

بررسی تاثیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با پایه آهنی بر دیواربرشی بتنی با بازشوی متقارن

حمیدرضا نصیری^۱، مهدی قاسمیه^{۲*}

۱- دانش‌آموخته ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

*m.ghassemieh@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۹/۱۰/۲۳]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۹/۰۱/۲۴]

چکیده

امروزه استفاده از مصالح نوین برای بهبود ویژگی‌های مثبت سازه از جمله توانایی برگشت‌پذیری، شکل‌پذیری، توانایی اتلاف انرژی و... در حال افزایش است. یکی از این مصالح آلیاژهای حافظه‌دار شکلی هستند که می‌توانند روی ویژگی‌های سازه تاثیر مثبت زیادی بگذارند. در این مطالعه سعی شده تا تاثیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر بهبود ویژگی‌های دیوار برشی با بازشو ارائه شود. بدین منظور دیوار برشی با بازشوی متقارنی که توسط یکی از پژوهشگران در آزمایشگاه ساخته شده است، مدل‌سازی شده و پس از درستی آزمایش نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی، تاثیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر توانایی اتلاف انرژی، قابلیت برگشت‌پذیری و شکل‌پذیری سازه مورد مطالعه قرار داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل چرخه‌ای و تحلیل بارافزون، حاکی از افزایش قابلیت برگشت‌پذیری و شکل‌پذیری سازه و کاهش توانایی اتلاف انرژی آن در صورت استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی است. میزان این تغییرات در رفتار سازه به شدت به محل استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سازه بستگی دارد. هنگام بررسی‌های انجام شده مناسب‌ترین محل استفاده از این آلیاژها در بین گزینه‌های مورد بحث، از نظر توانایی اتلاف انرژی، برگشت‌پذیری و شکل‌پذیری، تیر پیوند و از لحاظ کاهش هزینه‌های مصرف آلیاژ حافظه‌دار شکلی، جان دیوار است.

واژگان کلیدی: آلیاژ حافظه‌دار شکلی، دیوار برشی بتنی، شکل‌پذیری، برگشت‌پذیری.

۱- مقدمه

انرژی وارد شده به سازه توسط زلزله، به وزن سازه و شتاب زلزله بستگی دارد. انرژی وارد شده لازم است بدون اینکه پایداری کلی و جزئی سازه از بین برود مستهلک شود. اتلاف انرژی تنها با استفاده از ظرفیت کشسانی مصالح، به دلیل بزرگ

بارگذاری زلزله در طراحی سازه‌های کشورهای زلزله‌خیز نقش مهمی را ایفا می‌کند و عدم توجه کافی به این امر، باعث ایجاد خسارات بسیار زیادی به هنگام وقوع زلزله خواهد شد.

این مواد، رفتار ابر کشسان آن‌ها است؛ بدین معنی که توانایی تحمل کرنش‌های بزرگ تا حدود ۷ درصد و یا حتی بزرگ‌تر را بدون ایجاد کرنش پسماند دارند [5].

در دهه اخیر، پژوهش‌هایی در رابطه با استفاده از آلیاژها حافظه‌دار شکلی در سازه‌ها به عنوان میراگر، مهاربند و یا اعضای اتصالی برای کنترل غیرفعال سازه‌ها انجام شده است. اولین پژوهش در این زمینه در سال ۱۹۹۱ توسط گراسر و کزارلی صورت گرفت. در آن پژوهش امکان استفاده از نایتینول به عنوان میراگر زلزله سنجیده شد و تاثیر فرکانس و تاریخچه بارگذاری بر میزان میرایی سیستم‌های نایتینول بررسی و یک الگوی رفتاری یک‌بعدی برای مدل‌سازی رفتار شبه الاستیک آن پیشنهاد شد [6]. خاصیت حافظه شکلی در آلیاژهای حافظه‌دار شکلی پایه آهن برای اولین بار توسط انامی و همکارانش با مشاهده میزان کمی کرنش برگشت‌پذیر در آلیاژ Fe18Mn کشف شد [7]. سوینی و هیس هنگام پژوهش روی کابل‌ها دریافتند که استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در کابل‌ها می‌تواند باعث کاهش تغییر شکل و شتاب پاسخ سازه شود [8]. اوهی، آلیاژ حافظه‌دار NiTiCo را در مهاربند سازه‌ای مورد استفاده قرار داد و با این عمل توانست کرنش‌هایی تا حدود ۵ درصد را پس از باربرداری به صفر برساند [9].

قاسمیه و همکاران اثر میلگردهای حافظه‌دار شکلی را در دو حالت فراکشسان و حافظه شکلی بر ضریب رفتار دیوارهای برشی بتنی بدون بازشو مورد بررسی قرار دادند و نتایج مشاهده‌شده حاکی از افزایش ضریب رفتار دیوار برشی بتنی و پایداری در منحنی چرخه‌ای آن بود [10]. کاری و همکاران با ابداع میراگری خاص از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی و به‌کارگیری آن در بادبندهای همگرا توانستند جابه‌جایی پسماند و همچنین جابه‌جایی بیشینه سازه را کاهش دهند [11]. شاهوردی و همکاران هنگام یک آزمایش روی تیر بتنی دو سر مفصل و با استفاده از روش نزدیک سطح (قرار دادن نوارهایی از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در نزدیکی سطح پایینی بتن) و با ایجاد نیروی پیش‌تندگی علاوه بر کاهش عرض ترک‌های تیر

شدن ابعاد مقاطع سازه‌ای در طراحی، بسیار پرهزینه است در نتیجه لازم است از ظرفیت غیر کشسانی مصالح تا جایی که پایداری کلی و جزئی سازه به خطر نیفتد استفاده شود. استفاده از دیوار برشی یکی از راه‌های اتلاف انرژی زلزله است که امروزه به دلیل رفتار مناسبی که از خود در برابر باد و زلزله نشان می‌دهد، به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از راهکارهایی که بتواند ویژگی‌های این دیوارها را بهبود بخشد، بسیار دارای اهمیت است. در دیوارهای برشی بتن مسلح، تامین شرایط شکل‌پذیری، به ویژه اگر به دلایل معماری نیاز به بازشو در دیوارها داشته باشیم، کار بسیار دشواری است. وجود بازشو باعث ایجاد تمرکز تنش در نواحی متعددی از دیوار به ویژه در اطراف بازشو خواهد شد. آسیب‌های ناشی از فشار و کشش در اثر همین تمرکز تنش به وجود می‌آیند؛ در نتیجه تعداد و محل قرارگیری این بازشوها تاثیر به‌سزایی بر رفتار دیوار برشی خواهد گذاشت [1]. از دیگر مشکلات دیوار برشی می‌توان به تغییر شکل‌های ماندگار آن اشاره کرد که باعث می‌شود دیوار پس بارگذاری در جهت‌های قائم و افقی به علت آسیب‌های وارد شده نتواند رفتار مناسب قبلی خود را نشان دهد. یکی از روش‌هایی که به کمک آن می‌توان شکل‌پذیری دیوار برشی را افزایش داد استفاده از مصالح شکل‌پذیر است که به‌طور عمده در روش‌های کنترل غیرفعال سازه‌ها به کار گرفته می‌شوند. آلیاژ حافظه‌دار شکلی یکی از مصالح شکل‌پذیر است که می‌تواند در این خصوص استفاده شود [2]. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به دلیل رفتار منحصر به فرد در حدود بیست سال است که در صنایع مختلف مانند هوافضا و پزشکی کاربرد یافته‌اند. معروف‌ترین و پرکاربردترین آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، نایتینول و آلیاژهای پایه آهن هستند [3]. نایتینول دارای خاصیت ابر کشسان بسیار بالا، مدول الاستیسیته بالا، مقاومت بالا در برابر خوردگی و خستگی است ولی به دلیل نمودار پرچمی شکلی که دارد قابلیت جذب انرژی زیادی نسبت به فولاد ندارد و قیمت آن بسیار بالاست درحالی‌که آلیاژهای پایه آهن هم از نظر قیمت و هم از نظر قابلیت جذب انرژی شرایط بهتری نسبت به نایتینول دارند [4]. ویژگی اصلی

توانستند تنش موجود در میلگردها و خیز تیر را کاهش دهند [12].

امروزه رفتار آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به صورت پس کشیده نیز به شدت مورد توجه قرار گرفته است. برای پس کشیده کردن این نوع از آلیاژها دیگر نیاز به جک هیدرولیکی و به کار بردن هزینه‌های هنگفت نبوده و این عمل تنها با افزایش دمای آلیاژ به وسیله عبور جریان برق انجام می‌پذیرد [13]. اولین کاربرد پس کشیدگی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی پایه آهن در مهندسی سازه، مربوط به پل یک بزرگراه در ایالت میشیگان آمریکا بود. این پل به دلیل ضعف در تحمل برش دچار ترک خوردگی شدید شده بود. برای مقاوم سازی این پل، میله‌هایی به قطر ۱۰ میلی‌متر در جهت عمود بر ترک‌ها قرار داده شده و سپس با عبور جریان برق با شدت ۱۰۰۰ آمپر، این میله‌ها به دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیدند. نتیجه استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در این پروژه کاهش ۴۰ درصدی عرض ترک‌های پل بود [14].

آرین و قاسمیه با ابداع یک سیستم جدید از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی و قرار دادن آن در تکیه‌گاه پل، توانستند به نتایج مناسبی از جمله بهبود عملکرد غیرخطی سازه، کاهش برش پایه، کاهش نیروی محوری ستون برسند. علاوه بر این در مطالعات دیگر استفاده از همین سیستم در یک مدل سه بعدی، باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای پل و کاهش نیروهای افقی و قائم ناشی از زلزله بر سازه شد [15-18]. عباس و همکاران در یک پژوهش از ترکیب الیاف کربن (CFRP) و آلیاژ حافظه‌دار با روش نزدیک سطح (NSM) به منظور مقاوم سازی پایه یک پل استفاده کردند. نتایج حاکی از افزایش قابل توجه قابلیت برگشت پذیری و شکل پذیری پایه پل بود [19]. ابوعلی و همکاران در پژوهشی به مقایسه یک تیر تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار با پایه آهنی به روش نزدیک سطح و همچنین با یک تیر تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) پرداختند. قابلیت شکل پذیری و توانایی اتلاف انرژی تیر با آلیاژ پایه آهنی به مراتب به طرز چشمگیری بهتر از تیر با الیاف کربن بود [20]. دولت آبادی و همکاران با استفاده از روش اجزاء محدود، رفتار

تیرهای تقویت شده بتنی را با استفاده از آلیاژ حافظه دار پایه آهنی بررسی نموده و پارامترهای تاثیرگذار در این نوع تقویت که به صورت لایه‌های شاتکریت شده انجام می‌شود را مطالعه نمودند [21].

هدف این مقاله بررسی تاثیر میلگردهای حافظه‌دار شکلی با پایه آهنی بر توانایی اتلاف انرژی، توانایی برگشت پذیری و شکل پذیری دیوار برشی بتنی است. برای دستیابی به این هدف، ابتدا دیوار برشی بتنی به میلگردهای فولادی و بازوهای متقارنی که در آزمایشگاه ساخته شده است به وسیله نرم افزار OpenSees و توسط المان ماکروی SFIMVLEM مدل سازی شده و با نتایج آزمایشگاهی درستی آزمایی می‌شود. سپس میلگردهای فولادی دیوار برشی با میلگردهای حافظه دار پایه آهنی جایگزین شده و به صورت تحلیلی رفتار دیوار برشی بتنی با این آلیاژها را در مقایسه با دیوار برشی بتنی با میلگردهای فولادی مقایسه می‌شود.

۲- آلیاژ حافظه‌دار شکلی

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی دارای دو فاز کریستالی به نام‌های آستنیت و مارتنزیت هستند. حالت آستنیت حالت اصلی و متقارن بوده و در دماهای بالا و تنش‌های پایین پایدار است. در حالی که حالت مارتنزیت حالتی با تقارن کمتر است و در دماهای پایین و تنش‌های بالا پایدار است. این دو فاز تحت شرایط خاصی مانند تغییر تنش و یا تغییر دما می‌توانند به یکدیگر تبدیل شوند. این تبدیل برگشت پذیر فازها، تبدیل مارتنزیتی نامیده می‌شود که تمامی ویژگی‌های رفتاری آلیاژهای حافظه‌دار شکلی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و آن‌ها را به عنوان یک ماده خاص مطرح می‌کند [22].

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی دارای دو رفتار مهم حافظه شکلی و فراکشسان هستند. هنگامی که یک ماده حافظه‌دار شکلی در حالت استنیت و دمای بالاتر از A_f قرار دارد و با اعمال تنش استنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود زیرا استنیت در تنش‌های بالا ناپایدار است. در هنگام باربرداری و حذف تنش، تبدیل معکوس رخ می‌دهد و مارتنزیت ناپایدار تبدیل به استنیت می‌-

در سال‌های اخیر به نظر می‌رسد که بزرگ‌ترین مانع استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی یعنی قیمت بالای آن در چند سال آینده از سر راه برداشته شود. آلیاژ استفاده شده این مقاله از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی پایه آهن با ترکیب $\text{Fe}_{43.5}\text{Mn}_{34}\text{Al}_{15}\text{Ni}_{7.5}$ است که در سال ۲۰۱۱ توسط اموری کشف شد [27]. مشخصات مکانیکی این آلیاژ در جدول (۱) ارائه شده است:

جدول ۱. مشخصات مکانیکی FeMnAlNi [27]

FeMnAlNi	Peroperties
austenite to martensite starting stress	320 MPa
austenite to martensite finishing stress	442.5 MPa
martensite to austenite starting stress	210.8 MPa
martensite to austenite finishing stress	122 MPa
superelastic plateau strain length	6.13%
modulus of elasticity	98.4 GPa

Table 1. Mechanical properties of FeMnAlNi [27]

۳- مدل‌سازی عددی

دیوار برشی مطالعه شده، دیوار شش طبقه که با مقیاس ۴۰ درصد نسبت به نمونه واقعی خود در آزمایشگاه ساخته شده است و برای به وجود آوردن اثر طبقات بالاتر روی نمونه از دو جک هیدرولیکی قائم ۱۰۰۰ کیلو نیوتونی استفاده شده است. بتن مورد استفاده در این آزمایش دارای مقاومت فشاری ۳۲/۷ مگاپاسکال، مقاومت کششی ۲/۹ و مدول الاستیسیته ۲۳/۳ گیگاپاسکال هست. مشخصات ابعادی دیوار برشی در شکل (۲) ارائه شده است [28].

شکل ۲. ابعاد دیوار برشی [28]

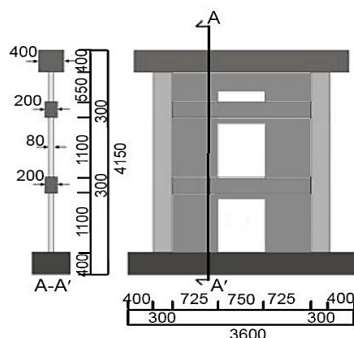


Fig. 2. Dimensions of shear wall [28]

شود. تبدیل معکوس از روی یک مسیر متفاوت ماده را به مکان اولیه می‌رساند. این رفتار را رفتار فراکشسان می‌نامند چراکه هیچ کرنش پسماندی روی ماده باقی نمی‌ماند. اگر دمای اولیه ماده استنیت قبل از اعمال تنش کمتر از A_s باشد، از آنجایی که مارتنزیت در دماهای پایین پایدار است، در هنگام باربرداری به استنیت تبدیل نخواهد شد و کرنش پسماند بر روی ماده باقی خواهد ماند. این کرنش توسط اعمال دما قابل بازیابی است. با اعمال دمای بالاتر از A_f این ماده به حالت اولیه خود بازخواهد گشت [23]. این رفتار به‌عنوان رفتار حافظه‌دار شکلی شناخته می‌شود (شکل ۱).

شکل ۱. رفتار آلیاژهای حافظه‌دار شکلی [10]

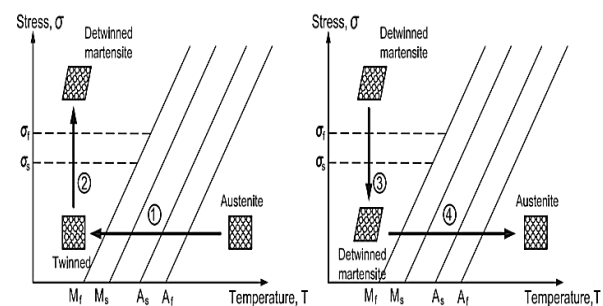


Fig. 1. Shape memory alloys behavior [10]

تاکنون آلیاژهای حافظه‌دار زیادی کشف و ساخته شده‌اند اما تعداد کمی از آن‌ها قابلیت بهره‌برداری در علوم مهندسی را داشته‌اند. از میان آلیاژهای حافظه‌دار شکلی تنها آلیاژهای نایتینول و آلیاژهای پایه آهن و مس قابلیت استفاده در شاخه مهندسی عمران را دارند [24]. آلیاژ نایتینول به علت قیمت بالای آن چندان در مهندسی عمران مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و به تدریج در حال جایگزینی با آلیاژهای پایه آهن است [25]. اسمیت و همکاران در مقاله‌ای به کاهش قیمت آلیاژهای حافظه‌دار شکلی پایه نایتینول از ۱۱۰۰ دلار آمریکا به ازای هر کیلوگرم در سال ۱۹۹۹ به ۱۱۱ دلار آمریکا در سال ۲۰۰۴ اشاره کرده‌اند [26]. تا پایان سال ۲۰۱۹ هر کیلوگرم آلیاژ نایتینول ۲۰ تا ۳۰ دلار آمریکا خرید و فروش شده است و این در حالی است که قیمت آلیاژ حافظه‌دار شکلی پایه آهن در سال ۲۰۱۹ تقریباً ۱۵ تا ۲۰ درصد قیمت آلیاژ نایتینول بوده است. با توجه به روند کاهشی قیمت آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

جدول ۴. مشخصات میلگردهای مورد استفاده در دیوار [28]

rebar	Yield strength (Mpa)	Ultimate strength (Mpa)	Young modulus (Gpa)
D6	425	538	204
D10	366	509	180
D13	369	522	189
D16	400	569	194
D19	384	616	183
Φ	985	1143	197

Table 4. Properties of rebars [28]

در این مقاله برای مدل سازی دیوار برشی، از المان ماکروی SFIMVLEM استفاده خواهد شد [30]. این المان از تعدادی پانل دوبعدی تشکیل شده است که از بالا و پایین به دو صفحه صلب متصل می شوند. رفتار خمشی، برشی و فشاری المانها به وسیله همین پانل ها مدل سازی می شوند. مرکز دوران این المان در فاصله ch از صفحه صلب پایینی قرار دارد که طبق پژوهش های پیشین [31]، ضریب c برابر با 0.4 در نظر گرفته می شود (شکل ۳). نکته قابل توجه در مورد المانهای SFIMVLEM این است که در این المان مجموع تنش ها در جهت x برابر با صفر در نظر گرفته می شود و در عوض برای هر کدام از این المانها یک درجه آزادی تعریف می شود که از نظر سینماتیکی جدا از درجات آزادی اصلی (Δ) محسوب می شوند. بدین ترتیب اندرکنش بین هر کدام از پانل ها نیز در مدل اعمال می شود. در نتیجه این المانها دارای $m+\Delta$ درجه آزادی هستند که m تعداد المانهای صفحه ای است [32].

شکل ۳. المان ماکروی SFIMVLEM [29]

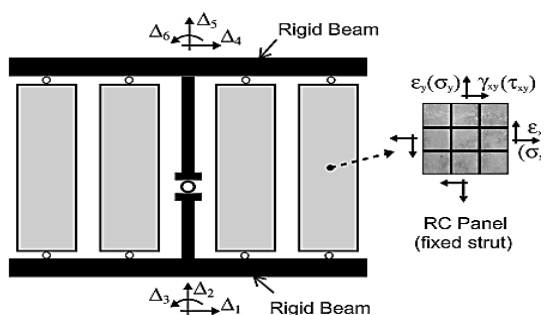


Fig. 3. SFIMVLEM macro model [29]

نکته حائز اهمیت دیگری که در مورد المانهای SFIMVLEM وجود دارد رفتار برشی فرض شده در مورد

جزئیات ابعادی و میلگرد گذاری دیوار برشی در جدول های (۲) و (۳) و مشخصات میلگردهای مورد استفاده در جدول (۴) ارائه شده است. برای مدل سازی هر سازه می توان از المانهای میکرو و ماکرو استفاده کرد. المان میکرو معمولاً دقت کار را افزایش داده ولی سرعت تحلیل را به شدت کاهش می دهد. خود المانهای میکرو دارای تعداد درجات آزادی به نسبت پایینی هستند، اما در مدل سازی تعداد زیادی از این المانها استفاده می شود که این امر باعث افزایش چشمگیر تعداد درجات آزادی کلی خواهد شد و این اتفاق سبب به وجود آمدن ماتریس سختی بسیار بزرگی خواهد شد که نتیجه آن به وجود آمدن تعداد معادلات زیادی می شود که حل این معادلات به شدت زمان بر خواهد بود [29]. المانهای ماکرو مشکل سرعت در تحلیل را تا حد زیادی حل کرده اند. این المانها به دلیل تعداد درجات آزادی اندک و در نتیجه آن ماتریس سختی کوچک تر، دارای سرعت مناسبی برای تحلیل های غیرخطی هستند، اما یکی از مشکلات این المانها دقت آنها است. المانهای ماکرو معمولاً دارای دقت کمتری نسبت به المانهای میکرو هستند که این مشکل نیز با استفاده از هر یک از المانهای ماکرو در محل و کاربری مخصوص خود تا حدود زیادی حل خواهد شد.

جدول ۲. جزئیات ابعادی و میلگرد گذاری دیوار برشی [28]

Item	Specification
Wall thickness	80 mm
Wall reinforcement	D6@100
Reinforcing bar of opening (vertical)	4-D13
Reinforcing bar of opening (horizontal)	4-D13

Table 2. Section and reinforcement details of shear wall web [28]

جدول ۳. جزئیات ابعاد و میلگرد گذاری اجزای دیوار برشی [28]

Item	Section dimension (mm)	Longitudinal rebars	Transverse rebars
Boundry element	300x300	8-D19	2 Φ 10@75
Coupled beam	200x300	2-D13	2 Φ 6@100
Loading beam	400x400	2-D19	2D10@100
foundation	600x400	4-D19	4D10@100

Table 3. Section and reinforcement details of shear wall elements [28]

فعال‌سازی، آلیاژ موردنظر مدل‌سازی می‌شود. منحنی‌های رفتاری فولاد، بتن و آلیاژ حافظه‌دار شکلی در شکل (۵) ارائه شده است.

۴- درستی آزمایشی نتایج

تصویر نهایی دیوار مدل‌سازی شده با المان‌های ماکرو در شکل (۶) نمایش داده شده است. همان‌گونه که در آن شکل ارائه شده است، برای مدل‌سازی المان‌های مرزی و جان دیوار برشی در هر طبقه از یک المان ماکروی SFIMVLEM استفاده شده است. برای محل اتصال تیر پیوند به بال دیوار نیز در هر قسمت از دو المان ماکرو استفاده شده است تا اتصال به درستی شبیه‌سازی شود [36]. به منظور پیوند دو قسمت چپ و راست دیوار، توسط تیر پیوند از المان Displacement-Based Beam که به صورت پیش‌فرض در نرم‌افزار موجود است بهره برده شده است.

پس از مدل‌سازی دیوار، باید بارگذاری نشان داده شده در شکل (۷) که در آزمایشگاه روی دیوار اعمال شده را به مدل اعمال نمود و نتایج آن به منظور اعتبارسنجی، با نتایج آزمایشگاهی [28] مقایسه شوند. در این بارگذاری چهارده چرخه وجود دارد که مقدار جابه‌جایی نسبی در صدی در هر چرخه به ترتیب برابر با ± 0.04 ، ± 0.1 ، ± 0.25 ، ± 0.5 ، ± 0.75 ، ± 1.0 ، ± 1.5 است که هر کدام دو بار تکرار می‌شوند. همان‌گونه که در شکل (۸) نشان داده شده است المان مذکور توانسته هماهنگی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی داشته باشد.

پانل‌های این المان‌ها است. رفتار برشی در مورد قسمت بتنی این المان به صورت الاستوپلاستیک و در مورد قسمت فولادی آن الاستیک خطی است. نوع این رفتارها در شکل (۴) به طور کامل نشان داده شده است [33].

شکل ۴. رفتار و پارامترهای مدل‌سازی پانل‌ها [33]

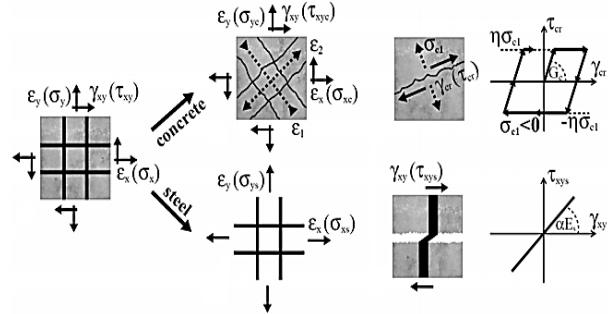


Fig. 4. Behavior and modeling parameters of the constitutive RC panel model FSAM [33]

رفتار غیرخطی فولاد، توسط مدل رفتاری منوگوتو و پیتنو مدل‌سازی شده است [34]. این مدل رفتاری دارای روابط ساده و دقت مناسبی است و توانایی مدل‌سازی خواص هیستریزیس فولاد را نیز دارد. از مدل رفتاری چانگ، برای مدل‌سازی رفتار بتن استفاده شده است. این مدل دارای روابط به نسبت پیچیده-ای بوده و توانایی مدل‌سازی رفتار چرخه‌ای بتن‌های معمولی، پرمقاومت، محصورشده و محصور نشده را دارد [35]. آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیز به صورت پیش‌فرض و تحت عنوان SelfCentering Material در نرم‌افزار OpenSees موجود است که با وارد کردن مقادیر سختی اولیه، سختی ثانویه و تنش

شکل ۵. منحنی‌های رفتاری فولاد، بتن و آلیاژ حافظه‌دار شکلی

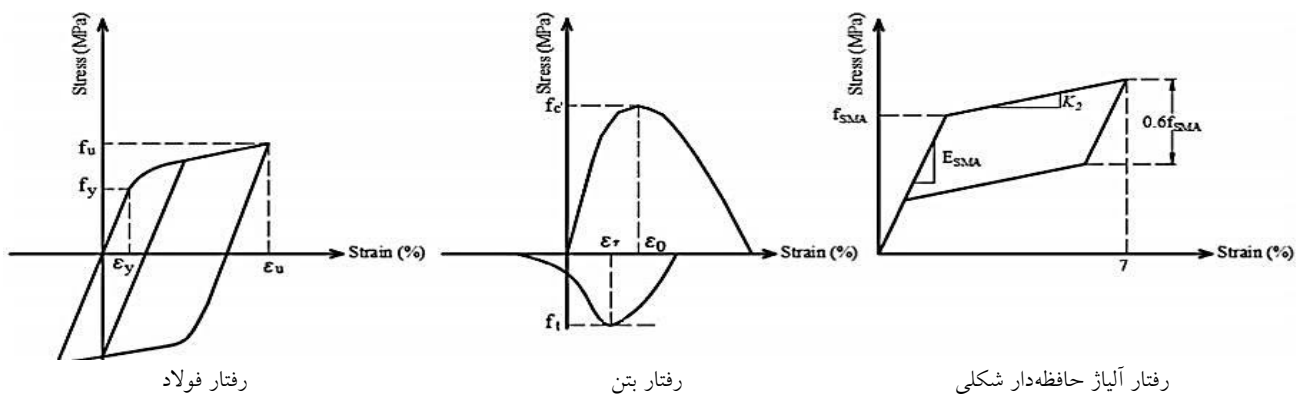


Fig. 5. Steel, Concrete and SMAs material behavior

شکل ۸. درستی آزمایشی نتایج مدل سازی با نتایج آزمایشگاه

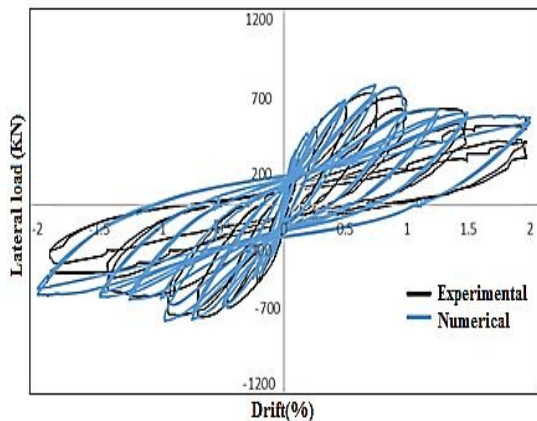


Fig. 8. Verification of the numerical analysis

۵- نتایج مدل تحلیلی

دیوار مورد بحث، ابتدا تحت تحلیل چرخه‌ای قرار گرفته است. در این تحلیل ابتدا دیوار برشی با آرماتورهای فولادی تحلیل می‌شود و سپس آرماتور گذاری حافظه‌دار شکلی به ترتیب در مفصل پلاستیک المان مرزی (SMAB)، جان دیوار (SMAW) و تیر پیوند (SMAC) انجام می‌شود تا مکان بهینه استفاده از این آلیاژها معرفی شود. چگونگی اتصال میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار به میلگردهای فولادی در شکل (۹) نمایش داده شده است در این شکل مفصل پلاستیک المان مرزی، دیوار میانی و تیر پیوند به ترتیب با LP1، LP2 و LP3 نام گذاری شده‌اند.

شکل ۶. دیوار مدل شده با المان SFIMVLEM

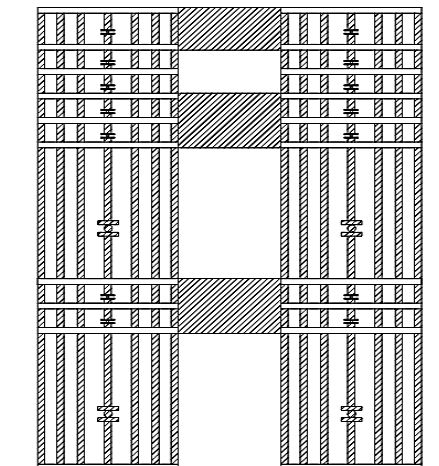


Fig. 6. Shear wall modeled by SFIMVLEM

شکل ۷. بار افقی اعمال شده به دیوار

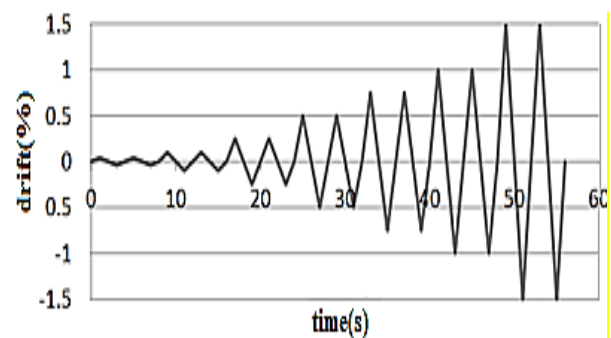


Fig. 7. Horizontal loading assign to shear wall

شکل ۹. چگونگی میلگرد گذاری دیواربرشی

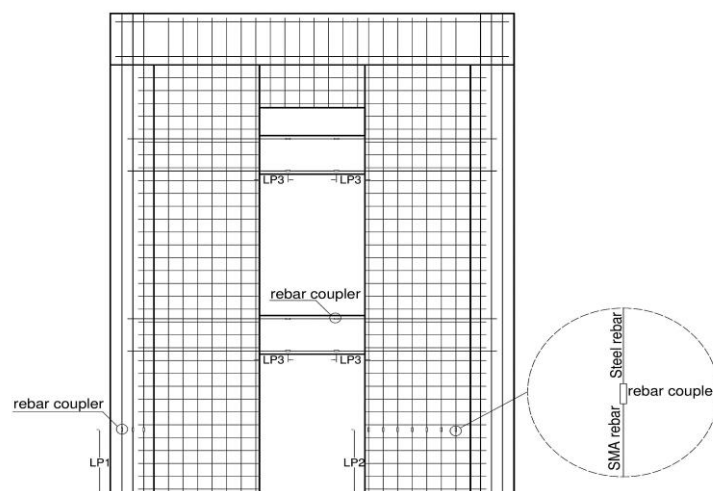


Fig. 9. Reinforcing of shear wal

شکل (۱۱) نشان داده شده است، استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در تیر پیوند باعث کمترین کاهش اتلاف انرژی در سازه شده است و پس از آن کمترین کاهش انرژی تلف‌شده مربوط به حالتی است که از این آلیاژها به ترتیب در جان دیوار و المان مرزی استفاده شود. شکل (۱۲) تاثیر آلیاژ حافظه‌دار شکلی را بر تغییر شکل ماندگار در سازه را ارائه می‌نماید. با توجه به نتایج ارائه شده در آن شکل، تمامی حالتی که در آن از آلیاژ حافظه‌دار شکلی به جای آرماتور فولادی استفاده شده است، دارای جابه‌جایی پسماند کمتری به ویژه در چرخه‌های بالاتر هستند. به‌طور کلی استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در المان مرزی، باعث ایجاد کمترین جابه‌جایی پسماند در سازه می‌شود و پس از آن استفاده از آلیاژ حافظه‌دار در جان دیوار و تیر پیوند بیشترین تاثیر را در کاهش جابه‌جایی پسماند دارند.

از آنجایی که هدف اصلی این مقاله، مقایسه تاثیر مقادیر مساوی آلیاژ حافظه‌دار و فولاد بر رفتار دیوار برشی است، پس از ضوابط طراحی برای جایگزین کردن آلیاژ حافظه‌دار به جای فولاد استفاده نشده است و دقیقاً به همان اندازه‌ای که فولاد از مفصل پلاستیک حذف می‌شود، به همان میزان آلیاژ حافظه‌دار جایگزین آن می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در تمامی نقاط دیوار برشی باعث کاهش سطح زیر نمودار و در نتیجه کاهش انرژی تلف‌شده دیوار خواهد شد که این امر به دلیل نمودار پرچمی شکل این آلیاژها و سطح زیر نمودار کمتر آن‌ها نسبت به فولاد است. در مورد جابه‌جایی پسماند نیز، تاثیر آلیاژهای حافظه‌دار در چرخه‌های بالایی بیش از چرخه‌های پایینی بوده و باعث کاهش جابه‌جایی پسماند خواهد شد. همان‌گونه که در

شکل ۱۰. نتایج حاصل از تحلیل چرخه‌ای

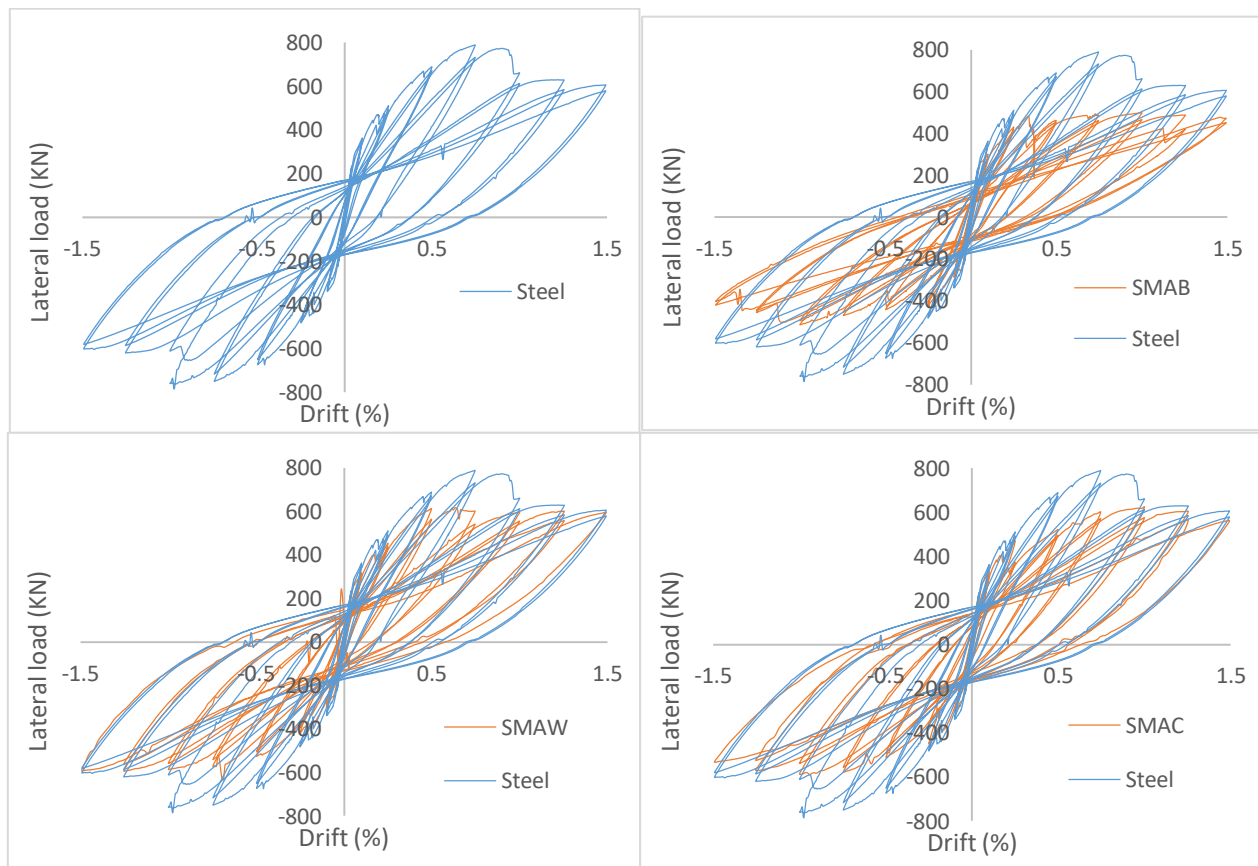


Fig. 10. Hysteresis analysis result

آلیاژهای حافظه‌دار است یعنی مکانی که با کمترین میزان مصرف آلیاژ حافظه‌دار شکلی در آن، باعث کمترین جابه‌جایی پسماند شود.

شکل ۱۳. تاثیر آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر توانایی اتلاف انرژی کل سازه

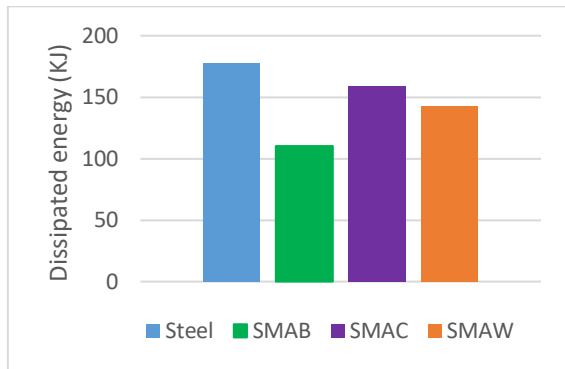


Fig. 13. Influence of SMA on energy dissipation

برای هر کدام از حالت‌های فوق از یک عدد بی‌بعد استفاده می‌شود. این عدد بی‌بعد برای حالت اول از نسبت تقسیم درصد کاهش جابه‌جایی پسماند چرخه آخر به درصد کاهش انرژی تلف‌شده کل به دست می‌آید. این عدد بی‌بعد هراندازه بزرگ‌تر باشد نشانگر مناسب‌تر بودن مکان استفاده از آلیاژ در سازه است. برای حالت دوم عدد بی‌بعد از نسبت تقسیم درصد کاهش جابه‌جایی پسماند بر درصد استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در دیوار برشی به دست می‌آید. در این حالت نیز هر چه عدد بی‌بعد بزرگ‌تر باشد مکان استفاده مناسب‌تر است. در جدول (۵)، حالت اول بهینگی یعنی بهینگی انرژی-جابه‌جایی پسماند بررسی شده است. با توجه به عدد بیشتر حالت استفاده از آلیاژ حافظه‌دار در تیر پیوند، از نظر بهینگی حالت اول، بهینه-ترین مکان از بین گزینه‌های موجود برای استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در دیوار برشی، تیر پیوند است و پس از آن المان مرزی و جان دیوار در درجات بعدی قرار دارند. حالت دوم بهینگی یعنی بهینگی در مصرف نیز در جدول (۶) بررسی شده است. با توجه به عدد بیشتر حالت استفاده از آلیاژ حافظه-

شکل ۱۱. تاثیر آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر توانایی اتلاف انرژی سازه

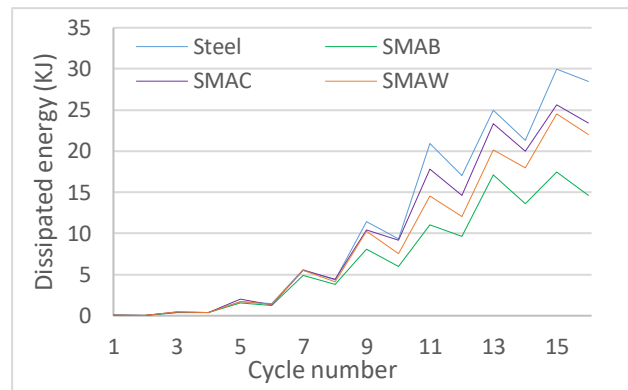


Fig. 11. Influence of SMA on energy dissipation ability

شکل ۱۲. تاثیر آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر تغییر شکل پسماند سازه

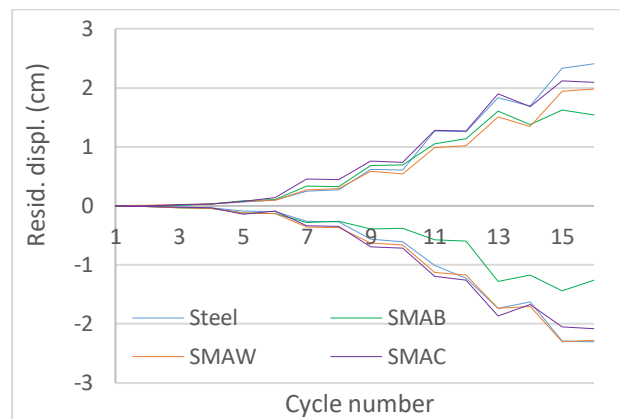


Fig. 12. Influence of SMA on residual displacement

همچنین همان‌گونه که در شکل (۱۳) نمایش داده شده است، در حالتی که سازه تنها با آرماتورهای فولادی مسلح شده باشد، بیشترین اتلاف انرژی کل را شاهد خواهیم بود. استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی به ترتیب در تیر پیوند، جان دیوار و المان مرزی، بعد از حالتی که کاملاً از آرماتور فولادی در سازه استفاده شود دارای بیشترین انرژی تلف‌شده کل در سازه هستند. مکان بهینه از بین مکان‌های موجود را می‌توان در دو حالت تعریف کرد. در حالت اول مکان بهینه مکانی است که استفاده از آلیاژ حافظه‌دار در آن باعث بیشترین اتلاف انرژی و در عین حال کمترین جابه‌جایی پسماند شود. حالت دوم بهینگی نیز مربوط به میزان استفاده از

قرار دارند. برای بررسی تاثیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر میزان شکل‌پذیری و ضریب رفتار سازه مورد بحث این مقاله، از تحلیل بارافزون استفاده شده است.

دار در جان دیوار، از نظر بهینگی حالت دوم یعنی کمترین جابه‌جایی پسماند با کمترین مصرف آلیاژ، بهینه‌ترین مکان از بین گزینه‌های موجود، مصرف آلیاژ حافظه‌دار در جان دیوار است و پس از آن المان مرزی و تیر پیوند در درجات بعدی

جدول ۵. ارزیابی حالت اول بهینگی

Model	Dissipated energy (KJ)	Residual displacement (cm)	Percentage of residual displacement reduction	Percentage of energy dissipation ability reduction	First case of optimization
Steel	178	2.40	-	-	-
SMAC	159	2.09	-13.2	-10.7	1.23
SMAB	110	1.54	-35.9	-38.2	0.94
SMAW	143	1.98	-17.7	-19.7	0.90

Table 5. Evaluation of first case of optimization

جدول ۶. ارزیابی حالت دوم بهینگی

Model	Volume of utilized SMA (cm ³)	Residual displacement (cm)	Percentage of residual displacement reduction	Percentage of utilized SMA	Second case of optimization
Steel	-	2.40	-	-	-
SMAC	2376	2.09	-13.2	0.36	37
SMAB	2721	1.54	-35.9	0.41	87
SMAW	463	1.98	-17.7	0.07	252

Table 6. Evaluation of second case of optimization

استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در دیوار یک عدد بی‌بعد به دست می‌آید که هراندازه این عدد بزرگ‌تر باشد بیانگر بهینه‌تر بودن مکان استفاده از آلیاژ در دیوار است. نتایج به دست آمده از تحلیل بارافزون سازه مورد بحث، در شکل (۱۴) و جدول (۷) ارائه شده است. می‌توان گفت استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در دیوار برشی برای همه حالات باعث افزایش شکل‌پذیری دیوار می‌شود که این امر به دلیل رفتار شکل‌پذیرتر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نسبت به فولاد است. با توجه به نتایج جدول (۷)، استفاده از این آلیاژها در المان مرزی باعث بیشترین افزایش در ضریب رفتار و شکل‌پذیری دیوار خواهد شد و پس‌از آن، قرارگیری آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به ترتیب در تیر پیوند و جان دیوار، بیشترین افزایش شکل‌پذیری را باعث می‌شود. از لحاظ بهینگی در مصرف آلیاژ، استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در جان دیوار برشی، به دلیل بزرگ‌تر بودن عدد بی‌بعد حاصل شده آن در جدول (۷)، بهینه‌ترین مکان در بین گزینه‌های موجود است و پس از آن به ترتیب المان مرزی

تاکنون پژوهشگران مختلفی برای محاسبه ضرایب رفتار، روش‌های متفاوتی را مورد استفاده قرار داده‌اند. این روش‌ها را با توجه به فرضیات اصلی آن‌ها می‌توان به دو گروه روش‌های اروپایی و روش‌های آمریکایی تقسیم‌بندی کرد. در این مقاله برای محاسبه ضریب رفتار از روش یوانگ استفاده می‌شود که یک روش آمریکایی محسوب می‌شود.

در تحلیل بارافزون مانند تحلیل چرخه‌ای، آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در مفصل پلاستیک المان مرزی (SMAB)، جان دیوار (SMAW) و تیر پیوند (SMAC) قرار داده می‌شوند و تاثیر آن بر ضریب رفتار سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پایان بهترین محل برای استفاده از این آلیاژها از لحاظ بهینگی در مصرف میزان آلیاژ معرفی می‌شود؛ مانند حالات قبل، بهینه‌ترین مکان برای استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در بین گزینه‌های موجود، مکانی است که با کمترین میزان استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی، بیشترین افزایش شکل‌پذیری را ناشی شود. بدین منظور از تقسیم درصد افزایش شکل‌پذیری بر درصد

و تیر پیوند بهینه‌ترین مکان‌ها هستند. افزایش ضریب رفتار سازه با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی باعث بالا رفتن هزینه‌های ساخت سازه خواهد شد اما بخش قابل توجهی از این

هزینه‌ها به دلیل کاهش نیروی زلزله اعمالی به سازه در فاز طراحی و در نتیجه آن کاهش ابعاد مقاطع سازه‌ای جبران خواهد شد.

شکل ۱۴. نتایج حاصل از تحلیل بارافزون

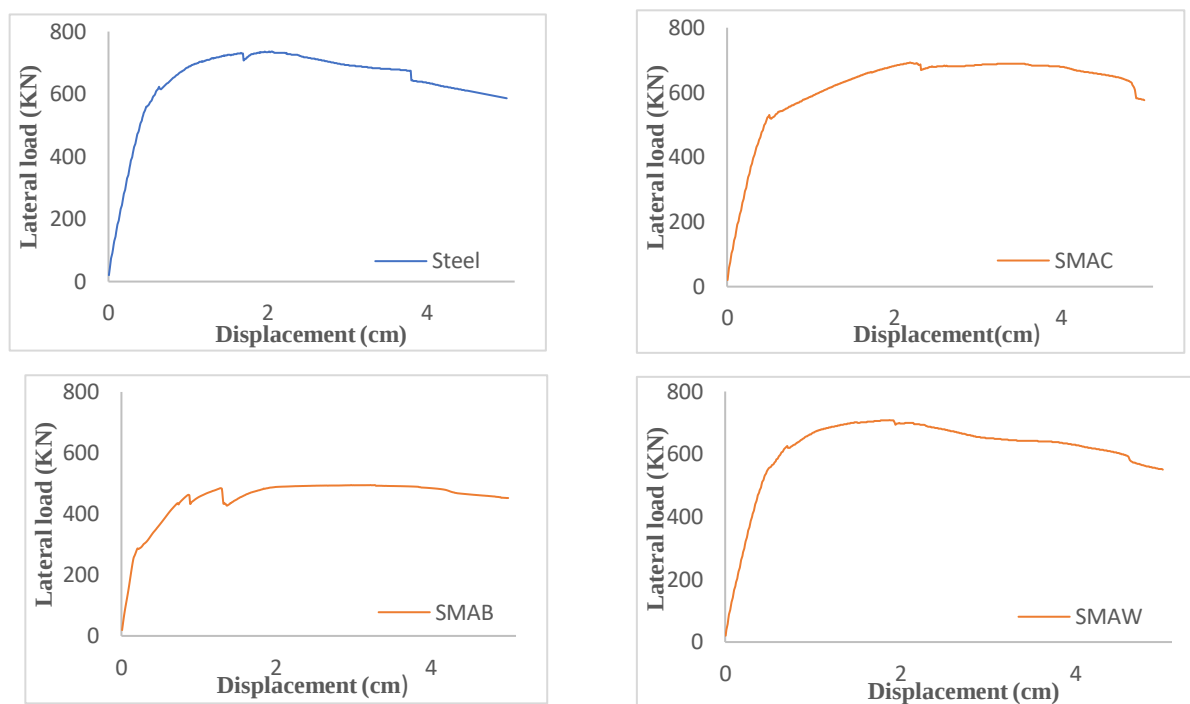


Fig. 14. Pushover analysis result

جدول ۷. تاثیر آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر ضریب رفتار سازه

Model	Volume of utilized SMA	Reduction factor	Percentage of reduction factor increasing	Percentage of utilized SMA	Second case of optimization
Steel	-	5.12	-	-	-
SMAC	2376 cm ³	6.15	20.2	0.36	56
SMAB	2721 cm ³	6.86	34.2	0.41	83
SMAW	463 cm ³	5.97	16.7	0.07	238

Table. 7. Influence of SMAs on reduction factor of shear wall

۶- نتیجه‌گیری

سبب بیشترین کاهش توانایی میرایی انرژی خواهد شد. بعد از المان مرزی، استفاده از این آلیاژها به ترتیب در جان دیوار و تیر پیوند باعث بیشترین کاهش توانایی میرایی انرژی می‌شوند. تغییر شکل پسماند، در چرخه‌های پایین‌تر تحلیل چرخه‌ای، در حالتی که از آلیاژ حافظه‌دار استفاده نشده باشد و سراسر میلگردها از جنس فولاد باشند از بقیه حالات کمتر است اما

با توجه به نمودار تنش کرنش پرچمی شکل آلیاژهای حافظه‌دار شکلی و سطح زیر نمودار اندک آن‌ها نسبت به سطح زیر نمودار تنش کرنش فولاد، در تمامی چرخه‌ها توانایی میرایی انرژی فولاد نسبت به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بیشتر است. استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در المان مرزی

References

۷- مراجع

- [1] Ghassemieh M., Rezapour M. and Sadeghi V. 2017 Effectiveness of the shape memory alloy reinforcement in concrete coupled shear walls. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28, 640-652.
- [2] Chang W.S. and Araki Y. 2016 Use of shape-memory alloys in construction: a critical review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, 169, 87-95.
- [3] Juhre D. and Halle T. 2018 Comparison of Biaxial Loading of Ferrous Based (Fe-based) Shape Memory Smart Materials with Linear and Non-linear Materials. *Current Smart Materials*, 3, 90-98.
- [4] Cladera A., Weber B., Leinenbach C., Czaderski C., Shahverdi M. and Motavalli M. 2018 Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: An overview. *Construction and building materials*, 63, 281-293.
- [5] Czaderski C., et al. 2015 Iron-based shape memory alloys (Fe-SMA) a new material for prestressing concrete structures. *SMAR2015 3rd Conference on Smart Monitoring Assessment and Rehabilitation of Civil Structures*, Antalya, Turkey.
- [6] Graesser E. and Cozzarelli F. 1991 Shape-memory alloys as new materials for aseismic isolation. *Journal of engineering mechanics*, 117, 2590-2608.
- [7] Enami K. and Hoshiya T. 1993 Development of high temperature shape memory materials. *International Journal of Materials and Product Technology*, 8, 361-370.
- [8] Sweeney S. and Hayes J. 1995. Shape memory alloy dampers for seismic rehabilitation of existing buildings. *Proceedings of 27th Joint Meeting on Wind and Seismic Effects*, 317-332.
- [9] Ohi K. 2001 Pseudo-dynamic earthquake response tests and cyclic loading tests on steel frames including pseudo-elastic elements. *Proc NSF-JSPS, US-Japan Seminar on Advanced Stability and Seismicity Concepts for Performance-Based Design of Steel and Composite Structures*.
- [10] Ghassemieh M., Mostafazadeh M., and Sadeh M.S. 2012. Seismic control of concrete shear wall using shape memory alloys. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23, 535-543.
- [11] Kari A., Ghassemieh M., and Badarloo B. 2019 Development and design of a new self-centering energy-dissipative brace for steel structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 30, 924-938.
- [12] Shahverdi M., Czaderski C., and Motavalli M. 2016 Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 112, 28-

هرچقدر تعداد چرخه‌ها بیشتر می‌شود استفاده از آلیاژ حافظه‌دار در مکان‌های مختلف دیوار سبب کاهش تغییر شکل‌های پسماند می‌شود. اگر چرخه‌های پایانی را مدنظر قرار دهیم، استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در المان‌های مرزی سبب بیشترین کاهش تغییر شکل پسماند در دیوار برشی می‌شود. بعد از المان مرزی استفاده از آلیاژ در تیر پیوند و جان دیوار تقریباً به یک اندازه سبب کاهش تغییر شکل خواهند شد.

چنانچه بهینگی مصرف آلیاژهای حافظه‌دار شکلی ا مدنظر قرار گیرد، استفاده از این آلیاژها در دیوار میانی سبب بیشترین کاهش تغییر شکل پسماند به ازای کمترین میزان مصرف می‌شود. بعد از دیوار میانی استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در المان مرزی و سپس در تیر پیوند بهینه‌ترین مکان‌های مورد استفاده در بین گزینه‌های موجود هستند. از نظر بهینگی انرژی جابه‌جایی پسماند، بهینه‌ترین مکان در بین گزینه‌های موجود برای استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در دیوار برشی، تیر پیوند است و پس از آن المان مرزی و جان دیوار در درجات بعدی قرار دارند.

استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در دیوار به دلیل رفتار شکل‌پذیرشان باعث افزایش شکل‌پذیری و ضریب رفتار سازه می‌شود. استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به ترتیب در المان مرزی، تیر پیوند و جان دیوار باعث بیشترین افزایش ضریب رفتار در سازه شده‌اند. از نظر بهینگی مصرف آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیز به ترتیب جان دیوار، المان مرزی و تیر پیوند بهینه‌ترین مکان‌ها در بین گزینه‌های موجود برای استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی هستند.

با در نظر گرفتن تمامی حالات بهینگی، بهترین محل برای استفاده از آلیاژ حافظه‌دار برای اینکه دیوار بتواند هم انرژی مناسبی را اتلاف نماید و هم شکل‌پذیری و قابلیت برگشت-پذیری مناسبی را نسبت به میزان آلیاژ مصرفی از خود نشان دهد، دیوار میانی است.

- memory alloys in civil structures. *Journal of Building Engineering*, 22, 22-32.
- [25] Halahla A., Al-Gadhib A., Rahman M., and Baluch M. 2013 Shape Memory Alloys (SMAs) for Civil Engineering Application-State of The Art. 9th International concrete conference and exhibition, Bahrain.
- [26] DesRoches R. and Smith B. 2004 Shape memory alloys in seismic resistant design and retrofit: a critical review of their potential and limitations. *Journal of earthquake engineering*, 8, 415-429.
- [27] Omori T. , et al. 2011 Superelastic effect in polycrystalline ferrous alloys. *Science*, 333, 68-71.
- [28] Wang J.Y., Sakashita M., Kono S., Tanaka H., and Lou W.J. 2010 Behavior of reinforced concrete structural walls with various opening locations: Experiments and macro model. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 11, 202-211.
- [29] Calìo I. and Pantò B. 2014 A macro-element modelling approach of Infilled Frame Structures. *Computers and Structures*, 143, 91-107.
- [30] Kolozvari K., Orakcal K., and Wallace J.W. 2018 New Opensees models for simulating nonlinear flexural and coupled shear-flexural behavior of RC walls and columns. *Computers and Structures*, 196, 246-262.
- [31] Orakcal K., Wallace J.W., and Conte J.P. 2004 Flexural modeling of reinforced concrete walls-model attributes. *ACI Structural Journal*. 101, 688-698.
- [32] Kolozvari K., Orakcal K., and Wallace J.W. 2015 Modeling of cyclic shear-flexure interaction in reinforced concrete structural walls. I: Theory. *Journal of Structural Engineering*, 141, 04014135.
- [33] Kolozvari K., Tran T.A., Orakcal K., and Wallace J.W. 2015 Modeling of cyclic shear-flexure interaction in reinforced concrete structural walls. II: Experimental validation. *Journal of Structural Engineering*, 141, 04014136.
- [34] Menegotto M., and Pinto P. 1973 Method of analysis of cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under normal force and bending. *Preliminary Report IABSE*, 15-22.
- [35] Mander J., and Park R. 1988 Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114, 1804-26
- [36] Rezapour M. and Ghassemieh M. 2018 Macroscopic modelling of coupled concrete shear wall. *Engineering Structures*, 169, 37-54.
- 38.
- [13] Czaderski C., Shahverdi M., R. Brönnimann, C. Leinenbach, and Motavalli M. 2014 Feasibility of iron-based shape memory alloy strips for prestressed strengthening of concrete structures. *Construction and Building Materials*, 56, 94-105.
- [14] Soroushian P., Ostowari K., Nossoni A., and Chowdhury H. 2001 Repair and strengthening of concrete structures through application of corrective posttensioning forces with shape memory alloys. *Transportation Research Record*, 1770, 20-26.
- [15] Aryan H., and Ghassemieh M. 2017 A superelastic protective technique for mitigating the effects of vertical and horizontal seismic excitations on highway bridges. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28, 1533-1552.
- [16] Aryan H., and Ghassemieh M. 2014 Mitigation of vertical and horizontal seismic excitations on bridges utilizing shape memory alloy system. *Advanced Materials Research*, 831, 90-94.
- [17] Aryan H., and Ghassemieh M. 2015 Seismic enhancement of multi-span continuous bridges subjected to three-directional excitations. *Smart Materials and Structures*, 24, 045030.
- [18] Aryan H., and Ghassemieh M. 2019 Numerical Assessment of Vertical Ground Motion Effects on Highway Bridges. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 47, 790-800.
- [19] Abbass A., Attarnejad R., and Ghassemieh M. 2020 Seismic Assessment of RC Bridge Columns Retrofitted with Near-Surface Mounted Shape Memory Alloy Technique. *Materials*, 13, 1701, 1-24.
- [20] Abouali S., Shahverdi M., Ghassemieh M., and Motavalli M. 2019 Nonlinear simulation of reinforced concrete beams retrofitted by near-surface mounted iron-based shape memory alloys. *Engineering structures*, 187, 133-148.
- [21] Dolatabadi N., Shahverdi M., Ghassemieh M., and Motavalli M. 2020 RC Structures Strengthened by an Iron-Based Shape Memory Alloy Embedded in a Shotcrete Layer—Nonlinear Finite Element Modeling. *Materials*, 13, 5504, 1-25.
- [22] Speer J., Matlock D., De Cooman B., and Schroth J. 2003 Carbon partitioning into austenite after martensite transformation. *Acta materialia*, 51, 2611-2622.
- [23] Shahverdi M., Michels J., Czaderski C., Arabi-Hashemi A., and Motavalli M. 2017 Iron-based shape memory alloy strips, part 1: characterization and material behavior. *SMAR proceedings. Proceedings of SMAR 2017*. Fourth conference on smart monitoring, assessment and rehabilitation of civil structures.
- [24] Alaneme K.K., Okotete E.A., and Anaele J.U. 2019 Structural vibration mitigation—a concise review of the capabilities and applications of Cu and Fe based shape

Influence of the Fe-based shape memory alloys on concrete shear wall with symmetrical openings

H. Nasiri¹, M. Ghassemieh^{2*}

1- MS Graduate in structural Engineering, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

*m.ghassemieh@ut.ac.ir

Abstract

Seismic loading in seismic prone countries is very important and the lack of enough attention can make irreparable damages to structures and non-structural elements. Dissipating earthquake energy just by using elastic capacity of structure will increase the dimension and weight of structural elements such as column, beam, walls; and therefore the cost of building will increase. Incoming seismic energy should be dissipated in plastic process and in this process, structure must remain stable. Shear wall is widely used because of its suitable behavior against seismic loading and good ability of energy dissipation. Sometimes it is inevitable to avoid openings in shear walls due to architectural considerations. Providing enough ductility in these shear walls is a difficult job because of stress concentration around of voids. The other problem of using shear walls is plastic deformations that make the structures useless. One way of improving ductility and self-centering ability of shear walls is using smart materials. Shape memory alloys are one of the newest smart materials that have two important behaviors; mainly known as memory effect and superelasticity. Removing the residual deflection after unloading of elements made by shape memory alloys by heating is called memory effect. Superelasticity in SMAs results in returning the elements to their initial shape after unloading without having any residual displacement. Good corrosion resistance, good fatigue behavior and weldability are the other positive behaviors of shape memory alloys. In this paper the improvement of the shear walls ductility and self-centering ability with using shape memory alloys in superelastic phase is investigated. Shape memory alloys can withstand up to seven percent of strain without any residual deformation.

In this paper shear walls modeled by shear-flexure interaction multi-vertical-line-element-model (SFI-MVLEM). This model was implemented in the Open System for Earthquake Engineering software (OpenSees). Considering interaction between shear and flexural response in shear walls has made this element superior. Superelastic reinforcement bars were embedded in plastic hinge of boundary elements, coupled beam and walls web separately. Shear wall modeled by using SMA in boundary element, coupled beam and walls web called SMAB, SMAC and SMAW respectively. To examine the effects of these alloys on energy dissipation capacity and self-centering ability of the shear walls, structure were evaluated in cyclic analysis. Place of using SMAs on shear wall in very important and can influence widely on shear wall so most optimized place of using SMAs in shear wall should recognized. Two case of optimization considered in this analyze. In first one, best place is a place that using SMAs on it causes minimum energy dissipation reduction and maximum residual displacement removing. In second one, best place is the place that causes maximum residual displacement removing with minimum usage of SMAs. In order to find the influence of SMAs on ductility of shear wall, pushover analysis was used. Using SMAs in boundary elements of shear walls made maximum increasing in ductility of shear wall but the best place for using SMAs for optimization of usage of SMAs is walls web. Based on the results, with using shape memory alloys, ductility of shear walls was increased and its residual deformation and energy dissipation capacity was decreased. The best place of using SMAs in shear wall is coupled beam for optimization of energy dissipation and residual displacement and for optimization SMA usage is walls web.

Keywords: Shape memory alloys, Reinforced concrete shear wall, self-centering, ductility.