

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی مجهز به مهاربندهای ترکیبی فولاد-آلیاژ حافظه‌دار شکلی

محمد هوشمند، کارشناس ارشد مهندسی عمران- سازه- دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران
بهزاد رافعی، عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی عمران- دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران
جعفر خلیل علافی، عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی مواد- دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران

M_Hooshmand@sut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۴/۲/۲۸ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۴/۱۰/۱

چکیده:

در این مقاله به بررسی رفتار لرزه‌ای مهاربندهای ترکیبی از جنس فولاد و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی پرداخته شده است. جهت بررسی از شش مدل مهاربند ترکیبی با میزان مصرف آلیاژ حافظه‌دار شکلی با معیار طول به ترتیب صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد از طول کل استفاده شده است. ارزیابی مدل‌ها به کمک تحلیل دینامیکی غیر خطی تحت زلزله السنترو مقیاس شده با شتاب‌های حداکثر 0.6g و 0.9g در نرم افزار ANSYS v11 انجام گرفته است. نتایج مطالعات انجام شده مقادیر طولی بهینه برای درصد مهاربند ترکیبی را مشخص می‌کند بطوریکه می‌توان با استفاده از مقادیر پیشنهادی و طرح ارائه شده، سازه‌هایی بار رفتار لرزه‌ای مناسب و با هزینه ساخت قابل توجیه طراحی و اجرا نمود.

کلید واژگان: آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، میراگر، تحلیل دینامیکی غیرخطی، ANSYS v11، زلزله السنترو

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در مورد کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (Shape Memory Alloys) در مهندسی عمران صورت گرفته است که از جمله می‌توان به سیستم‌های جداگر لرزه‌ای [۲ و ۱]، میراگرهای انرژی در ساختمان‌ها [۳ و ۴]، میراگرهای انرژی در پلها [۵ و ۶]، مقاوم‌سازی سازه‌های بنایی و تاریخی [۷]، استفاده بصورت میلگرد در سازه‌های بتنی [۸-۱۰]، اتصالات سازه‌ای [۱۱ و ۱۲]، استفاده در سدها [۱۳] اشاره کرد. یکی از مهمترین کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در مهندسی سازه، استفاده این مواد بصورت مهاربند در سازه‌هاست چرا که به دلیل دارا بودن خصوصیات منحصر بفرد خود از قبیل خاصیت فوق ارتجاعی و خاصیت حافظه شکلی، قابلیت بازگرداندگی سازه به حالت اولیه^۱ و

قابلیت استهلاک انرژی بالا را فراهم می‌کنند [۱۴-۱۶].

۲- آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

آلیاژ حافظه‌دار به آلیاژی گفته می‌شود که پس از اعمال تغییر شکل زیاد روی آن، توانائی به خاطر آوردن شکل قبلی خود را داشته باشد.

۳- تاریخچه

در سال ۱۹۳۲ olander، دانشمند سوئدی، برای نخستین بار رفتار فوق ارتجاعی^۲ را در Au-Cd کشف کرد [۱۷]. سپس در سال ۱۹۳۸ Greniger و Mooridan وابستگی فاز مارتنزیت به دما را کشف کردند. در سال ۱۹۵۱، Read و Chang در آلیاژ Au-Cd

1-Recentring

2 - Superelastic

رفتار لرزه‌ای قابل قبولی در مقایسه با مصرف SMA داشته باشد. برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای مدل‌ها، مقدار تغییر مکان باقی مانده سازه و میزان جذب انرژی آن ملاک مقایسه بین مدل‌ها می‌باشد.

۶- صحت سنجی بر روی یک قاب سه طبقه در نرم افزار

ANSYS

همانطوریکه قبلاً گفته شده، این مقاله به دنبال یک مهاربند ترکیبی از جنس SMA و فولاد می‌باشد. به همین دلیل صحت سنجی بر روی یک سازه فولادی دارای مهاربند انجام شده است که این سازه توسط کاری با نرم افزار AIMS مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است [۲۳]. در ادامه به این سازه و نتایج 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 [۲۱]. 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 (۳) 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 صرف نظر شده است [۲۳].

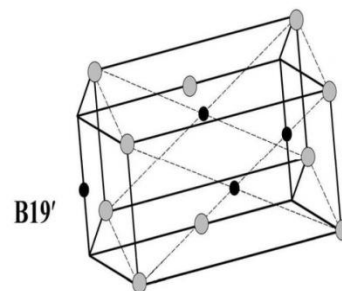
جدول ۱- مشخصات هندسی بکار رفته در مدل sabelli [۲۲]

طبقه	بادبندها	تیرها	ستون‌ها
۱	HSS ۸ x ۸ x ۰/۵	W ۱۸ x ۴۶	W ۱۲ x ۱۰۶
۲	HSS ۶ x ۶ x ۰/۵	W ۱۸ x ۴۶	W ۱۲ x ۱۰۶
۳	HSS ۵ x ۵ x ۰/۳۷۵	W ۱۸ x ۴۶	W ۱۲ x ۱۰۶

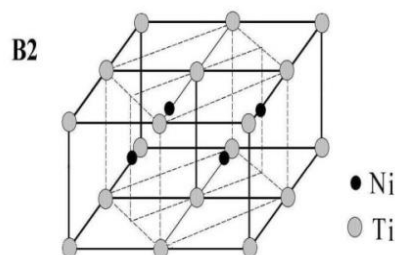
تبدیل فاز برگشت پذیر را کشف کردند که اولین تبدیل فاز ثبت شده می‌باشد. در سال ۱۹۶۲، بوهر و همکاران در آزمایشگاه تسلیحات نیروی دریایی امریکا^۴ اثر حافظه شکلی^۴ را در آلیاژ نیکل-تیتانیوم کشف کرده و این آلیاژ را نایتینول^۵ نامیدند [۱۸]. تا کنون انواع مختلف آلیاژهای حافظه‌دار شکلی شناخته شده‌اند که در این میان Ni-Ti یا همان نایتینول نسبت به بقیه شناخته شده تر می‌باشد و در کاربردهای مهندسی بیشتر به کار رفته است. در این مقاله آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بطور اختصار SMA نیز گفته شده است.

۴- آلیاژ نیکل - تیتانیوم

آلیاژ دو تایی Ni-Ti (نایتینول) و سه تایی Ni-Ti-X (X نماد یک عنصر است) از مهمترین آلیاژهای حافظه‌دار شکلی هستند که بیشترین تحقیقات بر روی آنها انجام شده است و بر این اساس کاربردهای بیشتری نسبت به بقیه آلیاژهای حافظه‌دار شکلی دارند. نایتینول براساس ترکیب اتمی تقریباً مساوی نیکل و تیتانیوم ساخته می‌شود و معمولاً درصد نیکل در حدود ۵۱٪-۴۹٪ متغیر می‌باشد [۱۹]. شبکه کریستالی نایتینول در فاز آستنیت بصورت B2 شکل (۱) و در فاز مارتنزیت بصورت B19' شکل (۲) می‌باشد. همچنین یک فاز میانی مارتنزیتی، بنام فاز R، تحت شرایط خاصی در آلیاژ می‌تواند بوجود آید [۲۰].



شکل ۱- شبکه کریستالی فاز آستنیت در نایتینول [۲۰]



۵- اهداف مقاله

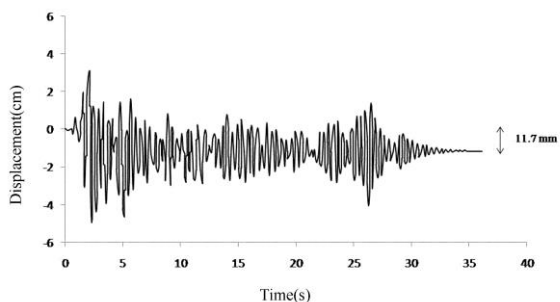
در این مقاله سعی شده است که یک مهاربند ترکیبی از فولاد و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی ارائه شود بطوریکه این مهاربند ترکیبی یک

3 - US Naval Ordnance Laboratory

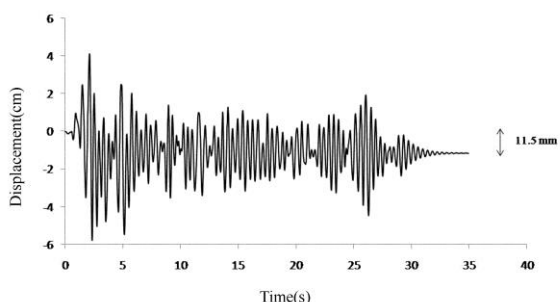
4 - Shape memory effect

5 - Nitinol

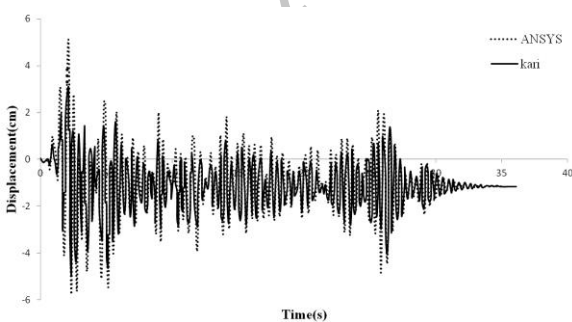
در این صحت سنجی تنها دو نمونه از مدل‌های کاری بررسی شده است و این مدل‌ها بدین صورت می‌باشند که در هر دو حالت، سازه مورد نظر تحت زلزله السترو با شتاب $g/6$ قرار گرفته است. مدل اول دارای مهاربند فولادی مقاوم در برابر کمناش بوده و مدل دوم دارای مهاربند از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی می‌باشد. در شکل‌های (۵) تا (۱۰) نمودارهای بدست آمده توسط کاری و نمودارهای بدست آمده توسط نرم افزار ANSYS جهت مقایسه ارائه شده اند.



شکل ۵- تاریخچه زمانی تغییرمکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربند فولادی مقاوم در برابر کمناش بدست آمده از نتایج کاری [۲۱]

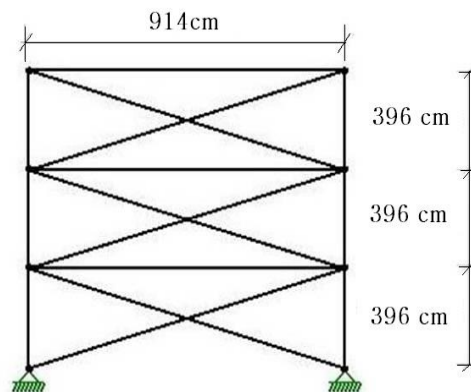


شکل ۶- تاریخچه زمانی تغییرمکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربند فولادی مقاوم در برابر کمناش بدست آمده از تحلیل ANSYS



شکل ۷- مقایسه تاریخچه زمانی تغییرمکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربند فولادی مقاوم در برابر کمناش بدست آمده از تحلیل ANSYS و نتایج کاری

شکل ۲- شبکه کریستالی فاز مارتنزیت در نایتینول [۲۰]

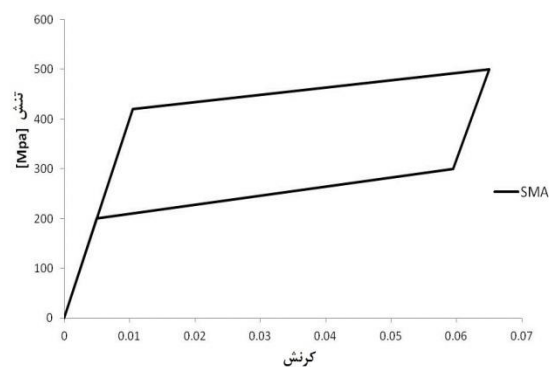


شکل ۳- مدل هندسه سازه نمونه [۲۲]

SMA مورد بررسی در مدل‌های کاری در جدول (۲) و شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول ۲- پارامترهای بکار رفته در مدل رفتاری SMA در بخش صحت سنجی [۲۳]

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



شکل ۴- نمودار تنش - کرنش آلیاژ حافظه دار شکلی بکار برده شده در مدل‌های کاری [۲۳]

دانست. بدین معنی که در مدل‌های بررسی شده در ANSYS امکان ایجاد مفصلی کامل میسر نگردیده است در حالیکه مدل‌های کاری بصورت مفصل کامل در نظر گرفته شده است. در بخش بعدی نحوه اتصال مهاربند به تیر-ستون در ANSYS شرح داده شده است.

۷- مشخصات مدل

سازه مورد بررسی، همان سازه سه طبقه پیشنهادی توسط سابلی 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 بترتیب 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 بکار برده شده در مهاربندها و در شکل (۱۱) شماتیکی از این مهاربندها نشان داده شده است.

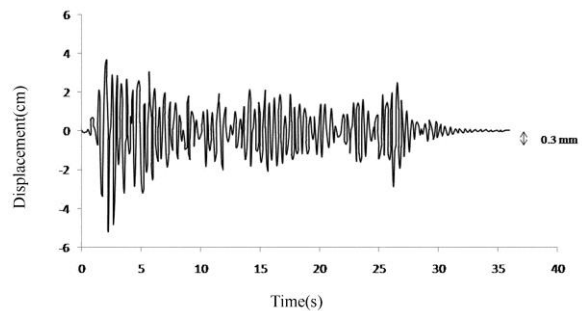
جدول ۳- درصد میزان مصرف فولاد و SMA بکار برده شده در مهاربندها

نوع مدل	درصد مصرف فولاد طولی حافظه دار شکلی	درصد مصرف فولاد طولی
مدل اول	0	100
مدل دوم	20	80
مدل سوم	40	60
مدل چهارم	60	40
مدل پنجم	80	20
مدل ششم	100	0

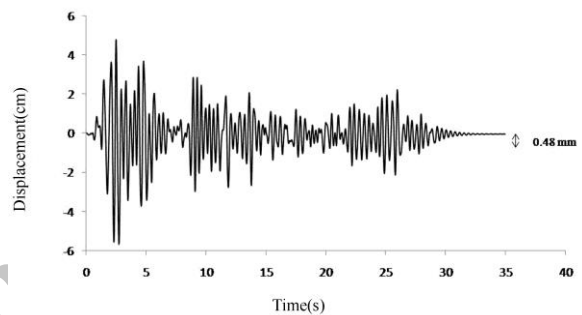


شکل ۱۱- شماتیک مهاربند بکار برده شده در سازه

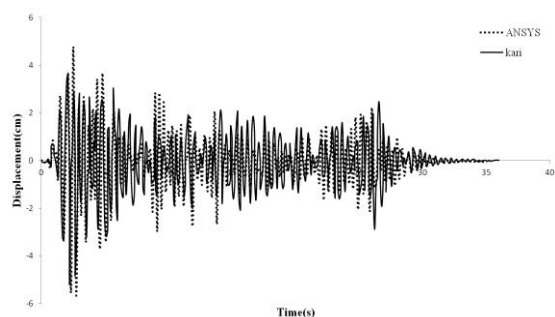
مدل رفتاری فولاد و آلیاژ حافظه‌دار شکلی بکار برده شده در مهاربندها در شکل (۱۲) و جدول (۴) نشان داده شده است. شیب غیرخطی هر دو آلیاژ، فولاد و SMA، یکسان در نظر گرفته شده است و این یعنی اینکه مساحت زیر منحنی هر دو آلیاژ تقریباً یکسان در نظر گرفته شده است.



شکل ۸- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربند از جنس آلیاژ حافظه دار شکلی بدست آمده از نتایج کاری [۲۱]

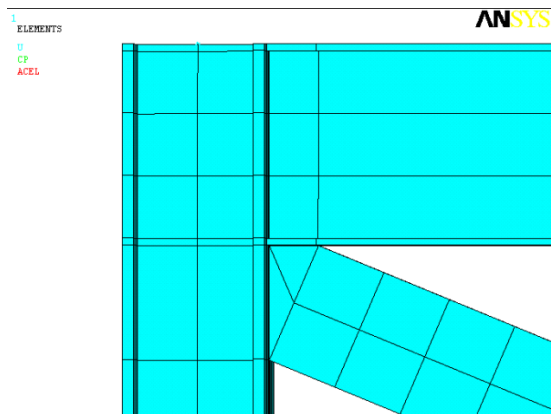


شکل ۹- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربند از جنس آلیاژ حافظه دار شکلی بدست آمده از تحلیل ANSYS



شکل ۱۰- مقایسه تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربند از جنس آلیاژ حافظه دار شکلی بدست آمده از تحلیل ANSYS و نتایج کاری

همانطوریکه که در شکل‌های (۷) و (۱۰) دیده می‌شود، نتایج بدست آمده حاکی از تطابق قابل قبولی بین نمودارهای بدست آمده از نتایج کاری و تحلیل ANSYS می‌باشد. البته قابل ذکر است که تفاوت جزئی بین مدل‌ها وجود دارد که دلیل اصلی آن را می‌توان در نحوه اتصال مهاربند به تیر-ستون

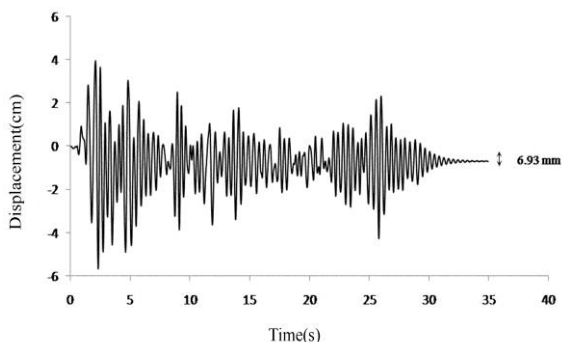


شکل ۱۴- نحوه مش بندی و اتصال مهاربند به تیر- ستون

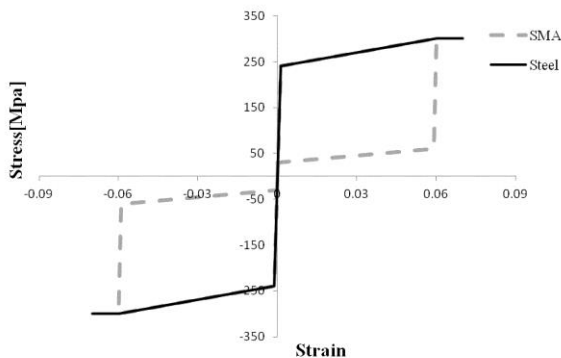
در مدلسازی مهاربندها، نحوه اتصال گره‌های فولادی به SMA توری در نظر گرفته شده‌اند که هیچ حرکت و دورانی بین گره‌های اتصالی دو آلیاژ وجود ندارد و به اصطلاح به هم Merge شده‌اند. در شرایط حقیقی نیز میتوان با استفاده از جوشکاری تحت اتمسفر خنثی، SMA را به فولاد متصل کرد. قابل ذکر است که این کار چندین بار در دانشگاه صنعتی سهند انجام شده است [۲۰].

۸- 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 بازگردد و به اصطلاح تغییر مکان افقی سازه را به حداقل برساند و دیگری 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 جذب انرژی سازه در تمامی مدلهای، بهترین مهاربند را هم از لحاظ مصرف آلیاژ حافظه‌دار شکلی و هم از لحاظ رفتار لرزه‌ای ارائه داد. در ادامه تاریخچه زمانی بعضی از مدلهای در اشکال (۱۵) تا (۱۸) نشان داده شده است.



شکل ۱۵- تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربندی با ترکیب 0% SMA و 100% Steel تحت حداکثر شتاب ۰/۶g

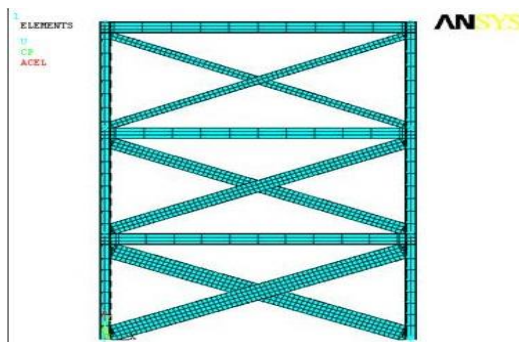


شکل ۱۲- نمودار تنش - کرنش فولاد و آلیاژ حافظه دار شکلی بکار برده شده در مهاربندها

جدول ۴- پارامترهای بکار رفته در مدل رفتاری SMA [۲۰]

مقدار	ثابت
۲۴۰ [MPa]	σ_s^{AS}
۳۰۰ [MPa]	σ_f^{AS}
۶۰ [MPa]	σ_s^{SA}
۳۰ [MPa]	σ_f^{SA}
۶%	ϵ_L
۸۰۰۰۰ [MPa]	Y_{mrt}

برای مدلسازی المان‌های قاب در ANSYS، از Solid185 استفاده شده است و این بخاطر قابلیت معرفی مدل رفتاری آلیاژ حافظه‌دار در این المان می‌باشد. بدلیل 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 (۱۳) نحوه مدل‌سازی قاب در ANSYS و در شکل (۱۴) نحوه مش‌بندی و اتصال مهاربند به تیر- ستون نشان داده شده است. (قابل ذکر است که در عمل نیز اتصالات بصورت مفصل کامل نمی‌باشد)



شکل ۱۳- نحوه مدل سازی قاب در ANSYS

جدول (۵) آورده شده است و همچنین مقایسه DOD با درصد مصرف آلیاژ حافظه دار شکلی در شکل (۱۹) بصورت نموداری نشان داده شده است.

DOD مقایسه تغییرمکان باقی مانده مهاربند مورد نظر نسبت به تغییرمکان باقی مانده مهاربند فولادی و SMA می‌باشد و یک رابطه نسبی بین اختلاف مقدار تغییر مکان باقی مانده سازه در سیستم مهاربندی با ترکیب مورد نظر با مقدار تغییرمکان باقی مانده در سیستم مهاربندی با ترکیب SMA 0% و Steel 100% نسبت به اختلاف مقدار تغییرمکان باقی مانده در سیستم مهاربندی با ترکیب SMA 100% و Steel 0% با مقدار تغییرمکان باقی مانده در سیستم مهاربندی با ترکیب SMA 0% و Steel 100% برقرار شده است که در فرمول (۱) نشان داده شده است.

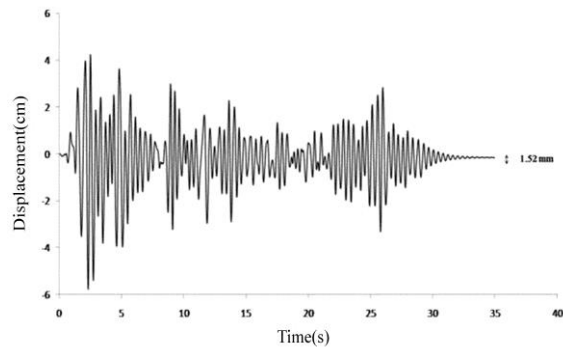
$$DOD = \frac{D_M - D_{ST}}{D_{SMA} - D_{ST}} \quad (1)$$

D_M = مقدار تغییرمکان باقی مانده در سیستم مهاربندی با ترکیب مورد نظر
 D_{ST} = مقدار تغییرمکان باقی مانده در سیستم مهاربندی با ترکیب SMA 0% و Steel 100%
 D_{SMA} = مقدار تغییرمکان باقی مانده در سیستم مهاربندی با ترکیب SMA 100% و Steel 0%

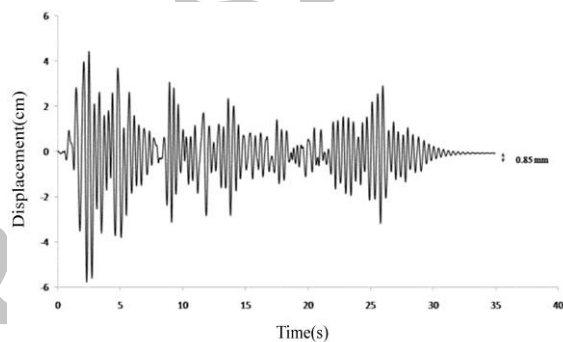
جدول ۵- مقایسه تغییرمکان باقی مانده سازه در سیستمهای مهاربندی بکار برده شده تحت حداکثر شتاب $0.6g$

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

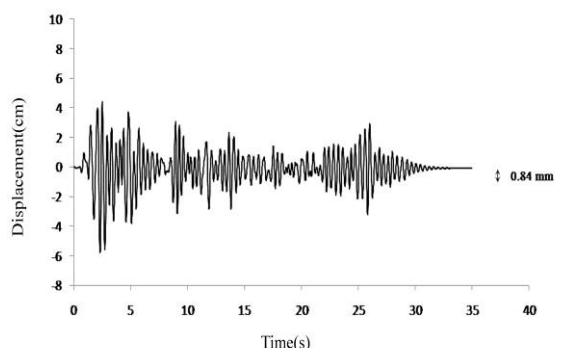
این شرایط برای جذب انرژی نیز بررسی شده و در جدول (۶) و شکل (۲۰) نشان داده شده است (بجای DOD، از DOE استفاده شده است). نحوه بدست آوردن DOD و DOE، در فرمولهای (۱) و (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۶- تاریخچه زمانی تغییرمکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربندی با ترکیب SMA 20% و Steel 80% تحت حداکثر شتاب $0.6g$

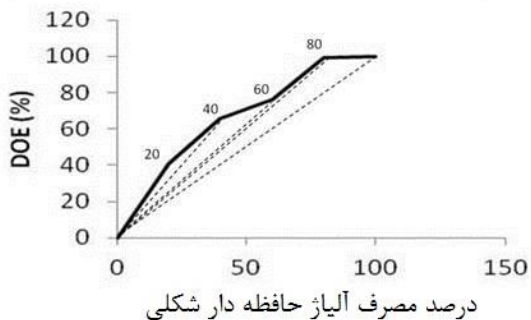


شکل ۱۷- تاریخچه زمانی تغییرمکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربندی با ترکیب SMA 80% و Steel 20% تحت حداکثر شتاب $0.6g$

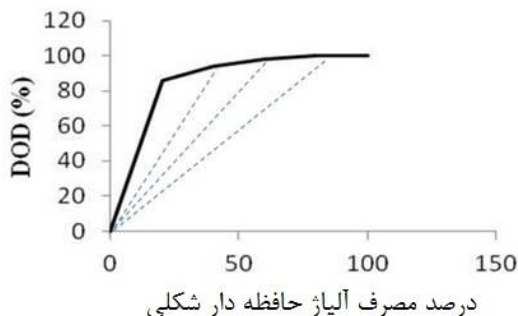


شکل ۱۸- تاریخچه زمانی تغییرمکان افقی تراز طبقه سوم در سیستم مهاربندی با ترکیب SMA 100% و Steel 0% تحت حداکثر شتاب $0.6g$

برای مقایسه بهتر، میزان تغییرمکان باقی مانده سازه در سیستمهای مهاربندی بکار برده شده تحت حداکثر شتاب $0.6g$ در



شکل ۲۰- مقایسه درصد مصرف آلیاژ حافظه دار با DOE تحت حداکثر شتاب ۰/۶g



شکل ۱۹- مقایسه درصد مصرف آلیاژ حافظه دار با DOD تحت حداکثر شتاب ۰/۶g

با توجه به شکل‌های (۱۹) و (۲۰) و با مقایسه نتایج مهارندهای ترکیبی با نتایج مهارند فولادی (مدل اول) و مهارند SMA (مدل ششم)، مشاهده می‌شود که نتایج مهارندهای ترکیبی ما بین نتایج مهارندهای فولادی و SMA بوده و به میزان مصرف SMA بستگی دارد و هر چقدر میزان مصرف SMA در مهارند بیشتر شود، عملکرد لرزه‌ای سازه نیز بهتر خواهد بود. اما در این تحقیق به دنبال مصرف بهینه SMA بوده و برای بدست آوردن آن میزان مصرف SMA و عملکرد لرزه‌ای سازه با هم مقایسه شده و بهترین حالت ملاک عمل خواهد بود. حالت بهینه زمانی میسر خواهد بود که در شکل‌های (۱۹) و (۲۰)، شیب منحنی نسبت به مبدا مختصات (خطوط خط چین) تند باشد (چون در این حالت میزان مصرف کمتر و عملکرد لرزه‌ای، نسبت به میزان مصرف، بیشتر خواهد بود).

همانطوریکه در شکل (۲۰)، دیده می‌شود که میزان جذب انرژی مدلها تفاوت چندانی با هم ندارند. دلیل آن این است که تحت حداکثر شتاب 0,6g، مدلها بیشتر زمان زلزله را در حالت خطی مانده و در بعضی مواقع وارد ناحیه غیرخطی می‌شوند و چون در حالت خطی، رفتار فولاد و SMA یکسان است، به همین دلیل میزان جذب انرژی مدلها تفاوت چندانی باهم ندارند. برای فهم بهتر موضوع، نمودار هیستریزیس مهارند SMA (مدل ششم) و مهارند فولاد (مدل اول) به ترتیب در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده است.

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

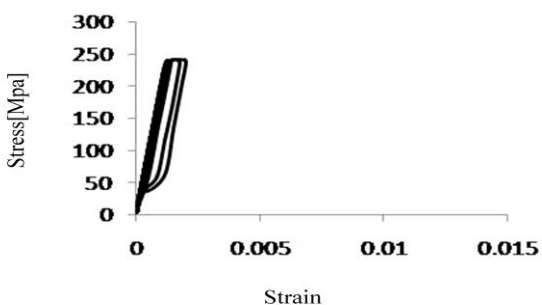
نوع مدل	میزان جذب انرژی (KN.m)	DOE (بر حسب درصد)
سیستم مهارندی SMA 0% و Steel 100%	453	0 %
سیستم مهارندی SMA 20% و Steel 80%	454.8	41%
سیستم مهارندی SMA 40% و Steel 60%	456	66%
سیستم مهارندی SMA 60% و Steel 40%	456.4	76%
سیستم مهارندی SMA 100% و Steel 20%	457.4	99%
سیستم مهارندی SMA 100% و Steel 0%	457.5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

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

E_M = میزان جذب انرژی سازه در سیستم مهارندی با ترکیب مورد نظر

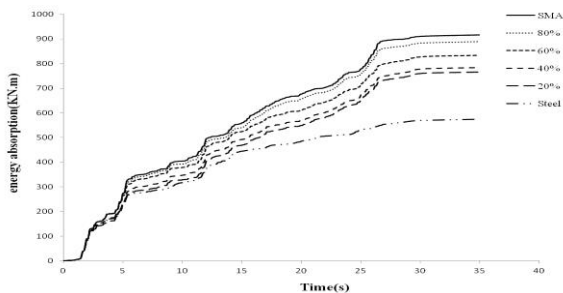
E_{ST} = میزان جذب انرژی سازه در سیستم مهارندی با ترکیب SMA 0% و Steel 100%

E_{SMA} = میزان جذب انرژی سازه در سیستم مهارندی با ترکیب Steel 0% و SMA 100%



شکل ۲۱- نمودار هیستریزیس مهارند فولادی (مدل اول) تحت حداکثر شتاب ۰/۶g

شکل (۲۴) مقایسه نمودارهای جذب انرژی سازه در سیستم‌های مهاربندی بکار برده شده تحت حداکثر شتاب $0.9g$ می‌باشد و جدول (۸) مقایسه میزان جذب انرژی سازه در سیستم‌های مهاربندی بکار برده شده تحت حداکثر شتاب $0.9g$ را نشان می‌دهد.

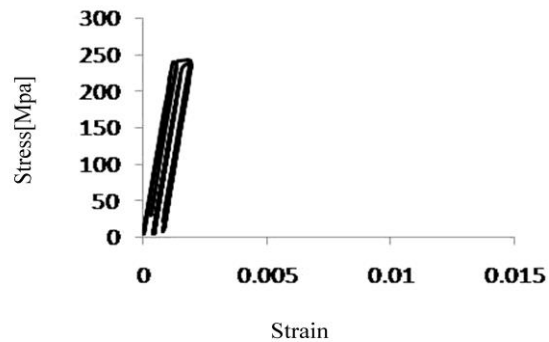


شکل ۲۴- مقایسه نمودارهای جذب انرژی سازه در سیستم‌های مهاربندی بکار برده شده تحت حداکثر شتاب $0.9g$

جدول ۸- مقایسه میزان جذب انرژی سازه در سیستم‌های مهاربندی بکار برده شده تحت حداکثر شتاب $0.9g$

نوع مدل	میزان جذب انرژی (KN.m)	DOE (بر حسب درصد)
سیستم مهاربندی SMA 0% و Steel 100%	552	0%
سیستم مهاربندی SMA 20% و Steel 80%	753	55%
سیستم مهاربندی SMA 40% و Steel 60%	776	61.5%
سیستم مهاربندی SMA 60% و Steel 40%	797	67%
سیستم مهاربندی SMA 80% و Steel 20%	884	91%
سیستم مهاربندی SMA 100% و Steel 0%	917	100%

شکل (۲۵) مقایسه درصد مصرف آلیاژ حافظه دار شکلی با DOE تحت حداکثر شتاب $0.9g$ را بصورت نمودار نشان می‌دهد.

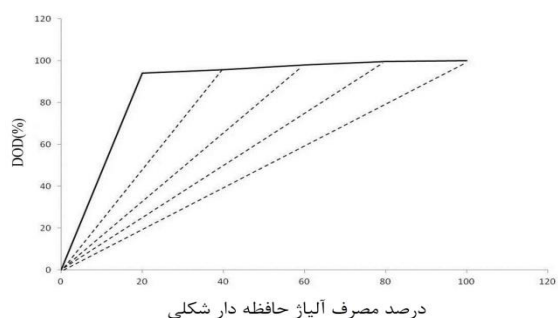


شکل ۲۲- نمودار هیستریزیس مهاربند SMA (مدل هشتم) تحت حداکثر شتاب $0.9g$

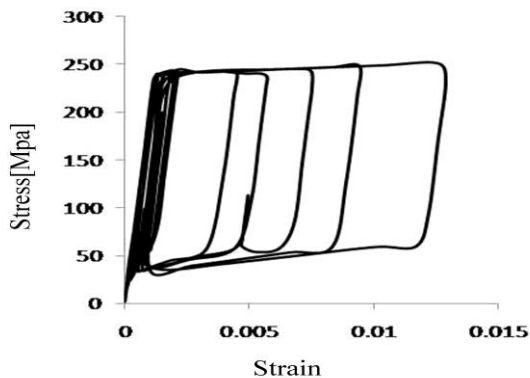
همانطوریکه گفته شد مدل‌ها تحت حداکثر شتابهای $0.9g$ و $0.6g$ بررسی شده‌اند که نتایج مدل‌های تحت حداکثر شتاب $0.9g$ را می‌توان در جدول‌های (۷) و (۸) و شکل‌های (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) مشاهده کرد. جدول (۷) مقایسه تغییرمکان باقی مانده سازه، در تمامی مدل‌ها، تحت حداکثر شتاب $0.9g$ می‌باشد و همچنین مقایسه میزان مصرف آلیاژ حافظه دار شکلی با مقدار تغییرمکان باقی مانده سازه در مدل‌های مورد نظر، تحت حداکثر شتاب $0.9g$ ، در شکل (۲۳) نشان داده شده است.

جدول ۷- مقایسه تغییرمکان باقی مانده سازه در سیستم‌های مهاربندی بکار برده شده تحت حداکثر شتاب $0.9g$

مدل مورد نظر	تغییرمکان باقی مانده در سازه (mm)	DOD (بر حسب درصد)
سیستم مهاربندی SMA 0% و Steel 100%	35.93	0%
سیستم مهاربندی SMA 20% و Steel 80%	2.14	96.8%
سیستم مهاربندی SMA 40% و Steel 60%	1.71	98%
سیستم مهاربندی SMA 60% و Steel 40%	1.18	99%
سیستم مهاربندی SMA 80% و Steel 20%	1.06	99.8%
سیستم مهاربندی SMA 100% و Steel 0%	1.01	100%



شکل ۲۳- مقایسه درصد مصرف آلیاژ حافظه دار با DOD تحت حداکثر شتاب $0.9g$



شکل ۲۷- نمودار هیستریزیس مهاربند SMA (مدل ششم)
تحت حداکثر شتاب $0.9g$

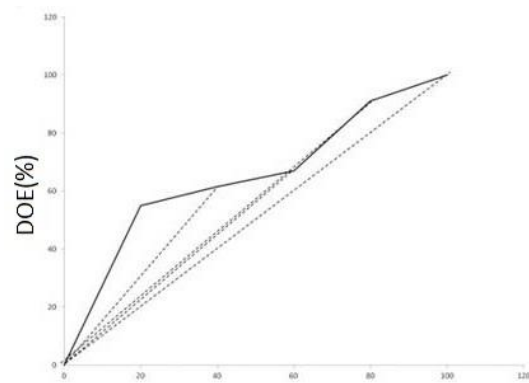
با توجه به شکل‌های ۲۳، ۲۰، ۱۹ و ۲۵، می‌توان سیستم مهاربند با ترکیب ۲۰% SMA و ۸۰% Steel را در این تحقیق مهاربند بهینه معرفی کرد چرا که در مهاربند مذکور تنها با مصرف ۲۰ درصد از SMA، عملکردهای لرزه‌ای ۸۹، ۴۱، ۹۶٫۸ و ۵۵ درصدی دارند که کمترین حالت ۴۱ درصد و بیشترین حالت ۹۶٫۸ درصد می‌باشد.

۹- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نمودار تنش - کرنشی برای فولاد معرفی شد که این نمودار از جنبه‌های ظاهری شبیه نمودار تنش-کرنش آلیاژ حافظه دار شکلی بود که یکی از مهمترین شباهت‌های آنها در میزان جذب انرژی در حلقه اول می‌باشد. همانطوریکه مشاهده می‌شود این دو آلیاژ، در نمودار تنش-کرنششان، جذب انرژی تقریباً یکسانی را دارند در حالی که در مدل‌های ارائه شده، با افزایش مصرف آلیاژ حافظه‌دار شکلی، میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد و با افزایش شدت زلزله این حالت واضح‌تر می‌شود که دلیل اصلی آن را می‌توان در خصوصیات ویژه این آلیاژها یعنی بازگشت سازه به حالت اولیه بعد از باربرداری و مقاومت در برابر خستگی مشاهده کرد.

در این تحقیق، برای بدست آوردن بهینه ترین ترکیب در مهاربند باید حالتی را انتخاب کنیم که در نمودارهای درصد مصرف آلیاژ حافظه‌دار شکلی به DOD و DOE (شکل‌های ۱۹، ۲۰، ۲۳ و ۲۵)، شیب تندی را داشته باشد که این حالت در سیستم مهاربند با ترکیب ۲۰% SMA و ۸۰% Steel می‌باشد که تنها با استفاده ۲۰% از آلیاژ حافظه‌دار شکلی، در کمترین حالت، عملکرد ۴۱ درصدی و در بیشترین حالت، عملکرد ۹۶٫۸ درصدی را نسبت به سیستم مهاربند با ترکیب ۱۰۰% SMA و ۰% Steel دارد.

استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در مهاربند برای مقابله با زلزله های ضعیف و متوسط، با این شرایط، تفاوت چندانی با فولاد نداشته و بکارگیری آنها از لحاظ اقتصادی، خیلی قابل توجه نمی‌باشد.

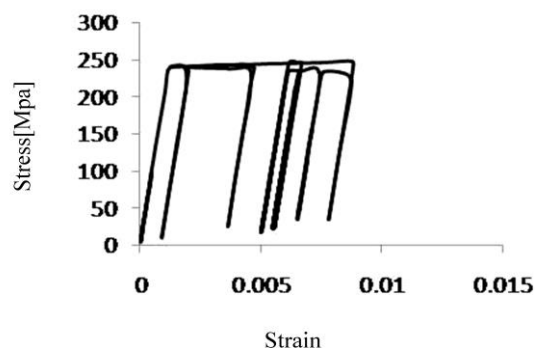


درصد مصرف آلیاژ حافظه دار شکلی

شکل ۲۵- مقایسه درصد مصرف آلیاژ حافظه دار با DOE
تحت حداکثر شتاب $0.9g$

در این تحقیق، نمودار تنش - کرنشی برای فولاد معرفی شد که این نمودار از جنبه‌های ظاهری شبیه نمودار تنش-کرنش آلیاژ حافظه دار شکلی بود که یکی از مهمترین شباهت‌های آنها در میزان جذب انرژی در حلقه اول می‌باشد. همانطوریکه مشاهده می‌شود این دو آلیاژ، در نمودار تنش-کرنششان، جذب انرژی تقریباً یکسانی را دارند در حالی که در مدل‌های ارائه شده، با افزایش مصرف آلیاژ حافظه‌دار شکلی، میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد و با افزایش شدت زلزله این حالت واضح‌تر می‌شود (همانند شکل ۲۴) که دلیل اصلی آن را می‌توان در خصوصیات ویژه این آلیاژها مشاهده کرد یعنی بازگشت سازه به حالت اولیه بعد از باربرداری و مقاومت در برابر خستگی.

این تفاوت را می‌توان بوضوح در نمودار هیستریزیس مهاربند فولادی و مهاربند SMA تحت حداکثر شتاب $0.9g$ مشاهده گردید.



شکل ۲۶- نمودار هیستریزیس مهاربند فولادی (مدل اول)
تحت حداکثر شتاب $0.9g$

۱۰-منابع

- [12]- Yam, M.C.H. et al., Numerical study and practical design of beam-to-column connections with shape memory alloys, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 104, No. 1, 2014, pp 177-192.
- [13]- Sun, W., Seismic response control of high arch dams including contraction joint using nonlinear super-elastic SMA damper, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 9, 2011, pp 3762-3767.
- [14]- Asgarian, B., Moradi, S., Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67, No. 1, 2011, pp 65-74.
- [15]- Miller, D.J., Fahnestock, L.A., Eatherton, M.R., Development and experimental validation of a nickel-titanium shape memory alloy self-centering buckling-restrained brace, *Engineering Structures*, Vol. 40, No. 1, 2012, pp 288-298.
- [16]- Walter Yang, Ch.Sh., Desroches, R., Leon, R.T., Design and analysis of braced frames with shape memory alloy and energy-absorbing hybrid devices, *Engineering Structures*, Vol. 32, No. 2, 2010, pp 498-507.
- [17]- Otsuka K, Wayman CM., *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, 1998.
- [18]- Song, G., Ma, N., Li H., Application of shape memory alloy in civil structures, *Engineering Structures*, Vol. 28, 2006, pp 1266-1274.
- [19]- Janke, L., Czaderski, C., Motavalli, M., Ruth J., Application of shape memory alloys in civil engineering structures-overview, limits and new ideas, *Materials and Structures*, Vol. 38, 2005, pp 578-592.
- [20]- Kazemi-Choobi, K., Khalil-Allafi, J., Abbasi-Chianeh, V., Investigation of the recovery and recrystallization processes of Ni50.9Ti49.1 shape memory wires using in situ electrical resistance measurement, *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 551, No.15, 2012, pp.122-127.
- [21]- Sabelli, R., Research on Improving the Design and Analysis of Earthquake-Resistant Steel-Braced frame, Professional Fellowship Report No. PF2000-9, NEHRP, 2001, US.
- [22]- Desroches, R., McCormick, J., Delemont, MA., Cyclical properties of superelastic shape memory alloy, *ASCE Journal of Structural Eng.*, Vol. 130, No. 1, 2004, pp 38-46.
- [23]- قاسمیه، م.، کاری، ا.، مقایسه بهبود عملکرد لرزه ای سازه های دارای بادبندهای ساخته شده از آلیاژهای حافظه دار شکلی و بادبندهای مقید شده در برابر کماتش، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
- [1]- Alvandi, S., Ghassemieh, M., Application of shape memory alloys in seismic isolation: A review, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, Vol. 47, No. 2, 2014, pp 153-171.
- [2]- Ozbulut, O.E., Hurlebaus, S., Energy-balance assessment of shape memory alloy-based seismic isolation devices, *Smart Structures and Systems*, Vol. 8, No. 4, 2011, pp 399-412.
- [3]- Ma, H., C.H.Yam, M., Modelling of a self-centering damper and its application in structural control, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67, No. 4, 2011, pp 656-666.
- [4]- Motahari, S.A., Ghassemiyeh, M., Abolmaali, S.A., Implementation of shape memory alloy dampers for passive control of structures subjected to seismic excitations, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 63, No. 12, 2007, pp 1570-1579.
- [5]- Ben Mekki, O., Auricchio, F., Performance evaluation of shape-memory-alloy superelastic behavior to control a stay cable in cable-stayed bridges, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 46, No. 2, 2011, pp 470-477.
- [6]- Padgett, J., Desroches, R., Ehlinger, R., Experimental response modification of a four-span bridge retrofit with shape memory alloys, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 17, No. 6, 2009, pp 694-708.
- [7]- Shrestha, K.C. et al., Applicability of Cu-Al-Mn shape memory alloy bars to retrofitting of historical masonry constructions, *Smart Structures and Systems*, Vol. 3, No. 2, 2011, pp 233-256.
- [8]- Malagisi, S., Marfia, S., Sacco, E., Toti, J., Modeling of smart concrete beams with shape memory alloy actuators, *Engineering Structures*, Vol. 75, No. 1, 2014, pp 63-72.
- [9]- Muntasir Billah, A.H.M., Shahria Alam, M., Seismic performance of concrete columns reinforced with hybrid shape memory alloy (SMA) and fiber reinforced polymer (FRP) bars, *Construction and Building Materials*, Vol. 28, No. 1, 2012, pp 730-742.
- [10]- Youssef, M.A., Elfeki, M.A., Seismic performance of concrete frames reinforced with superelastic shape memory alloys, *Smart Structures and Systems*, Vol. 9, No. 4, 2012, pp 313-333.
- [11]- Speicher, M.S., DesRoches, R., Leon, R.T., Experimental results of a NiTi shape memory alloy (SMA)-based recentering beam-column connection, *Engineering Structures*, Vol. 33, No. 9, 2011, pp 2448-2457.

Evaluating the seismic performance of steel-sma hybrid Bracing structures

Mohammad Hooshmand

Master of Science in Civil Engineering-Structures, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Behzad Rafezy

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Jaefar khalil elafi

Assistant Professor, Department of Materials Engineering Faculty, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

ABSTRACT:

In this study the seismic performance of hybrid braces composed of steel and shaped-memory alloys (SMA). is investigated Six types of hybrid braces were used, constituted by SMA content of 0, 20, 40, 60, 80, and 100%. A nonlinear dynamic analysis was performed under El Centro earthquake records, with the maximum acceleration of 0.6g and 0.9g. Our results showed that the seismic performance, i.e., the amount of energy absorption and residual strain, of steel-SMA hybrid braces depends on the SMA content. The optimal value of SMA content was 20%, as, at this concentration, a hybrid brace can be designed with good seismic performance at a justifiable fabrication cost.

Keywords: Hybrid brace, Shape Memory Alloy (SMA), Seismic Performance, Nonlinear Dynamic Analysis, Finite Element Modeling.