رویکردهای نوین در مهندسی عمران
ISSN ONLINE: 2588-7122- ISSN PRINT: 2588-6886 ، دوره پنجم، شماره ۳، ۱۴۰۰، صفحه: ۳۸- ۵۴

بررسی رفتار دیوار برشی فولادی تقویت شده با SMA برای ایجاد حرکت گهواره‌ای

لیلا حسین زاده*[۱]، محمد افشاری[۲]

[۱] استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران (l.hosseinzadeh@iaut.ac.ir)

[۲] کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳)

چکیده

آلیاژهای حافظه دارشکلی به علت دارا بودن رفتارهای ویژه مانند رفتار سوپرالاستیک (بازیابی کامل کرنش حین بارگذاری و باربرداری به شکل یک منحنی هیسترزیس) و رفتار حافظه داری (بازیابی کرنش در حین حرارت دادن در اثر استحاله فازی از فاز پایدار در دمای پایین به فاز پایدار در دمای بالا) در دهه اخیر مورد توجه محققین قرا گرفته است. این مواد علاوه بر رفتارهای فوق الذکر دارای خصوصیات مناسب دیگری نیز مانند مقاومت بالا در برابر خستگی و خوردگی، پایداری رفتارتنش-کرنش و قابلیت استهلاک انرژی می‌باشند. یکی از راهکارهای هدایت آسیب در سازه و کاهش نیازهای لرزه‌ای در آن بکارگیری سیستم های گهوارهای است. در این سیستم‌ها حرکت نسبی عمدتا بین پای ستونها و پی متناظر آنها رخ می‌دهد که در آن مکان‌ها، جاذبهای انرژی انجام می‌گیرند. در حرکت گهواره‌ای بدنه سازه در حد الاستیک تغییرشکل داده و تقریبا به صورت جسم صلب حرکت می‌نماید و پس از زلزله وزن ساختمان سبب می‌شود که سازه به محل اولیه خود بازگردد.

کلمات کلیدی

آلیاژهای حافظه دار شکلی، رفتار حافظه داری، سیستم گهواره‌ای، دیوار برشی فولادی.

رویکردهای نوین در مهندسی عمران
ISSN ONLINE: 2588-7122- ISSN PRINT: 2588-6886 ، دوره پنجم، شماره ۳، ۱۴۰۰، صفحه: ۳۸- ۵۴

Investigation of the behavior of SMA-Reinforced Steel Shear Wall to Create Rocking Motion

Leila Hosseinzadeh [1*], Mohammad Afshari [2]

[1] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran (l.hosseinzadeh@iaut.ac.ir)*

[2] M.Sc. student, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

(Date of received: 20/07/2021, Date of accepted: 04/12/2021)

ABSTRACT

Deformed memory alloys due to special behaviors such as superelastic behavior (complete recovery of strain during loading and unloading in the form of a hysteresis curve) and memory behavior (recovery of strain during heating due to phase transformation from stable phase to low temperature to stable phase At high temperatures) has attracted the attention of researchers in the last decade. In addition to the above behaviors, these materials have other suitable properties such as high resistance to fatigue and corrosion, stability of its behavior-strain and energy dissipation ability. One of the ways to manage damage in the structure and reduce seismic needs is to use rocking systems. In these systems, relative motion occurs mainly between the legs of the columns and their corresponding foundations, where energy absorbers are made. In the rocking motion of the body, the structure deforms to an elastic level and moves almost as a rigid body, and after the earthquake, the weight of the building causes the structure to return to its original place.

Keywords:

Shaped memory alloys, Memory behavior, Cradle system, Steel shear wall.

۱- مقدمه

سیستم‌های هوشمند در مهندسی عمران سیستم هایی هستند که به طور خودکار خصوصیات سازه را در پاسخ به بار یا تحریک خارجی تنظیم می کنند و باعث افزایش عمر مفید سازه و همچنین ایمن تر شدن آن خواهند شد. یک تکنولوژی مهم در این راستا مصالح هوشمند هستند که در حوزه عمران می توانند به صورت فعال، نیمه فعال و غیرفعال در کاهش آسیب‌های ناشی از عوامل محیطی و همچنین زلزله تقسیم بندی شوند. آلیاژهای حافظه دارشکلی به علت دارا بودن رفتارهای ویژه مانند رفتار سوپرالاستیک (بازیابی کامل کرنش حین بارگذاری و باربرداری به شکل یک منحنی هیسترزیس) و رفتار حافظه داری (بازیابی کرنش در حین حرارت دادن در اثر استحاله فازی از فاز پایدار در دمای پایین به فاز پایدار در دمای بالا) در دهه اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. این مواد علاوه بر رفتارهای فوق الذکر دارای خصوصیات مناسب دیگری نیز مانند مقاومت بالا در برابر خستگی و خوردگی، پایداری رفتارتنش-کرنش و قابلیت استهلاک انرژی می باشند.یکی از راهکارهای هدایت آسیب در سازه و کاهش نیازهای لرزه‌ای در آن بکارگیری سیستم های گهواره‌ای است. در این سیستم ها حرکت نسبی عمدتا بین پای ستونها و پی متناظر آنها رخ می دهد که در آن مکان ها، جاذبه ای انرژی انجام می گیرند. در حرکت گهواره‌ای بدنه سازه در حد الاستیک تغییرشکل داده و تقریبا به صورت جسم صلب حرکت می نماید و پس از زلزله وزن ساختمان سبب می شود که سازه به محل اولیه خود باز گردد. در سال های اخیر طرح و توسعه سیستم های ساختمانی لرزه ای تعمیرپذیر مورد توجه قرار گرفته است. این طرح بر این ایده استوار است که ساختمان به نحوی طراحی و اجرا شود که به زمین کاملا نچسبیده باشد و به هنگام زلزله همانند گهواره ای حرکت کند در این صورت انتظار می رود ساختمان حرکت های وارد شده را تحمل کرده و خسارت های زلزله عموما در نقاط از پیش تعیین شده و به سادگی قابل تعمیر در ساختمان، متمرکز شوند. در این پژوهش حرکت گهواره ای دیوار برشی فولادی با تغییر در اتصال پای ستون و استفاده از آلیاژهای حافظه دار SMA مورد بررسی قرار می گیرد. از خاصیت حافظه شکلی می توان برای مقاوم سازی سازه‌های موجود و از SMA فرا ارتجاعی برای کنترل ارتعاشات سازه های جدید استفاده نمود. اتصالات تیر به ستون و ستون به پی از قسمت‌های آسیب پذیر سازه‌ها در هنگام زلزله می‌باشند. با استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی می توان اتصالاتی را طراحی کرد که هم ظرفیت استهلاک انرژی بالایی داشته باشند و هم تغییر شکل های پسماند در آن ها ایجاد نگردد. کشف خاصیت حافظه شکلی برای اولین بار به طور تصادفی توسط هئیت مدیره لابراتوار اسلحه سازی نیروی دریایی آمریکا صورت گرفت. در سال ۱۹۳۲، اولاندر سوئدی برای اولین بار رفتار فوق ارتجاعی را در Au-Cd کشف کرد. در دهه ۱۹۳۰، آلیاژهای حافظه دار شکلی به عنوان مواد هوشمند مطرح گردیدند. در سال ۱۹۵۱، چانگ و رد در همین آلیاژ تبدیل فاز برگشت پذیر را کشف کردند که اولین تبدیل فاز ثبت شده می باشد. در سال ۱۹۶۳، بوهلر و همکاران اثر حافظه شکلی را در آلیاژ نیکل-تیتانیوم کشف کرده و این آلیاژ را نیتینول نامیدند. تامای و همکاران برای اتصال ستون به پی روشی را پیشنهاد کردند که در آن از میل مهارهای SMA استفاده می شود. نتایج آزمایشگاهی عملکرد مطلوب این اتصال را نشان می دهد. درمطالعات ماء و همکاران یک نوع اتصال ورق انتهایی نیمه گیردار بر پایه نایتینول فرا ارتجاعی پیشنهاد شد. ورق انتهایی مورد نظر دارای پیچ هایی از جنس نایتینول بود که به بال ستون متصل می شدند. دو مدل از این اتصال متداول و اتصال از جنس نایتینول بررسی و مقایسه شدند. در اتصال متداول، استهلاک انرژی با تشکیل مفصل پلاستیک در تیر صورت می گیرد که در نتیجه باعث به جا ماندن تغییر شکل های ماندگار زیاد می شود. اما استفاده از اتصال مجهز به آلیاژهای حافظه دار شکلی باعث ایجاد تغییر شکل های ماندگار زیادی نمی‌شود. در دانشگاه Stanford آمریکا، با هدف دستیابی به یک الگوی هندسی مناسب برای فیوزهای استهلاک انرژی الگوهای مختلفی از صفحات فولادی، طراحی شد و مورد آزمایش قرار گرفت و صفحات با الگوی پروانه ای به علت شکل پذیری و قابلیت جذب انرژی بیشتر در کنار متحمل شدن آسیب های کمتر به عنوان المان های مناسب برای جذب انرژی در سیستم با عملکرد گهواره ای معرفی شدند. پایه های ستونی فولادی نشان دهنده اتصالات

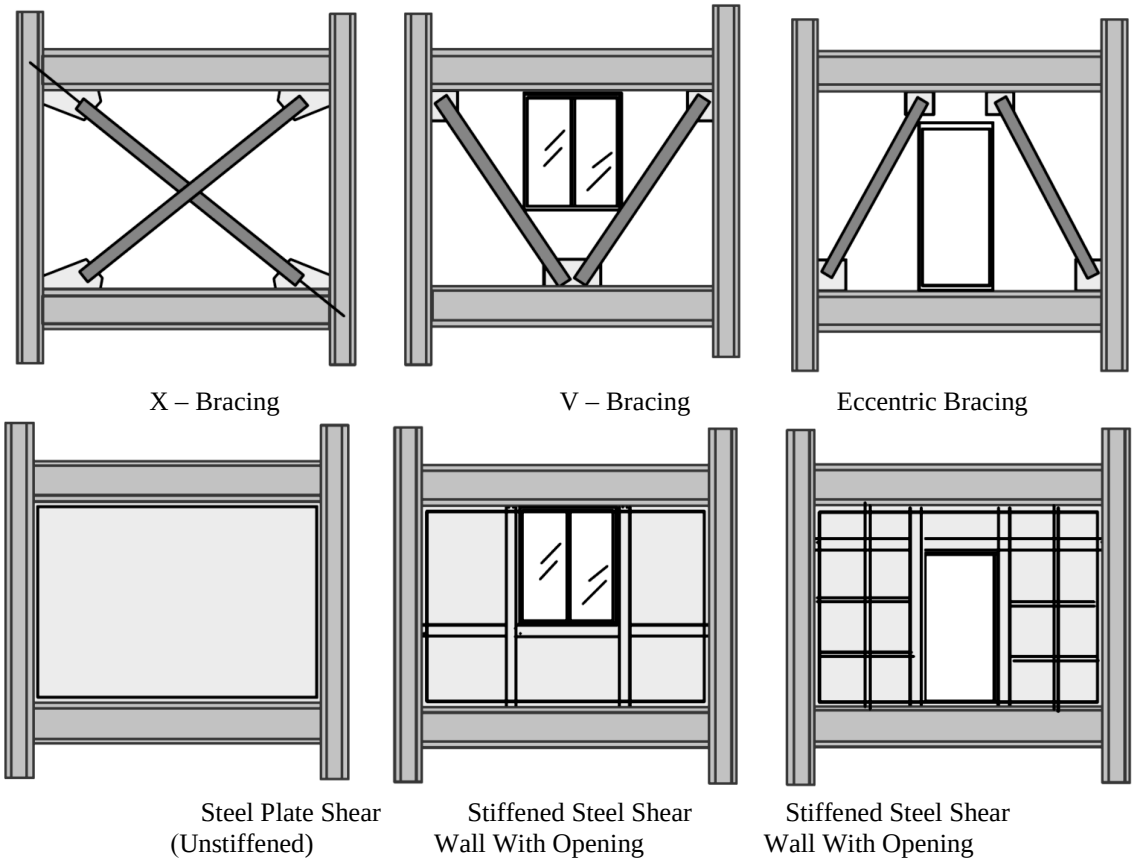
اساسی بین سازه و پی هستند. این پایه ها مهمترین انواع اتصالات سازه ای هستند که بارهای عمودی و جانبی را از کل سازه به پی ها منتقل می کنند. با این حال ، در مقایسه با سایر اتصالات سازه ای، توجه نسبتاً محدود تحقیقاتی را دریافت کرده اند. یک اتصال پایه ستون فولادی معمولی از یک صفحه فلزی در معرض پشتیبانی از گروت بدون آرماتور است و با استفاده از پیچ و مهره های فلزی به پایه بتونی متصل شده است. چنین اتصالات پایه، معمولاً در معرض ترکیبی از نیرو های خمشی و فشاری و برشی قرار دارند. پایه های ستونی به طور معمول به عنوان اتصالات پایه ثابت / صلب طراحی و تفصیل می شوند که امکان ایجاد لولا پلاستیک در ستون ها را فراهم می آورد. چنین مفهوم طراحی ممکن است منجر به تغییر شکل غیرالاستیک و آسیب پذیر در زمین لرزه های قوی شود. مشاهدات انجام شده توسط Tremblay، Nakashima و Midorikawa پس از زلزله های Northridge 1994، ۱۹۹۵ Kobe و ۲۰۱۱ Tohoku ، به ترتیب ، حساسیت اتصالات پایه ستونی را در برابر خسارت های غیر قابل جبران لرزه ای از جمله شکستگی جوش، شکستگی میله لنگر / شکستگی ، و خرد کردن بتن / گروت پایه تأیید کرد.با توجه به ویژگی های ذاتی آلیاژهای حافظه دار شکلی و تناسب آنها در استفاده در بخش کنترل سازه مطالعات زیادی در خصوص استفاده از این آلیاژها در سازه های عمرانی انجام شده است، که از جمله آن می توان به سیستم های جداگر لرزه ای، میراگرهای انرژی در ساختمان ها، میراگرهای انرژی در پل ها، مقاوم سازی سازه های بنایی و تاریخی، استفاده بصورت میلگرد در سازه های بتنی، اتصالات سازه ای و استفاده در سد ها اشاره کرد [۲]. شکوری قانع در سال ۱۳۹۵، به مطالعه تحلیلی و آزمایشگاه کنترل کمانش فشاری به کمک فلزات هوشمند تحت بارهای رفت و برگشت پرداختند. مطابق نتایج این تحقیق اجرای یک عضر فشاری مسلح به آلیاژهای فوق الاستیک حافظه دار می تواند راهکاری مناسب و کاربردی برای کنترل کمانش اعضای فشاری استفاده شده در سازه های فولادی باشد و در برابر نیروهای زلزله و مخرب دیگر مقاومت و عملکرد مناسبی را از خود نشان دهد. [۳]. Auricchio و همکاران در سال ۲۰۰۹، به بررسی عملکرد لرزه ای قاب های فولادی با مهاربند های از جنس نایتینول پرداختند. مدلسازی های عددی صورت گرفته برای ساختار مختلف مهاربندی با دو نوع مهاربند کمانش ناپذیر معمولی و مهاربند از جنس آلیاژ حافظه دار شکلی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق رفتار محوری برای مهاربندهای از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی انتخاب شد. نتایج بیانگر افزایش میرایی و کاهش دریفت طبقات در صورت استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی بعنوان مهاربند های سازه ای می باشد [۴] MacComick و همکاران در سال ۲۰۰۷، به ارزیابی لرزه ای قاب های فولادی مهاربندی شده همگرا به وسیله آلیاژهای حافظه دار شکلی پرداختند. برای این منظور عملکرد لرزه ای مهاربندی های ساخته شده به وسیله آلیاژهای حافظه دار شکلی با سیستم سنتی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج بیانگر بهبود دریفت بین طبقات و جابجایی های ماندگار در سازه ای با مهاربندی توسط آلیاژهای حافظه دار شکلی می باشد [۵]

عسگریان و همکاران در سال ۲۰۱۱، به بررسی استفاده از مهاربندهای سازه ای از نوع آلیاژ حافظه دار شکلی با انواع سیستم مهاربندی متداول در عملکرد لرزه ای سازه های فولادی مهاربندی شده پرداختند. برای این منظور تحلیل های عددی با فرض رفتار غیر خطی برای مصالح، به مقایسه استفاده از مهاربندهای از جنس آلیاژ حافظه دار شکلی و مهاربندهای کمانش ناپذیر معمولی پرداخته شد. نتایج بیانگر بهبود عملکرد دینامیکی سازه در صورت استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی می باشد [۶] Miller و همکاران در سال ۲۰۱۲، به بررسی آزمایشگاهی کاربرد آلیاژهای حافظه دار شکلی در بهبود عملکرد بادبندهای کمانش ناپذیر پرداختند. مطابق نتایج حاصله استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی سبب ایجاد پاسخ همستریسیز پایدار، خاصیت برگشت پذیری و توانایی تغییر شکل بیشتر بادبند های کمانش ناپذیر و در نهایت جذب انرژی بیشتر و بهبود مزح عملکردی سازه می شود [۷] هوشمند و همکاران در سال ۲۰۱۹، به بررسی بهسازی لرزه ای سازه های ساختمانی با استفاده از آلیاژهای فولادی شکلی پرداختند. با توجه به قیمت بالای این نوع آلیاژ های آنها در صد مختلفی از این آلیاژها را با ترکیب فولاد در عصر مهاربندی همگرا توسط مدل سازی المان محدود مورد ارزیابی قرار دادند و با مهاربندی های فولادی مقایسه کردند. پس از بارگذاری لرزه ای به بررسی هزینه

بهینه استفاده از این آلیاژها در بهسازی لرزه ای سازه های فولادی با مهاربند همگرا پرداختند [۸] . عبدلی و همکاران در سال ۱۳۹۶در یک تحقیق به بررسی کاربردهای آلیاژ حافظه دار هوشمندSMA در بهبود عملکرد لرزه ای سازه ها پرداختند:امروزه استفاده از مصالح نوین برای بهبود عملکرد لرزه ای سازه ها بیش از پیش مورد توجه محققین قرارگرفته است. در سه دهه اخیر وقوع زلزله های متعدد و آسیبهای ناشی از آن بر سازه ها موجب شده تا برای کاهش هزینه های تعمیر و بازگردانی سازه به عملکرد مطلوب خود از روش های موثرتری بهره جویند. استفاده از آلیاژهای حافظه دار هوشمند (SMA) که دارای ویژگی سوپر الاستیک و خاصیت برگشت پذیری میباشند به عنوان یک راه کار موثر، مطلوب میباشد. این آلیاژها دارای ظرفیت شکل پذیری و جذب انرژی بسیار مطلوبی هستند به طوری که میتوانند اثرات ناشی از تنش های پسماند را به خوبی جذب کرده و مانع از ایجاد خسارت در سازه شوند. در این تحقیق سعی شده تا به بررسی عملکرد این مصالح در بخشهای مختلف سازه ای اعم از اتصالات، تیرها و ستون ها و همچنین سیستم های استهلاک انرژی از قبیل میراگرها و جدا سازهای لرزه ای پرداخته شود. از این مصالح علاوه بر ساختمان های متداول در ساخت سازهای غیر ساختمانی از جمله پل ها و دکل ها نیز میتوان استفاده نمود. تحقیقات نشان داده است که بهره گیری از این مصالح در طراحی سازه های جدید و بهسازی ساختمان های موجود در بلند مدت میتواند باعث کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری شود [۹].

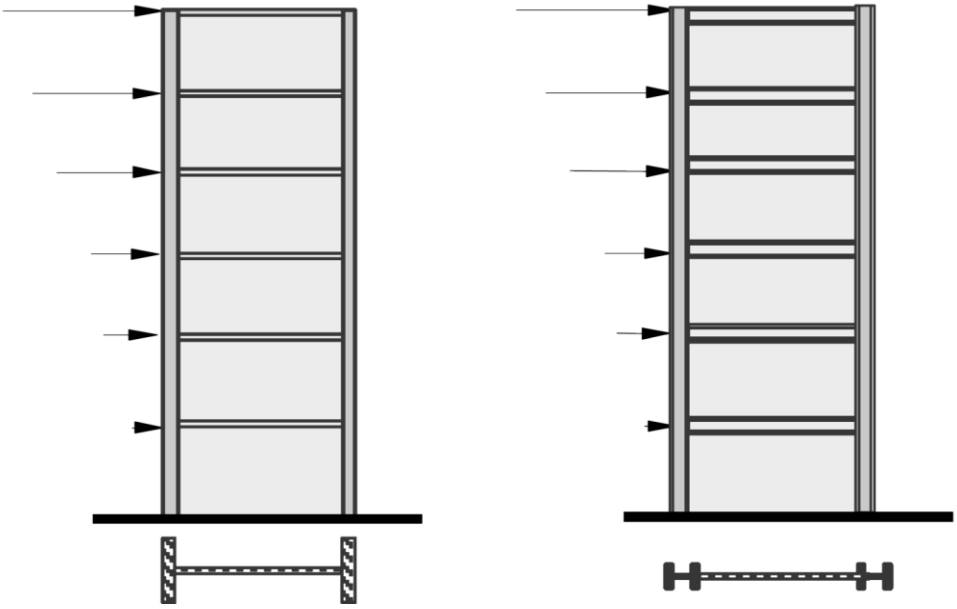
۲- معرفی سیستم

دیوار های برشی فولادی جایگزینی سریعتر به لحاظ اجرائی و مطمئن تر به لحاظ مقاومت و رفتار برای دیوارهای برشی بتنی می باشند. همچنین سیستم مذکور از همه خصوصیات سیستم های مهاربند های همگرا و مهاربندی های خارج از مرکز، بهره مند بوده و در بسیاری از موارد بهتر عمل می نماید. دیوار برشی فولادی دارای خواصی است که اساساً در مقاومت در برابر بار های لرزه‌ای بسیار سودمند است از قبیل: شکل پذیری بسیار زیاد، کاهش مقاومت بسیار کم تحت بار های چرخه‌ای، سختی اولیه بالا و هنگامی که به همراه قاب خمشی به کار می رود دارای نا معینی بسیار بالا و دارای جذب انرژی قابل توجه می‌باشد. استفاده از اتصالات صلب باعث کم شدن مقدار پینچینگ در منحنی هیسترزیس می‌شود. سیستم از نظر سختی برشی از سخت ترین سیستم های مهاربندی که **X** شکل می‌باشد، سخت تر بوده و با توجه به امکان ایجاد بازشو در هر نقطه از آن، کارایی همه سیستم های مهاربندی را از این نظر دارا می‌باشد. همچنین رفتار سیستم در محیط پلاستیک و میزان جذب انرژی آن نسبت به سیستم های مهاربندی بهتر است. شکل ۱ مقایسه دیوار و انواع مهاربندها را نشان می دهد.



شکل ۱: مقایسه دیوار و انواع مهار بند [۱۰].

در سیستم دیوارهای برشی فولادی با توجه به گستردگی مصالح و اتصالات، تعدیل تنش‌ها به مراتب بهتر از سیستم‌های مقاوم دیگر در برابر بارهای جانبی مانند قاب ها و انواع مهاربندها که معمولاً در آنها مصالح به صورت دسته شده و اتصالات متمرکز می‌باشند، صورت گرفته و رفتار سیستم به خصوص در محیط پلاستیک مناسب تر می باشد. در این سیستم، با استفاده از ورق های نازک فولادی می توان از پدیده پس کمانش مشابه تیر ورق ها، بدون هیچ خللی در پایداری استفاده نمود. آزمایش های متعدد نشان می دهد منحنی های هیسترزیس دیوارهای مذکور تحت اثر بارهای رفت و برگشتی با ورق های نازک و یا با ورق های تقویت شده، کاملا پایدار بوده و میزان جذب انرژی در آنها بالا می باشد. تفاوت اصلی بین دیوار و تیر ورق (شکل ۲)، تأثیر بسیار مهم المان های مرزی در دیوار برشی نسبت به بال ها و سخت کننده ها در تیر ورق است. در دیوار عناصر مرزی طوری طراحی می شوند که به ورق جان اجازه جاری شدن در کل چشمه را بدهند، در حالی که در تیرورق انتظار نمی رود که بالها سختی مورد نیاز برای رسیدن جان به تنش جاری شدن در کل عمق تیر ورق را ایجاد کنند.



شکل ۲: دیوار برشی فولادی و تیر ورق [۱۰].

در حین اعمال بارهای چرخه‌ای بر روی قاب ممکن است سه مرحله رخ دهد:

در مرحله اول کمانش الاستیک بحرانی در ورق رخ می دهد. در مرحله دوم در ورق جان، میدان کششی قطری ایجاد می شود و در مرحله سوم با جاری شدن ورق جان، مقدار قابل توجهی انرژی جذب می‌شود. مقاومت پس از کمانش ورق فولادی نازک، باعث تبدیل این سیستم به یک سیستم دلخواه در امریکا و کانادا شده است. دیوار های برشی فولادی نسبت به سایر سیستم های سازه‌ای دارای مزیت‌هایی می باشند که در زیر به آنها اشاره می شود:

۱ - در صورتی که سازه به طور مناسب طراحی و جزییات آن ارائه شود، رفتار بسیار شکل پذیری دارد و توانایی جذب انرژی آن بسیار بالا است. در نتیجه این سیستم می‌تواند بسیار مناسب و اقتصادی باشد.

۲ - سیستم دیوار برشی فولادی سختی بسیار زیادی دارد. بنابراین در کنترل تغییر مکان جانبی سازه به ویژه ساختمان‌های بلند مرتبه بسیار مناسب است.

۳ - در مقایسه با دیوار برشی بتنی، دیوار برشی فولادی، بسیار سبک تر است که منجر به کاهش بار ثقلی ستون ها و فونداسیون و همچنین کاهش نیرو های ناشی از زلزله می شود.

۴ - سرعت اجرای این سیستم نسبت به سایر سیستم ها بسیار بالا تر بوده و هزینه آن نیز پایین تر است.

۵ - به خاطر ضخامت کم دیوار برشی فولادی در مقایسه با دیوار برشی بتنی، فضای معماری کمتری اشغال می‌شود که این مسئله در مورد ساختمان‌های بلند مرتبه بیشتر نمود پیدا می کند.

۶ - برای مقاوم سازی ساختمان های موجود، استفاده از دیوار برشی فولادی نسبت به دیوار برشی بتنی، بسیار سریع تر و کم هزینه تر است.

۷ – بررسی‌های صورت گرفته بر روی ساختمان های هتل هایت ریجنسی و بیمارستان آلیو ویو نشان می دهد با به کارگیری سیستم دیوار برشی فولادی می‌توان به مقدار زیادی در مصرف فولاد صرفه جویی نمود. در این دو ساختمان به ترتیب ۳۴ و ۵۰ درصد مصرف فولاد نسبت به سیستم قاب خمشی، کاهش یافته است [۱۰].

۳- انواع دیوارهای برشی فولادی

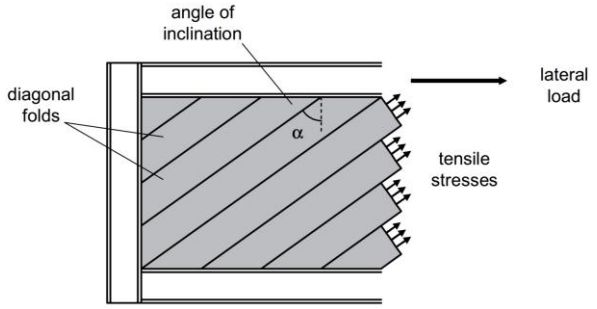
سیستم دیوار برشی فولادی به طور کلی به دو حالت زیر مورد استفاده قرار می گیرد:

۱ - دیوار برشی سخت نشده

۲ - دیوار برشی سخت شده

معیار های هزینه ای موجود در عملیات ساخت، بیان کننده این موضوع است که دیوار برشی سخت نشده نسبت به دیوار برشی سخت شده (سخت کننده یا بتن)، ارجحیت دارد. دیوار برشی مرکب به عنوان نوعی از دیوار برشی سخت شده، در برخی از ساختمان های بزرگ جهان به کار رفته است. در یک دیوار برشی فولادی سخت نشده، نیروی برشی طبقه، توسط تشکیل میدان کششی در ورق پس از رخ دادن کمانش در قطر فشاری، تحمل می‌شود. در یک دیوار برشی مرکب، قسمت بتنی از کمانش ورق فولادی پیش از جاری شدن برشی جلوگیری می‌کند. بنابراین نیروی جانبی توسط جاری شدن برشی ورق تحمل می‌شود. ظرفیت جاری شدن ورق فولادی در برش به مراتب بزرگتر از مقاومت جاری شدن میدان کششی قطری است. علاوه بر این، پوشش بتن مسلح بر روی ورق، نقش عایق بندی صوتی و حرارتی دیوار را دارد و باعث افزایش مقاومت در برابر آتش می‌شود [۱۰]. دیوار برشی فولادی یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی می باشد و از یک ورق فولادی تشکیل شده است که در بین تیر ها و ستون ها محصور گردیده است و در یک یا چند دهانه در تمام ارتفاع سازه بصورت یک تیر طره نصب می‌گردد (شکل ۲-۴). در این سیستم در صورت نیاز می توان بازشو با شکل ها و ابعاد گوناگون و مورد نظر را ایجاد نمود. دیوار برشی فولادی در معرض تغییر شکل های پلاستیک چرخه ای، سختی اولیه زیادی از خود نشان می‌دهد. شکل پذیری زیاد و جذب انرژی قابل توجه از ویژگی های دیگر این سیستم می‌باشد. این مشخصات دیوار برشی فولادی را به یکی از مناسب ترین سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی تبدیل کرده است. دیوار برشی فولادی تنها در طراحی ساختمانهای جدید به کار نمی رود بلکه در مقاوم سازی سازه های موجود نیز کاربرد دارد. اتصال تیر به ستون در دیوار برشی فولادی در حالت کلی به دو شکل ساده یا گیردار صورت می گیرد. قابل ذکر است که برای کاربرد در مناطق با لرزه خیزی بالا طبق آئین نامه AISC 341 فقط استفاده از اتصال گیردار مجاز می باشد. تا قبل از انجام تحقیقات صورت گرفته در دهه ۱۹۸۰، حالت نهایی طراحی دیوار برشی فولادی، کمانش خارج از صفحه ورق فولادی بود. مهندسین برای جلوگیری از کمانش، ورق فولادی را با سخت کننده های قوی طراحی می کردند. آزمایشات متعدد و مطالعات تحلیلی انجام شده با استفاده از بار گذاری های استاتیکی و دینامیکی نشان داده اند که مقاومت و شکل پذیری پس از کمانش ورق نازک جان دیوار برشی فولادی، می تواند مهم و قابل توجه باشد. براساس برخی از این مطالعات، آئین نامه طراحی سازه های فولادی کانادا (CAN/CSA S16-01) ضوابطی برای طراحی دیوار های بدون سخت کننده که در اثر نیروی برشی کمانش کرده و میدان کششی در آنها ایجاد می شود، ارائه کرده است. این رفتار دیوار برشی فولادی در آئین نامه های NEHRP 2003 (FEM450) و AISC 341 نیز مورد قبول واقع شده است [۱۱]. مقاومت پس از کمانش و عملکرد میدان کششی در ورق های سخت نشده به صورت زیر تشریح می شود: فرض می‌شود که پنل‌های فولادی دیوار برشی بار ثقلی را تحمل نمی‌کنند و زمانی که سازه تحت بار های جانبی قرار می‌گیرد، فقط تحت تغییر شکل های برشی قرار می‌گیرند و هر پنل توسط المان های صلب تیر و ستون محصور شده است. بنابراین در مرکز دیوار برشی و دور از قید های مرزی، ورق تحت برش خالص با تنش های اصلی ۴۵ درجه نسبت به جهت نیروی وارده، به صورت کششی و

فشاری قرار می گیرد. مقاومت کمانشی ورق در فشار به لاغری ورق (نسبت ارتفاع به ضخامت و نسبت عرض به ضخامت) بستگی دارد. نسبت های لاغری در ساختمان های معمولی و برای ضخامت معقول دیوار، نسبتاً زیاد است. علاوه بر این مقاومت ورق در فشار ممکن است در اثر ساخت و نصب به دلیل صاف نبودن ورق، کاهش یابد. زمانی که بار جانبی به ورق اعمال می‌شود، تنش های فشاری بزرگتر از مقاومت ورق ایجاد شده که باعث کمانش ورق و ایجاد چین هایی عمود بر جهت تنش می‌شود. در این هنگام، بارهای جانبی از طریق تنش های اصلی کششی در ورق منتقل می‌شوند. این رفتار پس از کمانش، با نام عملکرد میدان کششی شناخته می شود که در شکل نشان داده شده است [۱۰] و [۱۱].

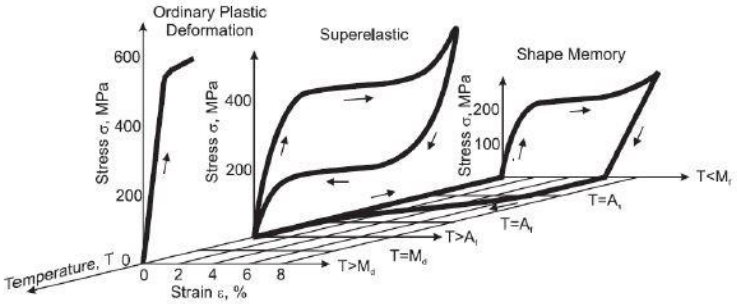


شکل ۳: عملکرد میدان کششی [۱۱].

این پدیده در تیر ورق ها بسیار مشهور بوده و کار های مطالعاتی و تحقیقاتی وسیعی در رابطه با آن انجام گرفته است. اولین کار جدی برای بررسی مقاومت پنل های برشی پس از کمانش جان آنها، توسط واگنر در سال ۱۹۳۱ انجام گرفت و تئوری میدان کششی قطری توسط وی ارائه گردید.

۴- معرفی آلیاژهای حافظه دار شکلی

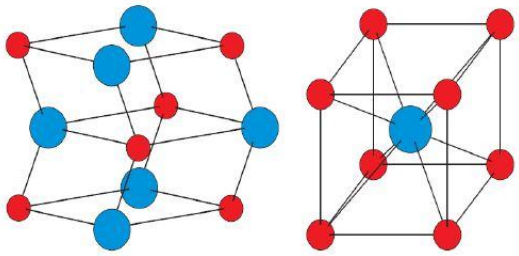
آلیاژهای حافظه دار شکلی طبقه ای از آلیاژهای فلزی هستند که می توانند تحت جابه جایی های زیاد قرار گیرند، در حالی که به شکل اصلی تغییر فرم نیافته خود، به واسطه به کار بردن گرما و یا حذف نیرو باز می گردند. بخشی از توانایی SMA ها در بازگشت به شکل اولیه خود، به علت ساختار بلورین منظم این مواد در فازهای آستنیت و مارتنزیت است، که به ماده اجازه می دهد در نتیجه تغییر دما یا اعمال تنش تحت یک تغییر شکل حالت مارتنز تیک قرار گیرد. آلیاژهای حافظه دار شکلی دو خاصیت منحصر به فرد دارد؛ اثر حافظه دار شکلی SMA و فوق کشسانی. SMA به این پدیده اشاره دارد که SMAها بر اثر گرما به شکل قبلی خود بر می گردند، و فوق کشسانی به این پدیده اشاره دارد که SMAها می توانند مقدار بسیار زیادی از تغییر شکل را تحمل کنند و بعد از باربرداری به شکل قبلی خود برگردند.



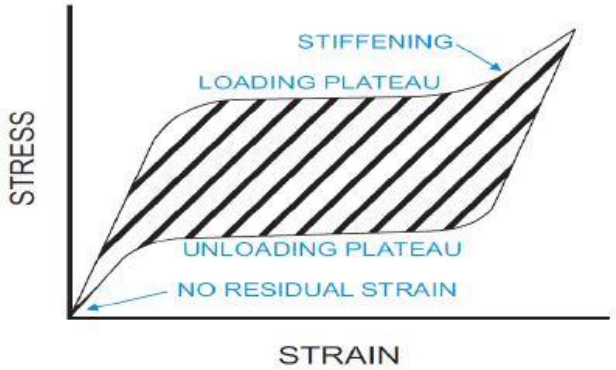
شکل ۴ : نمودار تنش –کرنش-دما آلیاژ حافظه دار شکلی[۱۲].

بلورهای SMA دو حالت دارند: بلور قوی تر که حالت آستنیت است و در دماهای پایین پایدار است. بلور آستنیت ساختار فضایی متمرکز شده مکعبی شکلی دارد. در حالی که مارتنزیت ساختار متوازی الاضلاع دارد (که نامتقارن است) و ۲۴ گونه متفاوت دارد[۱۳].

در سطح ماکروسکوپی، SMA های فوق کشسان چرخه های پسماند پرچم شکلی، تحت بارگذاری چرخه ای محوری نشان می دهند، که هر دو ویژگی بازگردانندگی و جذب انرژی را بهبود می بخشد. این ویژگی های منحصر به فرد SMA ها، منجر به ایجاد کاربردهای گوناگونی برای این مواد در طی دو دهه اخیر شده است.



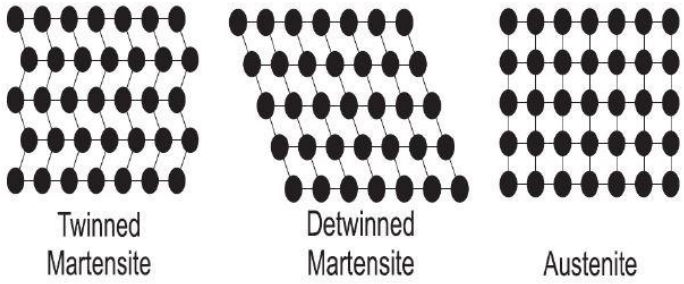
شکل ۵: ساختار سه بعدی بلورهای *Ni-Ti* سمت راست آستنیت،سمت چپ مارتنزیت[۱۲].



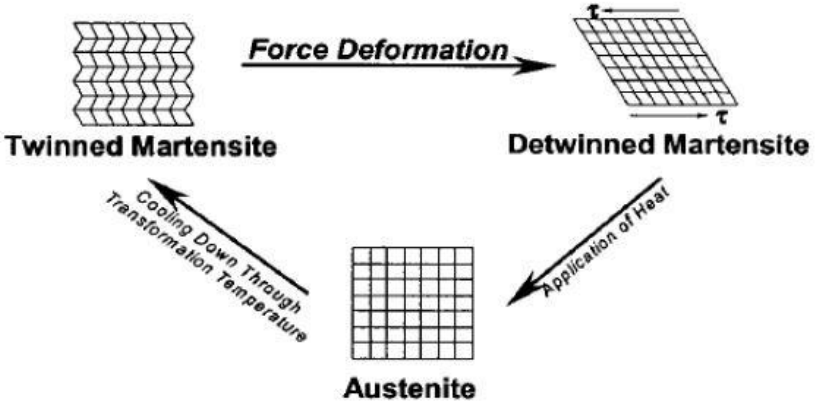
شکل ۶: رفتار تنش-کرنش آلیاژ حافظه دار شکلی فوق کشسان ایده آل[۱۲].

۴-۱- فازهای بلوری آلیاژهای حافظه دار شکلی و تبدیلات فازی

ساختار بلورین مواد در عملکرد رفتار کلی ماده اثر گذار است. به همین دلیل، مهم است که درک اساسی از الگوهای میکروسکوپی SMA ها داشته باشیم و آنها را در کاربردهایی با مقیاس گسترده استفاده نماییم. SMA ها می‌توانند به طور کلی در یکی از دو فاز پایدار مارتنزیت، یا آستنسیت پیدا شوند. فاز مارتنزیت در دماهای پایین و تنش های بالا پایدار است، در حالی که فاز آستنسیت در درجه حرارت بالا و تنشهای پایین پایدار است[۱۴] در شکل(۴) و (۵) ساختار میکروسکوپیک بلوری آلیاژهای حافظه دار شکلی در حالت مارتنزیت متقارن و نامتقارن و آستنیت تحت اثر حافظه دار شکلی آورده شده است.



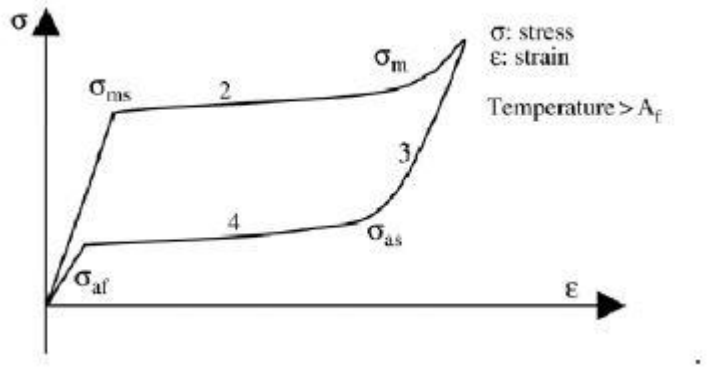
شکل ۷: فازهای مختلف آلیاژهای حافظه دار شکلی[۱۲].



شکل ۸: تبدیل فاز درآلیاژهای حافظه دار شکلی بر اثر ویژگی حافظه دار شکلی[۱۲].

تبدیل فازهای مختلف SMA طی دو فرایند صورت می گیرد؛ یا با اعمال حرارت که در این حالت دماهای تغییر فاز تعریف می‌شود، یا با اعمال تنش که در حالت تنش های تغییر فاز تعریف می شود. شکل یک نمونه تغییر شکل مارتنسایتیک بدون اعمال تنش و با اعمال تغییر دما و بازگشت به شکل اولیه بر اثر تغییر دمای دوره ای را نشان می دهد. چهار درجه حرارت، تغییر فاز چرخه دمایی را توصیف می کنند: دمای شروع مارتنزیت (M_s)، دمای پایان مارتنزیت (M_f)، دمای شروع استنایت (A_s)، دمای پایان آستنایت (A_f). این دماها به دقت به شروع، پایان و برگشت تغییر فاز اشاره دارند. این نکته قابل توجه است که حلقه تغییر دما تغییر شکل به علت اصطکاک داخلی می باشد. در شکل(۹) یک حلقه تنش - کرنش برای یک نمونه SMA فوق کشسان تحت تغییر شکل ناشی از اعمال تنش، در دمای ثابت بالا (Af>) نشان داده شده است. چهار قسمت حلقه تنش – کرنش، با فازهای مختلف

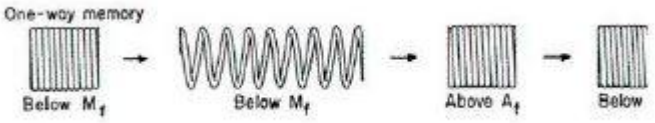
SMAمطابق اند. قبل از رسیدن به مقدار تنش بحرانی σ_{ms}،SMAرفتار الاستیک دارد. در قسمت ۲، تغییر شکل مارتنزیت بر اثر اعمال تنش اتفاق می افتد و نتیجه آن وقوع تغییر شکل زیاد همراه با افزایش تنش کم است. به طور مشابه، چهار مقدار تنش وجود دارد که تغییرات فازی در آنها شروع می شود و پایان می پذیرد.



شکل ۹: تغییر فاز مارتنزتیک تحت اثر تنش[۹].

۴-۲- اثر حافظه دار یک طرفه

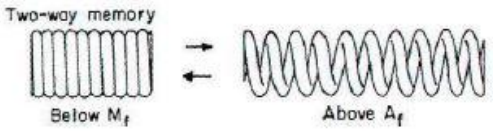
در صورتیکه اثر حافظه داری فقط بعد از تغییر شکل در حالت مارتنزیتی و سپس در سیکل گرم کردن مشاهده شود به آن اثر حافظه یک طرفه گفته می شود. این بدان معـنی است که در این حالت تغییر شکل ایجاد شده ، فقط با گرم کردن به حالت اولیه قبل از تغییر شکل باز می گردد و چنانچه جسم را دوباره سرد کنیم تغییری در شکل آن حاصل نمی شود این خصوصیت در شکل (۱۰) نمایش داده شده است.



شکل ۱۰: اثر حافظه دار یک طرفه

۴-۳- اثر حافظه دار دو طرفه

برگشت پذیری به حالت اولیه خود در اثر سرد و گرم کردن آلیاژ های حافظه دار دو طرفه در بازه معینی از دما پذیر است. در شکل (۱۱) یک فنر با اثر حافظه دار دو طرفه به صورت باز شده در حالت آستینی و شکل جمع شده امکان در حالت مارتنزیتی نشان داده شده است.



شکل ۱۱: اثر حافظه داردو طرفه.

همانطور که مشاهده می شود اگر فنر گرم شود باز شده و در سیکل سرد شدن مجدداً به شکل جمع شده در می آید. باید توجه داشت که آلیاژ های حافظه دار برای اینکه اثر حافظه دار دو طرفه از خود نشان دهند نیاز به انجام عملیات ترمومکانیکی خاصی بر روی آنها می باشد.

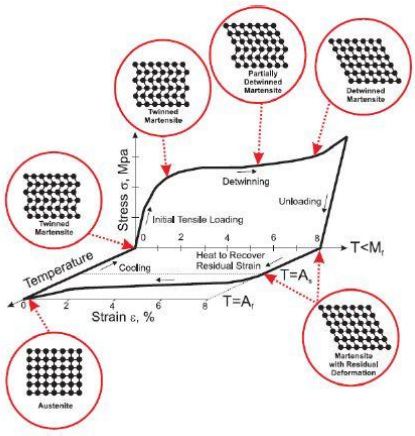
۵- رفتار ویژه ی آلیاژهای حافظه دار شکلی

۵-۱- رفتار حافظه دار شکلی

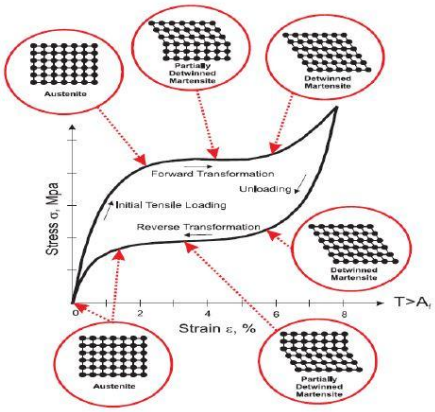
اگر SMA در فاز مارتنزیت و در دمای پایین تر از A_s باشد، پس از باربرداری در یک چرخه‌ی بارگذاری، ماده به طور کامل شکل اولیه خود را بازیابی نخواهد کرد و کرنش پسماند بر جای می ماند. برای از بین بردن این کرنش پسماند بایستی به ماده تا دمایی بالاتر از A_sاعمال دما کرد. این پدیده، رفتار حافظه دار شکلی نامیده می‌شود. شکل (۱۲) این رفتار و جزئیات تبدیلات فازی در طی آن را نشان می دهد.

۵-۲- رفتار فوق کشسانی

اگر SMA در فاز آستنیت و در دمای بالاتر از A_f باشد، اعمال تنش به این ماده موجب تبدیل فاز از آستنیت به مارتنزیت متقارن خواهد شد. با برداشت تنش اعمالی در این حالت تبدیل فاز معکوس انجام می گیرد، که در نتیجه آن ماده به حالت اولیه خود تبدیل شده و هیچ کرنش پسماندی به جای نمی ماند. به این رفتار خاصیت فوق کشسانی می گویند. شکل (۱۳) این رفتار و جزئیات تبدیلات فازی در طی آن را نشان می دهد.



شکل ۱۲: رفتار حافظه دار شکلی Shape Memory Effect [۱۲].



شکل ۱۳: رفتار فوق کشسانی Superelastic Effect [۱۲].

۶- صحت سنجی و بررسی یافته های تحقیق

روش های مختلفی برای مدل سازی دیوارهای برشی فولادی وجود دارد که در این پژوهش از مدل پوسته ای اجزاء محدود استفاده می شود. آنچه بیش از همه در مدل سازی اهمیت دارد، دستیابی به جواب های درست و قابل اعتماد در تحلیل می باشد. بررسی پارامتر هایی چون مقاومت، سختی، شکل پذیری، تغییر مکان و میزان جذب انرژی، تنها در صورتی امکانپذیر است که نتایج به دست آمده از تحلیل ها صحیح بوده و از دقت بالایی برخوردار باشند. بنابراین اهمیت صحت مدل سازی و فرضیات در نظر گرفته شده در تحلیل، مشخص می شود. برای رسیدن به این هدف، بهترین روش، استفاده از تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده بر روی دیوارهای برشی فولادی است. به این صورت که ابتدا مدلی تحلیلی منطبق با شرایط و مشخصات یک مدل آزمایشگاهی، ساخته شده سپس نتایج بدست آمده از تحلیل و آزمایش مقایسه می شوند. در صورت تطابق قابل قبول نتایج، می توان نتیجه گیری کرد که مدل سازی و فرضیات در نظر گرفته شده در تحلیل، از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و می توان از مدل سازی انجام شده برای بررسی پارامترهای مختلف، استفاده نمود. مدلی که برای تطبیق و مقایسه نتایج تحلیلی نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی انتخاب شده است، مدلی است که در سال ۲۰۱۵ توسط وانگ، در دانشگاه چین، با نام مدل TM2 آزمایش شده است. این مدل در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با استفاده از نرم افزار Abaqus صحت سنجی و اعتبارسنجی انجام شد و نتایج بدست آمده از تحلیل اجزاء محدود، به خوبی با نتایج آزمایشگاهی، مطابقت دارند و می‌توان از روند مدل سازی ذکر شده برای بررسی پارامترهای مورد نظر در این پژوهش، استفاده نمود.

شکل ۱۴: مدل آزمایشگاهی وانگ ۲۰۱۵ [۱۵].

هدف از این مطالعه، بررسی رفتار دیوار برشی فولادی تقویت شده با SMA برای ایجاد حرکت گهواره‌ای می باشد بر مدلسازی دو حالت در نظر گرفته شده در حالت اول تکیه گاه دیوار برشی گیردار است، به عبارت دیگر در این مرحله به فونداسیون دیوار اجازه ی بلند شدگی داده نمی شود، در این مرحله خرابی در سازه بیشتر بر روی دیوار برشی متمرکز می شود در این مرحله دیوار در خمش تسلیم شده و در برش به مرحله گسیختگی می رسد در حالت دوم به سیستم اجازه ی حرکت گهواره ای داده می شود. در این حالت تکیه گاه های قاب تحت شرایطی از روی زمین بلند می شوند، برای این منظور در نرم افزار از مقطع آلیاژ های حافظه دار شکلی استفاده شده است. در این مرحله خسارت در دیوار محدود می شود. بر روی مدل مذکور تحلیل تاریخچه زمانی انجام شده است و برای این تحلیل از زلزله‌ی السنترو استفاده شده است. در این مقاله دو حالت پایه آلیاژ حافظه دار و پایه گیردار بررسی شده است همچنین مقادیر شتاب، جابجایی، سرعت، تنش مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

جدول ۱ :حالت های مختلف مدل سازی.

حالت	رکورد زلزله	حالت پایه	ضخامت دیوار
۱	السنترو	پایه آلیاژ حافظه دار	طبقه اول۴میلیمتر
			طبقه دوم و سوم ۶میلیمتر
۲	السنترو	پایه گیردار	طبقه اول۴میلیمتر
			طبقه دوم و سوم ۶میلیمتر

جدول ۲: یافته‌های تحقیق.

حالت	حداکثر شتاب میلیمترمربع	حداکثر جابجایی میلیمتر	حداکثر سرعت میلیمتر بر ثانیه	حداکثر تنش مگاپاسکال	انرژی کل ژول	برش پایه کیلوگرم
۱	۱۴۵۳	۲۳/۴۸	۳۸/۸۴	۲۰/۷۱	۳۷۸۲۳۶	۱۱۵۷۲۷
۲	۱۹۳۰	۱۱/۲۲	۱۱۰	۱۲/۴۰	۳۳۵۱۵۳	۱۴۲۴۷۵

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق هدف بررسی تاثیر حرکت گهواره ای بر روی برش پایه و سختی و جذب انرژی سیستم دیوار برشی فولادی می باشدکه با مدلسازی دیوارهای برشی فولادی با آرایش های مختلف اتصال پای ستون با و بدون SMA توسط نرم افزار رفتار لرزه ای دیوار برشی فولادی مورد ارزیابی قرار داده شده است که براساس مدلسازی نتایج زیر حاصل شد. در حالتی که از یک رابط از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی در تکیه گاههای ستون های دیوار برشی استفاده می‌گردد به دلیل بلند شدن تکیه گاهها، تغییر مکانها به طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند که این از سوی دیگر هرچه ضخامت دیوار کاهش پیدا می‌کند، تغییرمکان سازه نیز افزایش می‌یابد زیرا بخش اعظمی از سختی قاب را سختی دیوار تشکیل می‌دهد. در حالتی که از یک رابط از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی در تکیه گاههای ستون های دیوار برشی استفاده می‌گردد به دلیل بلند شدن تکیه گاهها، شتاب ها و برش پایه به طور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند که این از سوی دیگر هرچه ضخامت دیوار کاهش پیدا می‌کند، شتاب‌ها و برش پایه سازه نیز افزایش می‌یابد زیرا بخش اعظمی از سختی قاب را سختی دیوار تشکیل می دهد.

۸- مراجع

[1]- Song, G., Ma, N., and Li, H. N., 2006, **Applications of shape memory alloys in civil structures**, Engineering structures, 28(9), 1266-1274.
[2]- Berman, J.W, and Bruneau, M.Capacity, 2010, Design of Vertical Boundary Elements in Steel Plate Shear Walls, Engineering structures, 30(6), 1143-1152.
[۳] - شکوری قانع، ح.، ۱۳۹۵، **مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی کنترل کمانش فشاری به کمک فلزات هوشمند، تحت بارهای رفت و برگشتی** (پایاننامه کارشناسی ارشد). دانشگاه علم و فرهنگ تهران، تهران. ۱۴۸-۱.
[4]- Auricchio, F., Fugazza, D., and Desroches, R., 2006, **Earthquake performance of steel frames with nitinol braces**, Journal of Earthquake Engineering, 10(spec01), 45-66.
[5]- McCormick, J., DesRoches, R., Fugazza, D., and Auricchio, F., 2007, **Seismic assessment of concentrically braced steel frames with shape memory alloy braces**, Journal of Structural Engineering, 133(6), 862-870.
[6]-Asgarian, B., and Moradi, S., 2011, **Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces**, Journal of Constructional Steel Research, 67(1), 65-74.
[7]- Miller, D. J., Fahnestock, L. A., and Eatherton, M. R., 2012, **Development and experimental validation of a nickeltitanium shape memory alloy self-centering buckling-restrained brace**, Engineering Structures, 40, 288-298.
[8]- Hooshmand, M., Rafezy, B., and Khalil-Allafi, J., 2015, **Seismic retrofit in building structures using shape memory alloys**, KSCE Journal of Civil Engineering, 19(4), 935-942.
[9]- Amadio, C., Fragiacomo, M., and Rajgelj, S., 2003, **The effects of repeated earthquake ground motions on the non-linear response of SDOF systems**, Earthquake engineering & structural dynamics, 32(2), 291-308.

[10]-Astaneh-Asl, 1998, **A. Experimental and Analytical Studies of Composit Shear Walls. S.l.: Research Project**, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley,
[11]-Sabelli, R., and Bruneau, M., 2007, **Steel Design Guide No.20: Steel Plate Shear Walls. S.l.**, American Institute of Steel Construction, Inc.
[12]-Ocel, J., DesRoches, R., Leon, R. T., Hess, W. G., Krumme, R., and Hayes, J. R., 2004, **Steel beamcolumn connections using shape memory alloys**, Structural Engineering, 130(5),732-740
[13]- Song, G. and Ma, N., 2006, **Applications of shape memory alloys in civil structures**, Engineering Structures, (28), 1266–1274.
[14]-Inaudi, J., and Kelly, J., 1994, **Experiments on Tuned Mass Dampers Using Viscoelastic**, **Frictional and Shape-Memory Alloy Materials**, First World Conference on Structural Control, Los Angeles, pp. 127–136.
[15]-Meng, W., and Yongjiu, Shi, 2015, **Experimental and numerical study of unstiffened steel plate shear wall structures**, Journal of Constructional Steel Research, 112, 373–386.