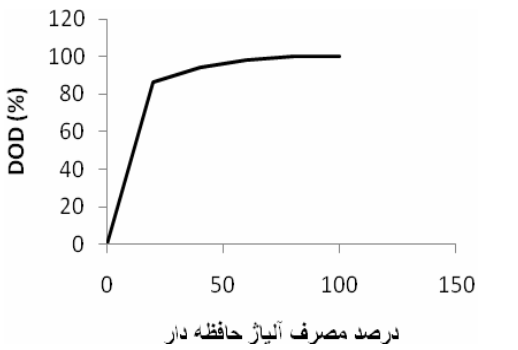


شکل ۲۵- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربندی با ترکیب SMA 100% و Steel 0% تحت حداکثر شتاب ۰/۶g

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



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

www.SID.ir

Archive of SID

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.

$$DOD = \frac{D_M - D_{ST}}{D_{SMA} - D_{ST}} \qquad (۱)$$

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

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

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

$$DOE = \frac{E_M - E_{ST}}{E_{SMA} - E_{ST}} \qquad (۲)$$

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

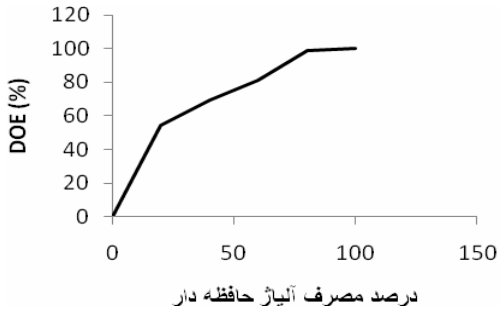
E_{ST} میزان انرژی کرنشی سازه در سیستم مهاربندی با ترکیب SMA 0% و Steel 100%

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

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 (برحسب درصد)
سیستم مهاربندی SMA 0% و Steel 100%	۲۵۲	٪۰
سیستم مهاربندی SMA 20% و Steel 80%	۴۵۵	٪۵۴
سیستم مهاربندی SMA 40% و Steel 60%	۴۵۶	٪۶۹
سیستم مهاربندی SMA 60% و Steel 40%	۴۵۶/۵	٪۸۱
سیستم مهاربندی SMA 80% و Steel 20%	۴۵۷/۴	٪۹۹
سیستم مهاربندی SMA 100% و Steel 0%	۴۵۷/۵	٪۱۰۰

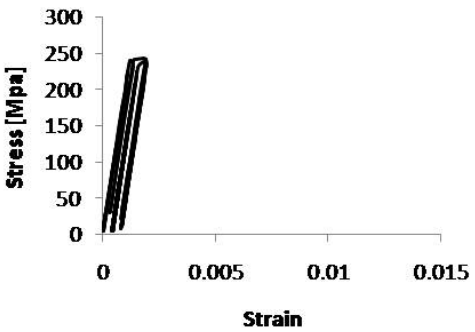
همان طوری که در جداول (۶) و (۷) و اشکال (۲۶) و (۲۷) مشاهده می‌شود، مدل‌های دوم تا پنجم نسبت به میزان مصرف SMA، عملکرد لرزه ای مطلوبی را از خود نشان می‌دهند و مدل دوم یک مصرف بهینه‌ای را در مقایسه با عملکرد لرزه‌ای از خود نشان می‌دهد.



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 هیسترزیس مهاربندهای فولاد و SMA تحت حداکثر شتاب ۰/۶g برای مقایسه بهتر موضوع نشان داده شده‌اند.

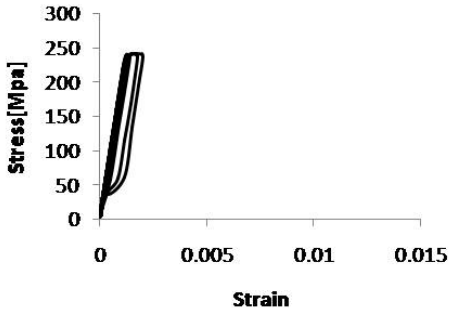
همان طوری که گفته شد مدل‌ها تحت حداکثر شتاب‌های ۰/۶g و ۰/۹g بررسی شده‌اند که نتایج مدل‌های تحت حداکثر شتاب ۰/۹g را می‌توان در جدول‌های (۸) و (۹) و شکل‌های (۳۰ تا ۳۲) مشاهده کرد.



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

www.SID.ir

Archive of SID



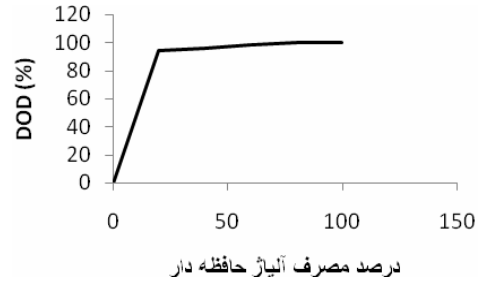
شکل ۲۹- نمودار هیسترزیس مهاربند SMA (مدل ششم) تحت حداکثر شتاب ۰/۶g

جدول (۸) مربوط به مقایسه تغییر مکان باقی‌مانده سازه، در تمامی مدل‌ها، تحت حداکثر شتاب ۰/۹g می‌باشد و همچنین مقایسه میزان مصرف آلیاژ حافظه‌دار شکلی با مقدار تغییر مکان باقی‌مانده سازه در مدل‌های مورد نظر، تحت حداکثر شتاب ۰/۹g، در شکل (۳۰) نشان داده شده است.

سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب ۰/۹g می‌باشند و جدول (۹) مقایسه میزان انرژی کرنشی سازه در سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب ۰/۹g را نشان می‌دهد.

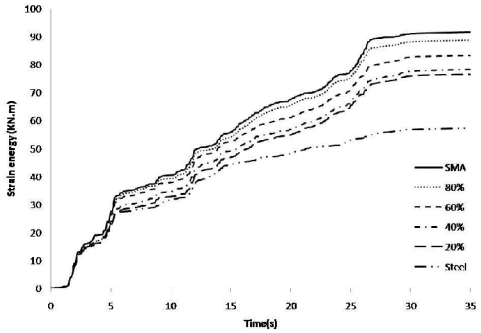
جدول ۸- مقایسه تغییرمکان باقی‌مانده سازه در سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب ۰/۹g

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



شکل ۳۰- مقایسه درصد مصرف آلیاژ حافظه دار با DOD تحت حداکثر شتاب ۰/۹g

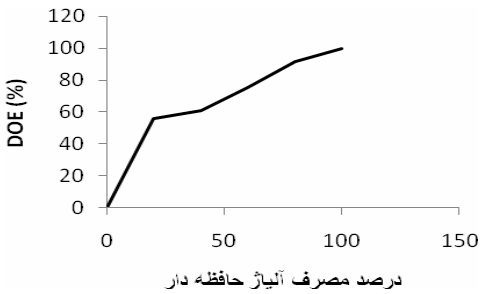
شکل (۳۱) مربوط به مقایسه نمودارهای انرژی کرنشی سازه در سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب ۰/۹g می‌باشد و جدول (۹) مقایسه میزان انرژی کرنشی سازه در سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب ۰/۹g را نشان می‌دهد. شکل (۳۲) مقایسه درصد مصرف آلیاژ حافظه‌دار شکلی با DOE تحت حداکثر شتاب ۰/۹g را به صورت نمودار نشان می‌دهد.



شکل ۳۱- مقایسه نمودارهای انرژی کرنشی سازه در سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب ۰/۹g

جدول ۹- مقایسه میزان انرژی کرنشی سازه در سیستم‌های مهاربندی به کار برده شده تحت حداکثر شتاب ۰/۹g

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



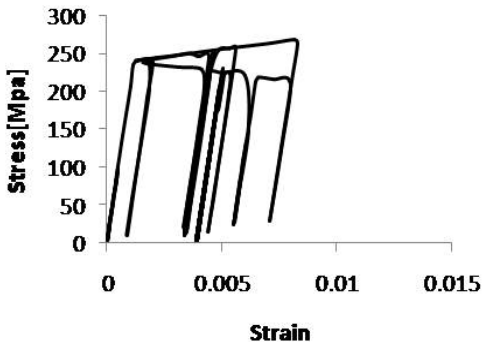
شکل ۳۲- مقایسه درصد مصرف آلیاژ حافظه‌دار با DOE تحت حداکثر شتاب ۰/۹g

www.SID.ir

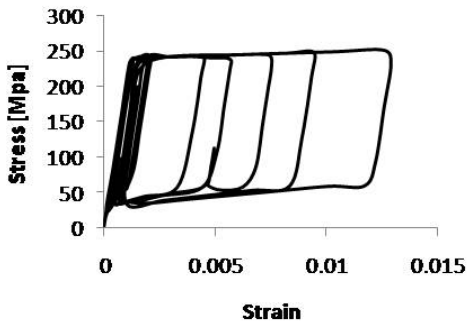
Archive of SID

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 هیسترزیس 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 هیسترزیس مهاربندهای فولاد و SMA تحت حداکثر شتاب ۰/۹g برای مقایسه بهتر نشان داده شده‌اند.



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



شکل ۳۴- نمودار هیسترزیس 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 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 تندی را داشته باشد که این حالت در سیستم مهاربند با ترکیب SMA 20% و Steel 80% 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 SMA 100% و Steel 0% 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 توجیه 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 نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ 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.

www.SID.ir

Archive of SID

[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.

[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، دانشکدهٔ مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، ۱۳۸۹.

www.SID.ir