

## مطالعه اثر آلیاژ حافظه‌دار شکلی Ni-Ti در شکل‌پذیری دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک

مجید قلهکی<sup>۱\*</sup>، عاطفه خسروی خور<sup>۲</sup>، امید رضائی‌فر<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

نمونه‌های دیوار برشی فولادی سه طبقه با ورق نازک با مقیاس یک سوم، دارای درصدهای مختلف از آلیاژ حافظه‌دار شکلی Ni-Ti تحت بار دوره ای قرار گرفت و توسط نرم افزار تحلیلی *OpenSees*، مورد تجزیه و تحلیل واقع شد. همچنین یک نمونه دیوار برشی فولادی با ورق نازک بدون آلیاژ (*SPSW-Base*)، تحت بار دوره ای مشابه قرار گرفت و توسط نرم افزار *OpenSees*، تحلیل شد و نتایج حاصل از بررسی نمونه‌های دیوار برشی فولادی دارای آلیاژ حافظه‌دار و نمونه دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ، با یکدیگر مقایسه گردید. کلیه دیوارهای مذکور دارای اتصال تیر به ستون صلب هستند. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سه حالت در طبقات دیوار برشی فولادی به ترتیب در همه طبقات، فقط طبقه اول و سوم و فقط در طبقه میانی استفاده شده است. آلیاژهای حافظه‌دار به صورت ورق‌هایی در دور تا دور ورق فولادی دیوار برشی فولادی با ضخامتی برابر ضخامت ورق دیوار برشی فولادی و عرض متغیر به صورت درصدی از عرض کل ورق دیوار برشی فولادی استفاده شده است، به طوری که اگر عرض کل ورق دیوار برشی فولادی با  $B$ ، و عرض آلیاژ به کار رفته با  $b$ ، نمایش داده شود، هر یک از سه حالت ذکر شده بترتیب نمونه‌های  $b/B=18\%, 27\%, 36\%, 45\%$  را شامل می‌شود. کلیه نمونه‌ها تحت تحلیل استاتیکی غیر خطی واقع شدند. پس از تحلیل، نمونه‌های دارای آلیاژ نسبت به نمونه‌های بدون آلیاژ، شکل‌پذیری بیشتری را نشان دادند، به طوری که با افزایش درصد آلیاژ مصرفی شکل‌پذیری نیز افزایش یافت. همچنین از بین نمونه‌های سه حالت دارای آلیاژ، نمونه‌های حالت دوم یعنی حالت دیوار برشی فولادی که فقط در طبقه اول و سوم آن از آلیاژ استفاده شده بود، دارای شکل‌پذیری بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها بوده، به طوری که شکل‌پذیری نمونه  $SPSW-b/B=45\%$ ، در این حالت،  $41/70$  درصد بیشتر از نمونه *SPSW-Base* می‌باشد.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی با ورق نازک، آلیاژ حافظه‌دار شکلی، شکل‌پذیری، *OpenSees*، Ni-Ti.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2018.114376.1431	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://10.22065/jsce.2018.114376.1431	۱۳۹۸/۱۰/۰۱	۱۳۹۷/۰۴/۲۱	۱۳۹۷/۰۴/۲۱	۱۳۹۷/۰۳/۱۱	۱۳۹۶/۱۰/۲۰
				*نویسنده مسئول:		
				مجید قلهکی		
				پست الکترونیکی:		
				mgholhaki@semnan.ac.ir		

# Study Effect of Ni-Ti Shape Memory Alloy on Ductility of Steel Plate Shear Walls

M.Gholhaki<sup>1\*</sup>, A.khosravi-Khor<sup>2</sup>, O.RezayFar<sup>3</sup>

1- Associate professor, civil faculty, Semnan university, Semnan, iran

2- MSc, civil faculty, Semnan university, Semnan, iran

3-Associate professor, civil faculty, Semnan university, Semnan, iran

## ABSTRACT

Five specimens one third scale three-story single bay steel plate shear wall with variant percentage of Ni-Ti shape memory alloys (SMAs) under cycling loading were analyzed by Opensees software. Also one specimen steel plate shear wall without SMA (SPSW-Base) were analyzed under same cycling loading by the same software. The result of analysis of five specimens steel plate shear walls with shape memory alloy and one specimen of steel plate shear wall without SMA, compared with each other. All specimens had rigid beam-to-column connections. Shape memory alloys used in three different type in SPSW's stories respectively in first type, in all stories in second type, in just one first and third story and in third type in just middle story. Also these materials used as kind of plates which surround all side of steel plate of walls, with similar thickness to steel plate and variant widths such a percent of widths steel plate of SPSWs. If the whole width of steel plate shear wall is showed by 'B' and the whole width of used material by 'b', each three types respectively consist of five specimens with  $b/B=9\%, 18\%, 27\%, 36\%, 45\%$ . All specimens were analyzed under nonlinear static analysis. After analysis, all specimens with shape memory alloy showed more ductility in comparison with the one without shape memory alloy (SPSW-Base). Also by increasing SMA ductility increased in steel plate shear walls. In addition among three different types, second type, used SMA just in first and third story, showed more and better ductility. As an example the ductility of SPSW- $b/B=45\%$  in this type is 70/41% more than SPSW-Base.

## ARTICLE INFO

Receive Date: 10 January 2018

Revise Date: 01 June 2018

Accept Date: 12 July 2018

## Keywords:

Steel plate shear wall, Shape memory alloy, Ductility, OpenSees, Ni-Ti

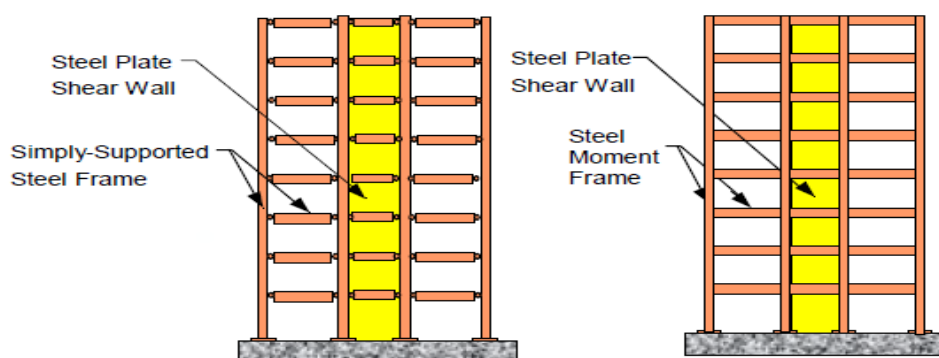
All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.114376.1431

\*Corresponding author: M.Gholhaki  
Email address mgholhaki@semnan.ac.ir

## ۱- مقدمه

دیوار برشی فولادی که با نام اختصاری SPSW<sup>۱</sup> در آئین نامه AISC341 [۱] معرفی می‌شود، نوعی سیستم ابتکاری مقاوم در برابر بارهای جانبی باد و زلزله همانند مهاربند همگرا بوده ولی عملکرد بهتری نسبت به بقیه سیستم‌ها دارد. این سیستم شامل یک سری دیوارهای مجزا است که هر دیوار در داخل دو تیر و ستون محاط شده و یک صفحه فولادی به این المان‌های محیطی متصل شده است. نیروهای جانبی توسط دیافراگم‌های کف طبقات به صورت افقی به تیرها و ستون‌های این نوع دیوار منتقل می‌شوند. در سیستم دیوار برشی فولادی اتصال بین تیرها و ستون‌ها می‌تواند گیردار و ساده باشد ( شکل ۱).



شکل ۱: اتصال تیر به ستون ساده و صلب در دیوار برشی فولادی [۲]

در سال ۱۹۹۳، الغالی<sup>۲</sup> و تیم محققین او [۳]، مطالعات آزمایشگاهی در زمینه اثرات لاغری دیوارها و نوع اتصالات تیر به ستون انجام دادند. آن‌ها شش نمونه دیوار برشی سه طبقه و یک دهانه، با مقیاس یک‌چهارم و ضخامت‌ها و اتصالات تیر به ستون مختلف را تحت بارگذاری چرخه‌ای افقی که به سقف آخر وارد می‌شد، بررسی کردند. طبق نتایج به دست آمده وقتی از ورق نازک استفاده گردد قبل از تسلیم ورق، اعضای مرزی تسلیم شده و تسلیم کامل سیستم به واسطه تشکیل مفاصل پلاستیک در ستون‌ها است. هر چه ضخامت ورق بیشتر شود، تسلیم سیستم با ناپایداری ستون شکل می‌گیرد و فقط افزایش کمی در مقاومت سیستم به علت افزایش ضخامت ورق وجود خواهد داشت یعنی اثر ضخامت در افزایش ظرفیت سیستم ناچیز است.

در سال ۲۰۰۰، لوبل<sup>۳</sup> و همکاران (محققین دانشگاه UBC کانادا)، [۴]، یک نمونه ۴ طبقه و دو نمونه یک طبقه را آزمایش کردند. تمام نمونه‌ها دارای عرض و ارتفاع ۰/۹ متر و ضخامت ورق با تنش تسلیم ۳۲۰ مگاپاسکال و اتصالات تیر به ستون گیردار بودند، تنها فرق این دو نمونه در جزئیات سخت کننده‌های پایه و تیر فوقانی بود. برای نمونه دوم از اتصالات پایه و تیر فوقانی قوی‌تر استفاده شده بود. بارگذاری بر مبنای ATC24 و شبه استاتیکی و چرخه‌ای انجام گرفت. اولین نمونه یک طبقه، تا ۷ برابر تغییر مکان تسلیم بارگذاری شد و به علت شکست مهارهای جانبی و زیاد بودن تغییر شکل خارج از صفحه تیر بالایی نمونه، آزمایش متوقف شد و در نمونه دوم از تیر سخت‌تری استفاده گردید. هر دو نمونه تغییر شکل غیرارتجاعی قابل توجهی را تا شکل‌پذیری حدود ۶ و اضافه مقاومت حدود ۱/۵ تحمل کردند. نتایج محققان حاکی از آن است که هر دو نمونه دیوارهای برشی فولادی داخل قاب خمشی با ایجاد مهارهای قطری اضافی می‌توانند سهم مؤثری در کاهش مقاومت خمشی قاب داشته باشند زیرا دوران در محل اتصال تیر به ستون بسیار کم‌تر می‌شود.

در سال ۲۰۰۹، قلهکی و صبوری [۵]، به کمک آزمایش‌های انجام شده بر روی دو نمونه دیوار برشی فولادی شکل‌پذیر سه طبقه با دو نوع اتصال تیر به ستون ساده و کاملاً صلب که در آن‌ها برای ورق دیوارها از فولاد نرم (جاذب انرژی) استفاده گردیده و تحت بار دوره‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند و همچنین آزمایش‌های معتبر انجام شده در دیگر مراکز تحقیقاتی دنیا، تأثیر ضریب شکل‌پذیری بر ضریب رفتار

<sup>۱</sup>-Steel Plate Shear Wall

<sup>۲</sup>-Elgaaly

<sup>۳</sup>-Lubell

دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک، مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی در این زمینه نشان می‌دهد که با فرض ثابت بودن ضریب اضافه مقاومت، ضریب رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک بر اساس روش یوانگ، بیشتر از قاب‌های خمشی فولادی است. در سال ۲۰۱۲، رهگذر [۶]، به ارائه فرمولی برای تعیین ضریب مقاومت افزون دیوارهای برشی فولادی برای قاب‌ها با ابعاد و ضخامت‌های ورق مختلف و با فرض اندرکنش قاب و ورق پرداخته است. نتایج پژوهش حاکی از آن است که، ضریب مقاومت افزون سازه‌های با دیوار برشی فولادی را می‌توان به طور تحلیلی و با توجه به مشخصات هندسی و سازه‌ای طبقه اول آن سازه تخمین زد. با توجه به بررسی‌های تحلیلی و آزمایشگاهی در این پژوهش، با کاهش ضخامت ورق، این ضریب افزایش می‌یابد.

در سال ۲۰۱۴، بنازاده و ملکی [۷]، به بررسی و مدل‌سازی عددی ورق‌های فولادی موج‌دار در دیوارهای برشی فولادی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، پرداختند و با صحت‌سنجی خروجی‌های مدل‌سازی عددی، به گسترش استفاده از آن بر روی ورق‌های با زاویه قرار گیری متفاوت پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که علی‌رغم کاهش ظرفیت باربری نهایی ورق فولادی موج‌دار در مقایسه با ورق‌های تخت، میزان جذب انرژی و شکل‌پذیری سیستم به مقدار چشم‌گیری افزایش یافته است. همچنین از نتایج مدل‌سازی‌های صورت گرفته، پایداری منحنی‌های هیستریزس و توزیع یکنواخت‌تر تنش در المان‌های محیطی است.

در سال ۲۰۱۵، کلایتون<sup>۱</sup> و برمن<sup>۲</sup> [۸]، بررسی‌هایی را بر روی تأثیر اتصال ورق‌های جان متصل به تیرها، در طراحی و عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی خود بازگشتی پرداختند. در این بررسی سه نمونه اولیه سه طبقه و ۹ طبقه از دیوار برشی فولادی خودبازگشتی که تنها اتصال تیر به ورق جان داشتند، طراحی شدند و با نمونه‌های مشابه طراحی شده با اتصال کامل ورق جان، مقایسه گشتند. برای ارزیابی توانایی جذب مواد در این بررسی، وزن فولاد مورد نیاز در هر سیستم با هم مقایسه شد، همچنین برای مقایسه عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی که تنها اتصال جان به تیرها را دارند و دیوار برشی با اتصال کامل ورق جان به تیرها، از نتایج غیرخطی پاسخ آنالیز تاریخچه زمانی استفاده گردید. از نتایج حاصل از این بررسی، کاهش اندازه ستون‌های اطراف قاب دیوار برشی فولادی و کاهش خرابی ورق فولادی جان است، که شکل‌پذیری بیشتری را در پی دارد.

در سال ۲۰۱۶، مشهدی‌علی و همکاران [۹]، به ارزیابی تحلیلی آسیب‌پذیری سازه‌های بلند مرتبه مهار شده با دیوار برشی فولادی، در برابر تخریب پیش‌رونده، پرداختند. این مطالعه به بررسی ظرفیت مقاومت تخریب پیش‌رونده مدل نواری سیستم دیوار برشی فولادی در مقایسه با مهاربند X شکل و قاب خمشی، پرداخته است. از مدل‌های سه بعدی برای ارزیابی رفتار آسیب‌پذیر مدل‌های ۵ طبقه قابلیت تخریب پیش‌رونده مدل‌های سازه ای با آنالیزهای مختلف غیر خطی استاتیکی و دینامیکی توسط نرم‌افزارهای آنالیزی مرسوم، ارزیابی گردیده. مقایسه نتایج آنالیزی نشان داد، در سیستم دیوار برشی فولادی، ظرفیت مقاومت تخریبی پیش‌رونده بیشتر از مهاربند X شکل و قاب خمشی است.

در سال ۲۰۱۷، عرب‌زاده و کاظمی‌نیا [۱۰]، به بررسی آزمایشگاهی و عددی بر روی دیوار برشی فولادی کامپوزیت دارای بازشو، پرداختند. مطالعات عددی و آزمایشگاهی حاضر به تأثیر بازشو بر رفتار دیوار برشی فولادی کامپوزیت که می‌تواند در قالب پنجره‌ها و یا درها در سازه استفاده گردد، پرداخته است. این نتایج با مقیاس یک سوم گزارش گردیده، علاوه بر این تأثیر اندازه بازشو و محل قرارگیری آن بر رفتار دیوار برشی فولادی کامپوزیت، ناچیز است. نتایج نشان داد که بازشو، مقاومت دیوار برشی فولادی کامپوزیت را کاهش داده، همچنین بازشو در اطراف و گوشه‌ها مقاومت بیشتری را نسبت به بازشو در مرکز کاهش می‌دهد.

در سال ۲۰۱۷، بروجدیان و همکاران [۱۱]، بر روی تأثیر ترک گوشه بر رفتار لرزه‌ای سیستم دیوار برشی فولادی پرداختند. در این مطالعه تأثیر ترک‌های محتمل در گوشه دیوار برشی فولادی به صورت عددی بررسی شده است. همچنین از ترکیب نرم افزار ANSYS و ABAQUS برای تسریع در مدل‌سازی و انجام مراحل تحلیل استفاده شده است. هدف اصلی تعیین رفتار الاستیک و غیر الاستیک دیوار برشی فولادی با در نظر گرفتن ترک در گوشه سیستم، می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که ترک‌های افقی در بالا و پایین دیوار برشی فولادی تأثیر یکسانی دارند. علاوه بر این برای ترک‌های عمودی این مسئله مهم است که ترک‌ها در سمت چپ و یا راست قرار گرفته‌اند. همچنین ترک‌های افقی تأثیر زیادی بر رفتار غیر خطی دیوار برشی فولادی در مقایسه با ترک‌های عمودی دارند.

در تمام مدل‌ها ترک واقع شده در میدان کشش قطری، مقاومت و جذب انرژی بیشتری را نسبت به ترک واقع شده بر قطر فشاری، کاهش می‌دهد. ترک بحرانی دارای طول بیشتر از  $1/8$  طول جوش است، این ترک‌ها جذب انرژی سیستم را  $0.09$  تا  $0.79$ ٪ کاهش می‌دهد.

آلیاژ حافظه‌دار شکلی، که به اختصار با عبارت SMA، نمایش داده می‌شود، نوعی آلیاژ فلزی است و دارای خواصی چون تحمل کرنش‌های بزرگ، قابلیت بازگشت به شکل اولیه بدون هیچ‌گونه تغییر شکل دائمی و جذب انرژی در فرآیند بارگذاری و باربرداری می‌باشد، ویژگی‌های مذکور کاربرد این مواد را در کنترل رفتار لرزه‌ای مناسب می‌سازد [۱۲].

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی دارای دو فاز اصلی هستند که ساختار کریستالی متفاوتی دارد. فاز اول مرتزیت نام دارد که در دماهای پایین و تنش‌های بالا پایدار است و فاز دیگر آستنیت می‌باشد، با خاصیت پایداری در دماهای بالا و تنش‌های پایین.

پتانسیل استفاده از SMAs، به ویژه Superelastic (SE) NiTi SMAs برای اولین بار در مهندسی عمران در دو دهه قبل توسط چانگ و آراکی [۱۳] شناخته شد. پایه طراحی اولیه برای استفاده از مواد خیلی انعطاف پذیر (SE)، دستیابی به یک مکانیزم خودمحور تحت عملکرد لرزه ای بوده، به طوری که تغییر شکل باقی مانده پس از زلزله و آسیب ساختاری مرتبط کاهش یابد. انگیزه دیگر برای استفاده از SE SMA ها توانایی تلف شدن انرژی آنها بود که به برگشت پذیری اختصاص می یافت. به عنوان یک نتیجه از این ویژگی های منحصر به فرد، می توان گفت که پاسخ های تغییرشکل عناصر SMA SM مشابه مقاطع بالدار هستند و بر اساس چنین رفتار های مختلف مقاوم در برابر لرزه دستگاه ها و اعضاء، از جمله دمپرها [۱۷-۱۴]، براکت ها [۱۸ و ۱۹]، اتصالات تیر به ستون [۲۶-۲۰]، جداسازهای پایه [۲۷ و ۲۸]، و اعضای بتن [۲۹] پیشنهاد شدند.

در سال ۱۹۹۱ گراسر و کوزارلی [۳۰]، به بررسی رفتار لرزه‌ای نیتینول (Ni-Ti)، پرداختند و اثر نرخ بارگذاری را بر جذب انرژی کابل‌های Ni-Ti بررسی نمودند. این آلیاژها قادرند کرنش‌های بزرگ ۸-۱۰٪ را بدون تغییر شکل‌های دائمی تحمل کنند و قادرند به طور غریزی (سوپر الاستیسیته) و یا با حرارت (حافظه‌دار شکلی) به شکل اولیه خود برگردند.

در سال ۲۰۰۰، دلسه<sup>۱</sup> و همکاران [۳۱]، ابزار کنترل غیر فعال بر اساس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی را به عنوان سیستم مهاربندی در ساختمان‌ها و سیستم‌های جداکننده در پل‌ها را در یک پروژه تحقیقاتی به نام منساید ۶ در اروپا بررسی کرده‌اند.

در سال ۲۰۰۵، هن و همکاران [۳۲]، میراگرهایی را بررسی نمودند که در فشار-کشش و پیچش کار می‌کنند. این میراگرها با کاربرد کابل‌های Ni-Ti سوپر الاستیک در تمامی حالات بارگذاری در معرض کرنش کششی قرار داشتند. برای بررسی اثر این میراگرها در کشش-فشار و پیچش سه میراگر با مقیاس کاهش یافته بررسی شدند.

در سال ۲۰۰۸، ما و چو [۳۳]، میراگرهایی شامل کابل‌های پیش‌تنیده (با قابلیت جذب انرژی) و دو فنر پیش‌فشرده (برای ایجاد نیروی مقاوم)، را مورد بررسی قرار دادند. نتایج عددی نشان داد یک میراگر به طول ۱ متر می‌تواند میرایی معادل ۱۲٪ با جابجایی ۳۰ میلی‌متری و قابلیت بازگشتی کامل داشته باشد.

در سال ۲۰۰۹، اسپیچر و همکاران [۳۴]، دستگاه کشش-فشاری را برای کنترل رفتار لرزه‌ای ساختمان‌ها با استفاده از فنرهای مارپیچ Ni-Ti و واشرهای Ni-Ti طراحی نمودند. بر اساس نتایج آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای، فنر مارپیچ ویژگی‌های میرایی و خود بازگشتی خوبی داشته در حالی که واشرها برای جذب انرژی به عنوان SMA پیشنهاد شد.

در سال ۲۰۱۰، صابردل‌ساده و همکاران [۳۵]، به بررسی اثر استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی هوشمند، با خاصیت رفتار فوق الاستیک و رفتار حافظه‌دار شکلی برای استفاده در سازه‌های بتنی به ویژه در دیوارهای برشی بتنی پرداختند. در این مطالعه، از روش المان محدود به کمک نرم‌افزار ABAQUS جهت تحلیل مدل دیوارها تحت بارگذاری یکنواخت و متناوب استفاده گردید و نتایج بدست آمده نشان‌دهنده بهبود رفتار دیوارها و بازگرداندگی و کاهش تغییر مکان‌ها یا کرنش‌های پلاستیک آن‌ها در برابر پاسخ‌های لرزه‌ای مخصوصاً بعد از زلزله بوده است. برای ارزیابی میزان تأثیر ساز و کار پیشنهادی جدید، دیوار برشی بتنی با ۱۰۰ درصد فولاد (بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی) تحت اثر بارگذاری استاتیکی یکنواخت و متناوب قرار گرفت و نتایج آن با نتایج حاصل از بارگذاری وارده به دیوار مشابه تقویت شده با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با دو ویژگی فوق الاستیک و حافظه‌دار شکلی مقایسه شد.

در سال ۲۰۱۳، مرتضوی و همکاران [۳۶]، به بررسی کنترل لرزه‌ای قاب‌های فولادی شامل آلیاژهای حافظه‌دار شکلی پرداختند. این بررسی تأثیر کاربرد حالت‌های مختلف SMA را بر اساس مطالعات آزمایشگاهی دسراج<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۳۷]، و دلسه و همکاران در سال ۲۰۰۰ [۳۱]، نشان می‌دهد. طبق نتایج آزمایشگاهی مذکور، فاز آستنیت قابلیت برگشت پذیری مطلوب‌تری نسبت به فاز مرتزیت دارد و فاز مرتزیت قابلیت جذب انرژی بالاتر، بنابراین تلفیق مناسبی از دو فاز نتیجه بهتری در کاربردهای لرزه‌ای خواهد داشت.

در سال ۲۰۱۴، مرادی و همکاران [۳۸]، طی مطالعه‌ای با استفاده از آنالیز افزایشی به بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی ۴ طبقه مجهز به مهاربندهای کم‌انرژی در مقایسه با مهاربندهای کم‌انرژی ناپذیر دارای آلیاژهای حافظه‌دار شکلی پرداختند، بررسی اثر مذکور بر روی قاب‌هایی با ۴ نوع پیکربندی مهاربندی تحت ۲۰ زلزله متفاوت انجام گرفت.

نتایج مطالعه، عملکرد رضایت بخشی را در سطح طراحی شدید برای هر دو نوع قاب مهاربندی نشان داد، همچنین مهاربندهای شامل آلیاژهای حافظه‌دار شکلی منجر به توزیع یکنواختی از پاسخ غیر الاستیک در طول ارتفاع سازه شد و دریافت ماکزیمم و جابجایی پسماند بام کاهش داشته است.

در سال ۲۰۱۵، هوشمند و همکاران [۳۹]، به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای هیبریدی تشکیل شده از فولاد و آلیاژ حافظه‌دار شکلی پرداختند. شش نوع مهاربند هیبریدی SMA، با درصدهای ۶۰، ۴۰، ۲۰ و ۸۰ استفاده شد. یک آنالیز دینامیکی تحت رکوردهای زلزله السنترو با ماکزیمم شتاب 0.6g و 0.9g، انجام شد. نتایج نشان داد که عملکرد لرزه‌ای، میزان جذب انرژی و کرنش پسماند مهاربندهای هیبریدی فولاد-SMA به مقادیر SMA موجود بستگی دارد. مقدار بهینه SMA، ۲۰٪ بوده که در این مقدار یک مهاربند هیبریدی با عملکرد لرزه‌ای خوب با قیمت توجیه‌پذیر طراحی می‌شود. همچنین عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای هیبریدی فولاد-SMA، در زلزله‌های ضعیف و متوسط به طور قابل ملاحظه متفاوت نمی‌باشد لذا استفاده از SMA ها در مهاربندها از نظر اقتصادی برای تقویت عملکرد لرزه‌ای در مقابل زلزله‌های ضعیف و متوسط توجیه‌پذیر نمی‌باشد.

در سال ۲۰۱۷، باجوریا و همکاران [۴۰]، به ارزیابی عملکرد ورق‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی برای بازگرداندن تغییر شکل‌های لرزه‌ای در قاب‌های فولادی پرداختند. در این بررسی امکان مطالعه استفاده از انواع مختلف ورق‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی در مکان‌های مختلف مفصلی قاب‌های فولادی تحت بارهای لرزه‌ای فراهم گردید.

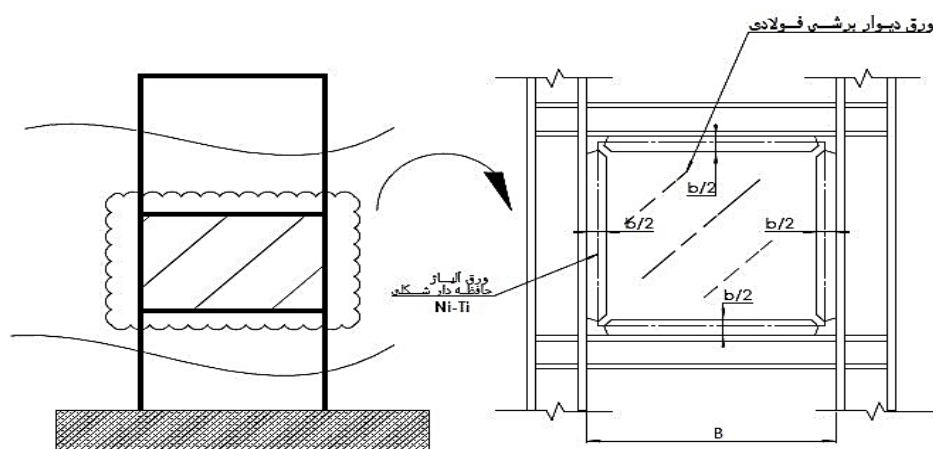
با مطالعه تحقیقات اخیر در زمینه دیوارهای برشی فولادی و سیستم‌های دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی و با توجه به خلأهای تحقیقاتی موجود در رابطه با ترکیب این دو سیستم، در این مقاله به بررسی سه مدل مختلف دیوار برشی فولادی یا درصدهای مختلف آلیاژهای حافظه‌دار شکلی Ni-Ti، با انجام تحلیل استاتیکی غیر خطی به کمک نرم‌افزار تحلیلی OpenSees، پرداخته می‌شود.

## ۲- تئوری تحقیق

در این مقاله مدل‌های دیوار برشی فولادی سه طبقه با ورق نازک با مقیاس یک سوم، دارای درصدهای مختلف از آلیاژ حافظه‌دار شکلی Ni-Ti (نیتینول)، تحت بار دوره‌ای قرار گرفت و توسط نرم‌افزار تحلیلی OpenSees2.0.0، تجزیه و تحلیل شد. همچنین یک مدل دیوار برشی فولادی با ورق نازک بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SPSW-Base)، تحت بار دوره‌ای مشابه قرار گرفت و توسط نرم‌افزار OpenSees2.0.0، تحلیل شد و نتایج حاصل از بررسی مدل‌های دیوار برشی فولادی دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی و مدل دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ، با یکدیگر مقایسه گردید. کلیه دیوارهای مذکور دارای اتصال تیر به ستون صلب هستند. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سه حالت در طبقات دیوار برشی فولادی به ترتیب در همه طبقات، فقط طبقه اول و سوم و فقط طبقه میانی استفاده شده است. همچنین این آلیاژها به صورت ورق‌هایی در دور تا دور ورق فولادی دیوار برشی فولادی با ضخامت برابر ضخامت ورق دیوار برشی فولادی (۷/۱ میلی‌متر)، و عرض متغیر به صورت درصدی از عرض کل ورق دیوار برشی فولادی استفاده شده است، به طوری که اگر عرض کل ورق دیوار برشی فولادی با B، و عرض آلیاژ به کار رفته در طول و ارتفاع ورق با b، نمایش داده شود، هر یک از سه حالت ذکر شده درصدهای  $b/B=18\%, 27\%, 36\%, 45\%$  را شامل می‌شود. مدل‌ها در هر حالت به ترتیب به صورت  $SPSW-b/B=18\%, 27\%, 36\%, 45\%$ ، نمایش داده می‌شوند. در شکل ۲، مشخصات کلی مدل‌ها، قابل مشاهده است کلیه مدل‌ها تحت تحلیل استاتیکی غیر خطی واقع شدند و شکل‌پذیری آن‌ها بررسی شد. پس از تحلیل، مدل‌های دارای آلیاژ نسبت به مدل‌های بدون آلیاژ، شکل‌پذیری بیشتری را نشان دادند، و با افزایش درصد آلیاژ مصرفی شکل‌پذیری نیز افزایش یافت.

همچنین از بین مدل‌های سه حالت دارای آلیاژ، مدل‌های حالت دوم یعنی حالت دیوار برشی فولادی که فقط در طبقه اول و سوم آن از آلیاژ استفاده شده بود، دارای شکل‌پذیری بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها بود، طوری که شکل‌پذیری مدل  $SPSW-b/B=45\%$  (مدل دارای ۴۵٪ آلیاژ حافظه‌دار شکلی Ni-Ti)، در این حالت حدود ۲۴۰ درصد بیشتر از مدل SPSW-Base (دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه‌دار

شکلی (Ni-Ti)، بود.



شکل ۲: شکل کلی مدل های دیوار برشی فولادی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی Ni-Ti

### ۳- صحت سنجی

یکی از مهم ترین موضوعها در هر تحقیق و پژوهشی که در آن از شیوه مدل سازی تحلیلی استفاده می شود، بحث اعتبار سنجی (کالیبره کردن) نرم افزاری مدل آزمایشگاهی است که مدل سازی و تحلیل بر روی آن انجام می گیرد. این مقوله از آن جهت اهمیت بسیار دارد که در صورتی که از صحت و درستی مدلی که از آن در تحلیل استفاده می شود و یا روش استفاده از آن مطمئن نبوده، به هیچ عنوان نمی توان به نتایج تحلیلی به دست آمده اعتماد و اتکا کرد. در این تحقیق یک مدل آزمایشگاهی برای بررسی و صحت دیوار برشی فولادی و یک مدل برای صحت سنجی آلیاژ حافظه دار شکلی Ni-Ti، استفاده شده است.

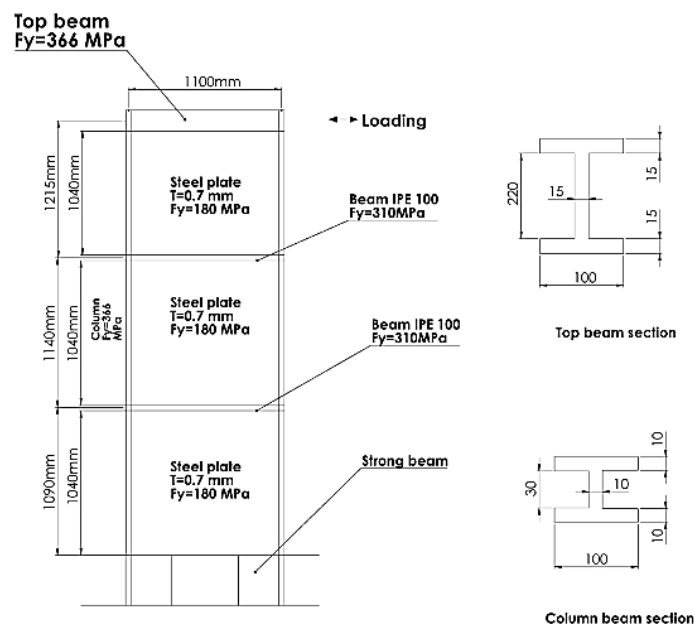
#### ۳-۱- صحت سنجی مدل اول

به منظور اعتبار سنجی دیوار برشی فولادی از مدل آزمایشگاهی صبوری و قلپکی در سال ۲۰۰۸ [۴۱]، استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات مدل آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی سه طبقه ارائه گردیده است.

جدول ۱: خصوصیات مکانیکی اجزای دیوار برشی فولادی صبوری و قلپکی [۴۱]

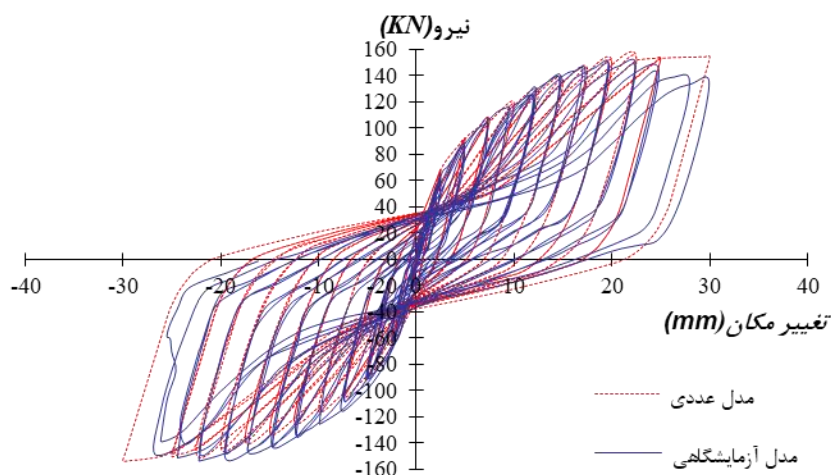
اعضا	تنش تسلیم (N/mm <sup>2</sup> )	مدول الاستیسیته (KN/mm <sup>2</sup> )
ورق	۱۸۰	۲۰۶
ستون	۳۶۶	۲۰۶
تیرهای میانی	۳۱۰	۲۰۶
تیر فوقانی	۳۶۶	۲۰۶

در ۱۳۷۹۱۹۸-۶۰-۱۸۶-۹۴۴۶۶۵۴۵۶-شکل ۳، نمای کلی و جزئیات نمونه دیوار برشی فولادی مورد بررسی آورده شده است.



شکل ۳: نمای کلی و جزئیات نمونه دیوار برشی فولادی مورد بررسی در مدل آزمایشگاهی صیبری و قلهکی [۴۱]

پس از آن که دیوار برشی فولادی سه طبقه آزمایشگاهی در نرم افزار Opensees مدل شد، تحلیل استاتیکی غیرخطی با بارگذاری چرخه‌ای با اعمال تغییر مکان افزایشنده به نقاط بالایی ستون انجام شد و از آنجا که در نتایج آزمایشگاهی، به عنوان مثال نمودارهای چرخه‌ای هیستریزس، تغییر مکان طبقه بام به عنوان مینا قرار گرفته بود، تغییر مکان این طبقه به همراه برش پایه ایجاد شده، از نرم افزار استخراج و به صورت نمودار هیستریزس ترسیم گردید. سپس این نمودار با پوش منحنی چرخه ای هیستریزس آزمایشگاهی مقایسه شد. که در شکل ۴ این صحت سنجی قابل مشاهده است. همانطور که ملاحظه می شود شیب اولیه (سختی الاستیک) مدل عددی با مدل آزمایشگاهی از تطابق خوبی برخوردار می باشد. همچنین ماکزیمم نیرو در مدل آزمایشگاهی برابر ۱۵۰ کیلونیوتن بوده که این مقدار در مقایسه با مقدار ۱۶۰ کیلونیوتنی مدل عددی، اختلافی در حدود ۶ درصد دارد. بنابراین می توان گفت صحت مدل آنالیز شده قابل قبول می باشد.



شکل ۴: صحت سنجی مدل آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی سه طبقه به کمک نرم افزار Opensees



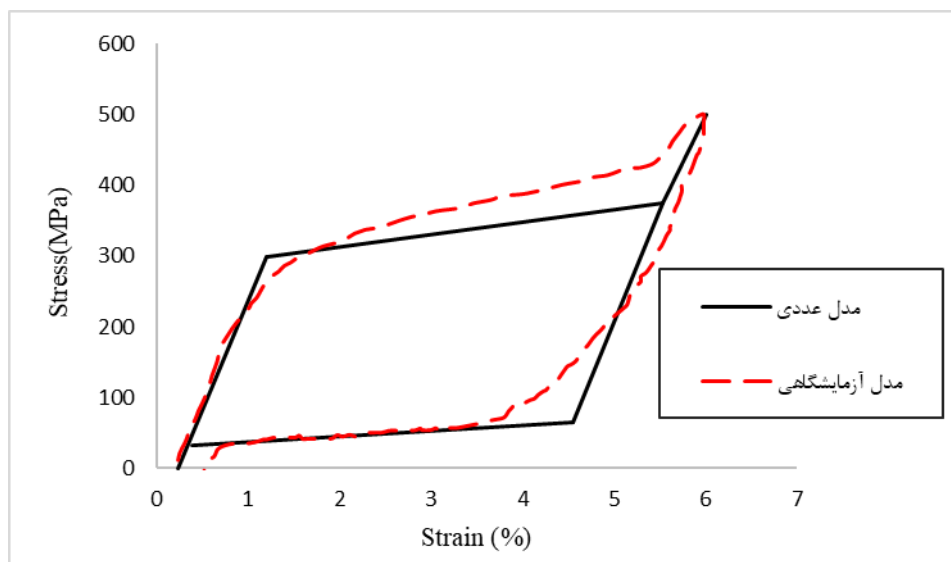
## ۳-۲- صحت سنجی مدل دوم

برای صحت سنجی آلیاژ حافظه دار شکلی Ni-Ti از مدل بررسی شده در مطالعه عسگریان و مرادی [۴۲]، استفاده گردید. مشخصات مکانیکی این آلیاژ در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه دار شکلی Ni-Ti عسگریان و مرادی [۴۲]

مدول الاستیسیته فاز آستنیت و مارتنزیت (مگاپاسکال)	$E^{SMA}$	۲۷۵۷۹
تنش شروع تبدیل آستنیت به مارتنزیت (مگاپاسکال)	$\sigma_S^{AS}$	۴۱۴
تنش پایان تبدیل آستنیت به مارتنزیت (مگاپاسکال)	$\sigma_F^{AS}$	۲۰۶۵۵۰
تنش شروع تبدیل مارتنزیت به آستنیت (مگاپاسکال)	$\sigma_S^{SA}$	۳۹۰
تنش پایان تبدیل مارتنزیت به آستنیت (مگاپاسکال)	$\sigma_F^{SA}$	۲۰۰
حداکثر کرنش برگشت پذیری	$E_L$	٪۳/۵

در این صحت سنجی رفتار تنش - کرنش آلیاژ مورد نظر با خصوصیات ذکر شده در شکل ۵ به کمک نرم افزار OpenSees صورت پذیرفت و نتیجه حاصل، مطابق شکل ۵ قابل مشاهده است که مطابقت خوبی را از خود نشان می دهد. سختی الاستیک مدل عددی و آزمایشگاهی تقریباً با یکدیگر برابر بوده، همچنین تنش نهایی آن ها نیز از اختلاف بسیار کمی برخوردار می باشد. با توجه به رابطه ضریب شکل پذیری، می توان گفت که این ضریب نیز در هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی تقریباً با یکدیگر برابر می باشند. بنابراین نتایج از اطمینان کافی برخوردار می باشند.



شکل ۵: صحت سنجی رفتار تنش - کرنش آلیاژ حافظه دار شکلی Ni-Ti

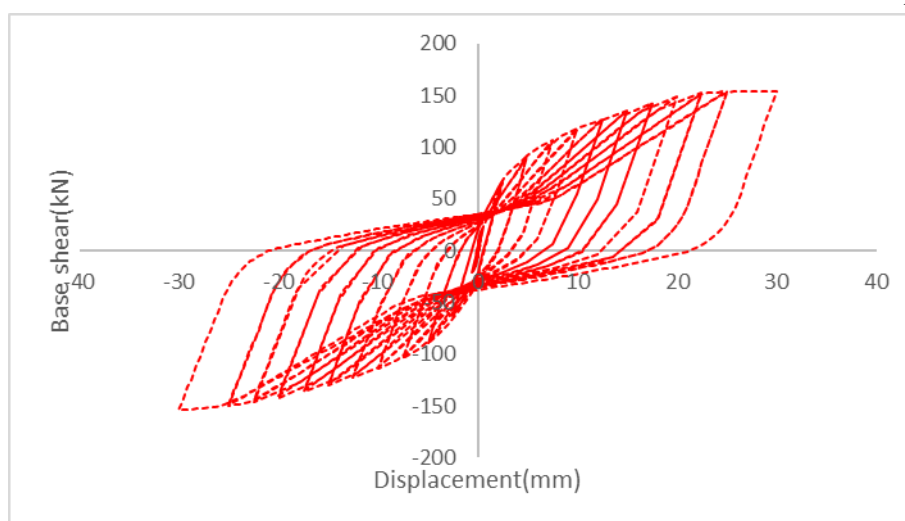
## ۴- شکل پذیری

شکل پذیری قابلیت مواد به کار رفته در ساختمان، سیستم سازه ای، اعضای آن و نیز اتصالات در جذب انرژی در محدوده تغییر شکل های غیرالاستیک است. به اعتقاد اکثر طراحان، شکل پذیری و چگونگی تأمین آن در یک طرح لرزه ای، کلید اصلی دستیابی به یک طرح لرزه ای

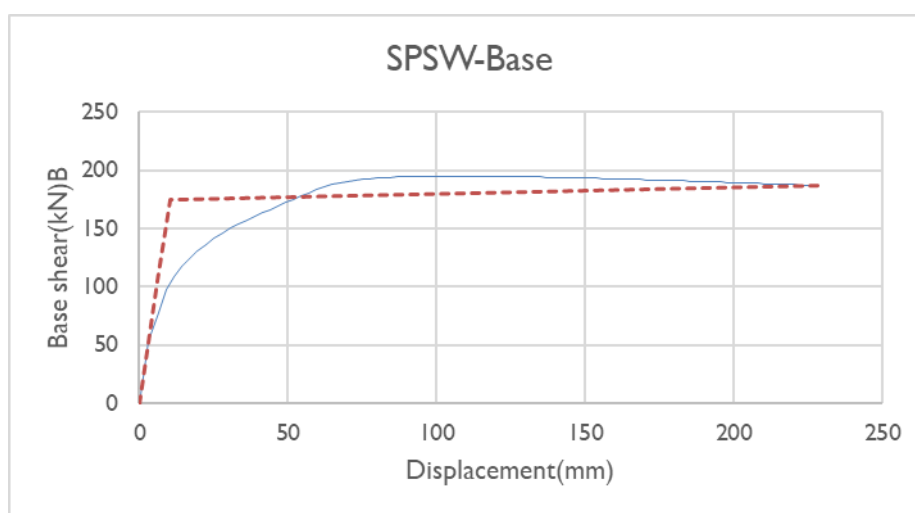
ایمن، مناسب و اقتصادی است. شکل پذیری توسط رفتار چرخه‌ای<sup>۲</sup> اعضای خاص سازه نظیر سیستم مقاوم در برابر زلزله ارزیابی می‌شود. ارزیابی شکل پذیری با اعمال تغییر مکان به صورت چرخه‌ای به سازه مورد نظر و رسم نمودار نیرو-تغییر مکان بر حسب تکرارهای متعدد از منحنی نیرو-تغییر مکان حاصل می‌شود. بر اساس تعریف پروتکل بارگذاری ATC24، نسبت تغییر مکان حداکثر به تغییر مکانی که تسلیم شدگی چشمگیر در سازه اتفاق می‌افتد شکل پذیری سیستم نامیده می‌شود.

#### ۴-۱- بررسی شکل پذیری دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی Ni-Ti

در شکل ۶ نمودار چرخه‌ای حاصل از بارگذاری رفت و برگشتی و در شکل ۷، نمودار بار افزون حاصل از بارگذاری مستقیم و منحنی دوخطی ایده‌آل برای دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی Ni-Ti نشان داده شده است. مطابق نمودارهای بدست آمده در شکل ۷، و با استفاده از تعریف شکل پذیری به روش ATC24، می‌توان شکل پذیری مربوط به دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SPSW-Base) را محاسبه نمود.



شکل ۶: منحنی هیستریزس برای دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی



شکل ۷: نمودار بارافزون و منحنی دو خطی ایده آل برای دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی

مطابق شکل ۷، در تغییر مکان ۱۰/۵ میلی‌متر نقاطی از سازه شروع به تسلیم شدگی نمودند. در تغییر مکانی در حدود ۶۰ میلی‌متر شیب نمودار بار-تغییر مکان به طرز چشم گیری کاهش یافته است چرا که در این تغییر مکان تقریباً تسلیم شدگی کامل رخ داده است و تا حدود

<sup>۲</sup>Hysteresis

تغییر مکان ۱۹۵ میلی متر مقاومت نموده است و در تغییر مکان ۱۹۵/۵۱ میلی متر مود شکست اتفاق می افتد و دیوار برشی فولادی شروع به کمزش خارج از صفحه نموده. تغییر مکان نهایی برای دیوار برشی فولادی طبق منحنی دوخطی ایده آل در شکل ۷، برابر ۲۲۸ میلی متر و تغییر مکان نظیر تسلیم شدگی طبق منحنی دوخطی ایده آل برابر ۱۰/۵ میلی متر بدست آمده است و با توجه به ATC24، شکل پذیری دیوار برشی فولادی ۲۱/۷ محاسبه گردید.

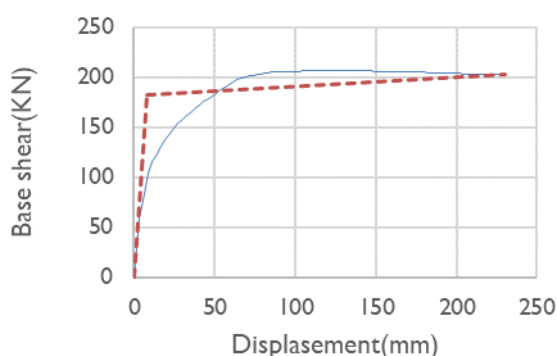
#### ۲-۴- بررسی شکل پذیری دیوار برشی فولادی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی Ni-Ti در تمام طبقات

در این قسمت، به بررسی و مقایسه سیستم ترکیبی با ورق نازک فولادی پرکننده به ضخامت ۰/۷ میلی متر در حالتی که، سه طبقه دارای آلیاژ حافظه دار شکلی Ni-Ti هستند، در مدل های با نسبت های عرضی آلیاژ حافظه دار 18%، 27%، 36%، 45% b/B= (عرض آلیاژ حافظه دار و B عرض ورق دیوار برشی فولادی)، پرداخته می شود و شکل پذیری هر یک از سیستم های فوق الذکر محاسبه گردیده و با دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه دار شکلی (SPSW-Base)، مقایسه شده و میزان تأثیر مقدار آلیاژها روی این پارامتر مشخص شده است. از نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود برای سیستم ترکیبی در این حالت با نسبت عرضی 18% b/B=، مطابق شکل ۸، مقدار تغییر مکان نظیر تسلیم ۸/۷۵ میلی متر و تغییر مکان نهایی سیستم ترکیبی برای دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه دار شکلی ۲۲۸/۲۵ میلی متر است، شکل پذیری برای سیستم ترکیبی فوق طبق تعریف ATC24 برابر ۲۶/۰۸۵ است که حدود ۲۰/۲۰ درصد نسبت به دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه دار شکلی افزایش داشته است (شکل پذیری دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ ۲۱/۷ است).

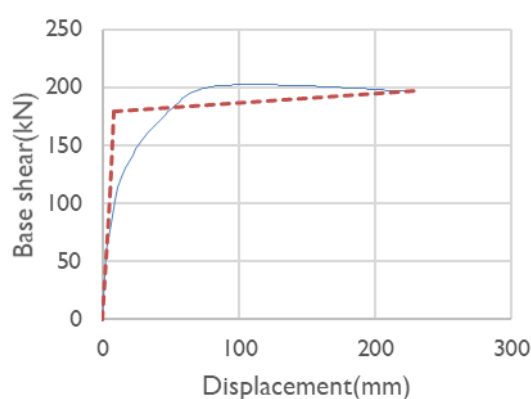
برای سیستم ترکیبی با نسبت عرضی 27% b/B=، مطابق شکل ۹ مقدار تغییر مکان نظیر تسلیم برابر ۸ میلی متر و تغییر مکان نهایی سیستم ترکیبی فوق ۲۳۰ میلی متر است و شکل پذیری برای سیستم ترکیبی فوق طبق تعریف ATC24، برابر ۲۸/۷۵ است که حدود ۳۲/۴۸ درصد نسبت به دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه دار شکلی افزایش داشته (شکل پذیری دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ ۲۱/۷ است).

برای سیستم ترکیبی با نسبت عرضی 36% b/B=، مطابق شکل ۱۰، مقدار تغییر مکان نظیر تسلیم برابر ۷ میلی متر و تغییر مکان نهایی سیستم ترکیبی فوق ۲۳۳ میلی متر است، در نتیجه شکل پذیری برای سیستم ترکیبی فوق طبق تعریف ATC24، برابر ۳۳/۲۸ است که حدود ۵۳/۳۶ درصد نسبت به دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه دار شکلی افزایش داشته (شکل پذیری دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ ۲۱/۷ است).

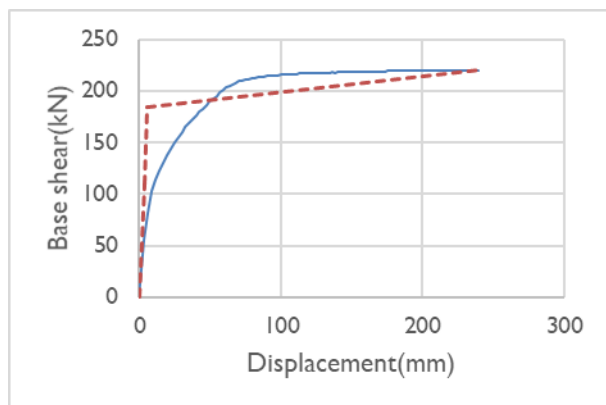
برای سیستم ترکیبی با نسبت عرضی 45% b/B=، مطابق شکل ۱۱، مقدار تغییر مکان نظیر تسلیم برابر ۶ میلی متر و تغییر مکان نهایی سیستم ترکیبی فوق ۲۴۰ میلی متر است. در نتیجه شکل پذیری برای سیستم ترکیبی فوق طبق تعریف ATC24، برابر ۴۰ است که حدود ۸۴/۳۳ درصد نسبت به دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه دار شکلی افزایش داشته است (شکل پذیری دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ ۲۱/۷ است).



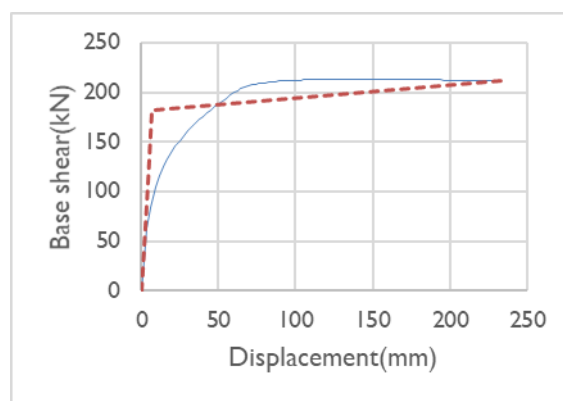
شکل ۹: نمودار بار-تغییر مکان و منحنی دوخطی ایده آل سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی در سه طبقه با نسبت عرضی b/B=27%



شکل ۸: نمودار بار-تغییر مکان و منحنی دوخطی ایده آل سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی در سه طبقه با نسبت عرضی b/B=18%



شکل ۱: نمودار بار-تغییر مکان و منحنی دو خطی ایده آل سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی با نسبت عرضی  $b/B=45\%$



شکل ۱۰: نمودار بار-تغییر مکان و منحنی دو خطی ایده آل سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی با نسبت عرضی  $b/B=36\%$

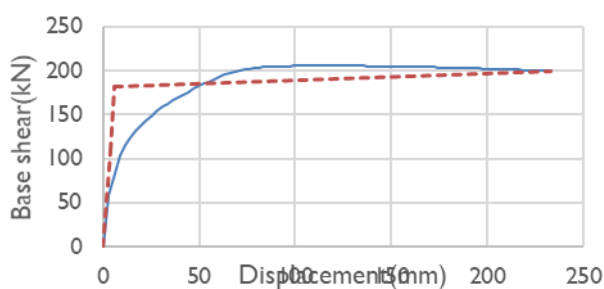
#### ۳-۴- بررسی شکل پذیری دیوار برشی فولادی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی Ni-Ti در طبقه اول و سوم

در این قسمت، به بررسی و مقایسه سیستم ترکیبی با ورق نازک فولادی پرکننده به ضخامت  $0.7$  میلی متر در مدل های با نسبت های - عرضی آلیاژ حافظه دار  $b/B=18\%, 27\%, 36\%, 45$  (عرض آلیاژ حافظه دار و  $B$  عرض ورق دیوار برشی فولادی)، پرداخته می شود و شکل پذیری، هر یک از سیستم های نام برده محاسبه می گردد و با دیوار برشی فولادی مبنا مقایسه شده و میزان تأثیر کاربرد آلیاژها روی این پارامتر مشخص می گردد.

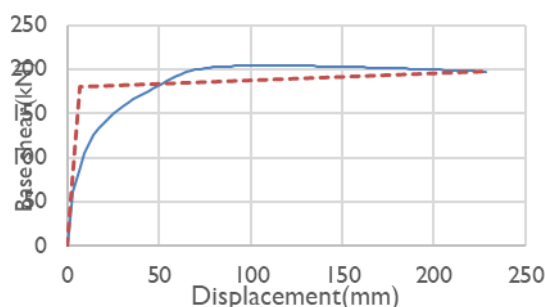
از نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود برای سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی در طبقه اول و سوم با نسبت عرضی  $b/B=18\%$ ، مطابق شکل ۱۲، مقدار تغییر مکان نظیر تسلیم برابر  $7$  میلی متر و تغییر مکان نهایی سیستم ترکیبی فوق برابر  $229$  میلی متر است در نتیجه شکل پذیری برای سیستم ترکیبی فوق طبق تعریف ATC24 برابر  $32/64$  است که حدود  $50/41$  درصد نسبت به دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه دار شکلی افزایش داشته است (شکل پذیری دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ  $21/7$  است). برای سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی در طبقه اول و سوم با نسبت عرضی  $b/B=27\%$ ، مطابق شکل ۱۳، مقدار تغییر مکان نظیر تسلیم برابر  $6/12$  میلی متر و تغییر مکان نهایی سیستم ترکیبی فوق  $233$  میلی متر است در نتیجه مقدار شکل پذیری برای سیستم ترکیبی فوق طبق تعریف ATC24 برابر  $38/08$  است که حدود  $75/48$  درصد نسبت به دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه دار شکلی افزایش داشته است (شکل پذیری دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ  $21/7$  است).

برای سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی در فقط طبقه اول و سوم با نسبت عرضی  $b/B=36\%$ ، مطابق شکل ۱۴، مقدار تغییر مکان نظیر تسلیم برابر  $4/12$  میلی متر و تغییر مکان نهایی سیستم ترکیبی فوق  $249$  میلی متر است در نتیجه مقدار شکل پذیری برای سیستم ترکیبی فوق طبق تعریف ATC24، برابر  $60/41$  است که حدود  $178/38$  درصد نسبت به دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه دار شکلی افزایش داشته است (شکل پذیری دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ  $21/7$  است).

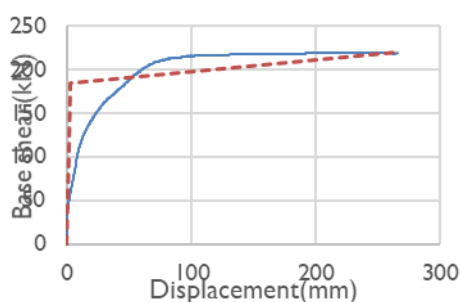
در سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار در طبقه اول و سوم با نسبت عرضی  $b/B=45\%$ ، مطابق شکل ۱۵، مقدار تغییر مکان نظیر تسلیم برابر  $3/1$  میلی متر و تغییر مکان نهایی سیستم ترکیبی فوق  $265$  میلی متر است در نتیجه مقدار شکل پذیری برای سیستم ترکیبی فوق طبق ATC24، برابر  $85/54$  است که حدود  $294/19$  درصد نسبت به دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه دار شکلی افزایش داشته است (شکل پذیری دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ  $21/7$  است).



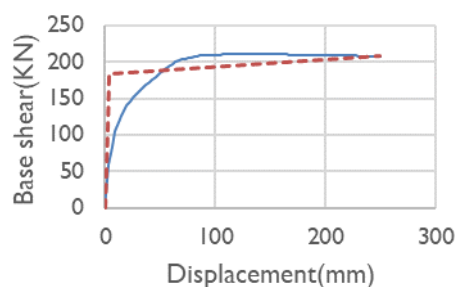
شکل ۱۳: نمودار بار-تغییر مکان و منحنی دوخطی ایده آل سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی در طبقه اول و سوم با نسبت عرضی  $b/B=27\%$



شکل ۱۲: نمودار بار-تغییر مکان و منحنی دوخطی ایده آل سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی در طبقه اول و سوم با نسبت عرضی  $b/B=18\%$



شکل ۱۵: نمودار بار-تغییر مکان و منحنی دوخطی ایده آل سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی در طبقه اول و سوم با نسبت عرضی  $b/B=45\%$



شکل ۱۴: نمودار بار-تغییر مکان و منحنی دوخطی ایده آل سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی در طبقه اول و سوم با نسبت عرضی  $b/B=36\%$

#### ۴-۴- بررسی شکل پذیری سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی Ni-Ti در طبقه میانی

در این قسمت به بررسی و مقایسه سیستم ترکیبی با ورق نازک فولادی پرکننده به ضخامت  $0/7$  میلی متر دارای آلیاژ حافظه دار شکلی در طبقه میانی با نسبت‌های عرضی  $b/B=18\%, 27\%, 36\%, 45\%$  (عرض آلیاژ حافظه دار و  $B$  عرض ورق دیوار برشی فولادی)، پرداخته می‌شود و شکل‌پذیری، هر یک از سیستم‌های فوق‌الذکر محاسبه می‌گردد و با دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه دار شکلی مقایسه شده و میزان تأثیر کاربرد آلیاژ حافظه دار شکلی روی این پارامتر مشخص می‌گردد.

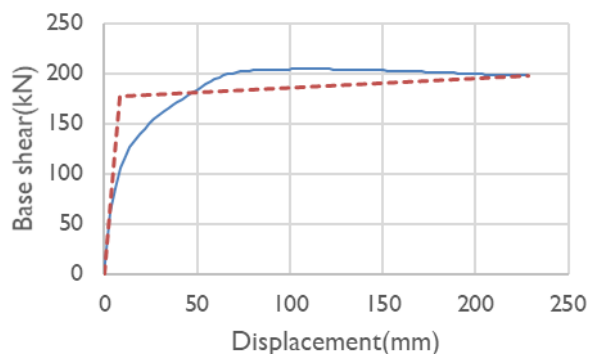
از نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود برای سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی در طبقه میانی با نسبت عرضی  $b/B=18\%$ ، مقدار تغییر مکان نظیر تسلیم برابر  $9/25$  میلی متر و تغییر مکان نهایی سیستم ترکیبی فوق‌الذکر برابر  $228/17$  میلی متر است در نتیجه شکل‌پذیری برای سیستم ترکیبی فوق‌الذکر طبق تعریف ATC24، برابر  $24/66$  است که حدود  $13/64$  درصد نسبت به دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه دار شکلی افزایش داشته است (شکل‌پذیری دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ برابر  $21/7$  است).

برای سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی در حالت فقط طبقه میانی، با نسبت عرضی  $b/B=27\%$ ، مقدار تغییر مکان نظیر تسلیم برابر  $8/5$  میلی متر و تغییر مکان نهایی سیستم ترکیبی فوق‌الذکر برابر  $228/3$  میلی متر است در نتیجه شکل‌پذیری برای سیستم ترکیبی فوق‌الذکر طبق تعریف ATC24، برابر  $26/85$  است که حدود  $23/73$  درصد نسبت به دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه دار شکلی افزایش داشته است (شکل‌پذیری دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ برابر  $21/7$  است).

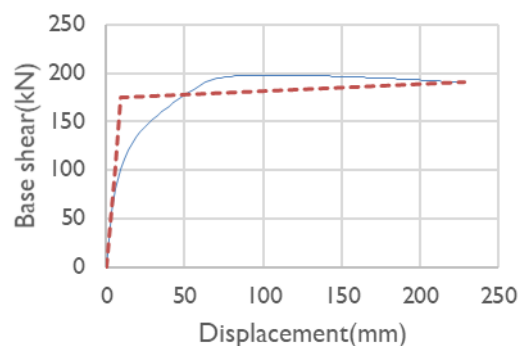
سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی در طبقه میانی با نسبت عرضی  $b/B=36\%$ ، مطابق شکل ۱۸، دارای تغییر مکان نظیر تسلیم  $7/2$  میلی متر و تغییر مکان نهایی  $230$  میلی متر است در نتیجه شکل‌پذیری برای سیستم ترکیبی فوق‌الذکر طبق تعریف ATC24،  $31/94$

بدست آمده که حدود ۴۱/۱۸ درصد نسبت به دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی افزایش داشته است (شکل پذیری دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ برابر ۲۱/۷ است).

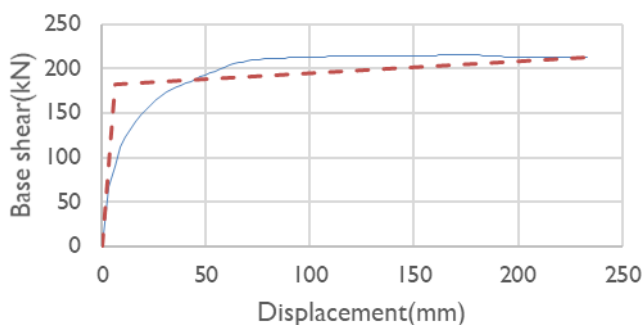
سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی در طبقه میانی با نسبت عرضی  $b/B=45\%$ ، مطابق شکل ۱۹، دارای تغییر مکان نظیر تسلیم  $6/3$  میلی‌متر و تغییر مکان نهایی ۲۳۳ میلی‌متر است در نتیجه شکل‌پذیری برای سیستم ترکیبی فوق طبق تعریف ATC24،  $36/98$  است که حدود  $70/41$  درصد نسبت به دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی افزایش داشته است (شکل‌پذیری دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ برابر ۲۱/۷ است).



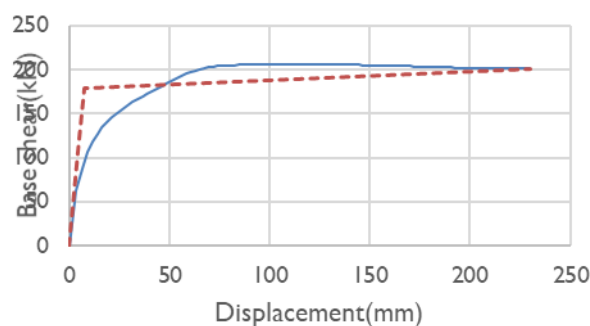
شکل ۱۷: نمودار بار-تغییر مکان و منحنی دوخطی ایده‌آل سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی در طبقه میانی با نسبت عرضی  $b/B=27\%$



شکل ۱۶: نمودار بار-تغییر مکان و منحنی دوخطی ایده‌آل سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی در طبقه میانی با نسبت عرضی  $b/B=18\%$



شکل ۱۹: نمودار بار-تغییر مکان و منحنی دوخطی ایده‌آل سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی در طبقه میانی با نسبت عرضی  $b/B=45\%$



شکل ۱۸: نمودار بار-تغییر مکان و منحنی دوخطی ایده‌آل سیستم ترکیبی دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی در طبقه میانی با نسبت عرضی  $b/B=36\%$

## ۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاکی از آن است که از بین سه حالت بررسی شده برای سیستم‌های ترکیبی دارای آلیاژ حافظه‌دار Ni-Ti، سیستم‌های دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی در طبقه اول و سوم دارای عملکرد بهتری از نظر شکل‌پذیری هستند بطوری که تا بیش از ۲ برابر نسبت به سایر سیستم‌ها (سیستم دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی در همه طبقات - سیستم دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی در طبقه میانی) شکل‌پذیرتر هستند به طوری که درصد افزایش شکل‌پذیری هر یک از مدل‌ها با نسبت‌های عرضی آلیاژ حافظه‌دار شکلی ۱۸٪، ۲۷٪، ۳۶٪ و ۴۵٪ نسبت به دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی در حالت تمام طبقات دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی به ترتیب برابر ۲۰/۲ و ۳۲/۴۸ و ۵۳/۲۶ و ۸۴/۳۳ می‌باشد. درصد افزایش شکل‌پذیری هر یک از مدل‌ها با نسبت‌های عرضی آلیاژ حافظه‌دار شکلی ۱۸٪، ۲۷٪، ۳۶٪ و ۴۵٪ نسبت به

دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه دار شکلی در حالت طبقه اول و سوم دارای آلیاژ حافظه دار شکلی به ترتیب برابر  $۵۰/۴۱$  و  $۷۵/۴۸$  و  $۱۷۸/۳۸$  و  $۲۹۴/۱۹$  می باشد. درصد افزایش شکل پذیری هر یک از مدل ها با نسبت های عرضی آلیاژ حافظه دار شکلی  $۱/۱۸$  و  $۲/۲۷$  و  $۳/۳۶$  و  $۴/۴۵$  نسبت به دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ حافظه دار شکلی در حالت طبقه میانی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی به ترتیب برابر  $۱۳/۶۴$  و  $۲۳/۷۳$  و  $۴۱/۱۸$  و  $۷۰/۴۱$  می باشد. از بین درصدهای عرضی آلیاژ شکل پذیری درصد  $۴۵$  از همه بیشتر بوده بطوری که نسبت شکل پذیری در سیستم همه طبقات، ابتدا سیستم طبقه میانی و سیستم طبقات اول و سوم دارای آلیاژ حافظه دار شکلی به ترتیب برابر  $۱/۸۴$ ،  $۱/۷۰$  و  $۱/۹۴$  می باشد. بنابراین، ابتدا سیستم های ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی در طبقه اول و سوم سپس سیستم های ترکیبی دارای آلیاژ حافظه دار شکلی در همه طبقات و سپس سیستم های دارای آلیاژ حافظه دار شکلی در طبقه میانی، از لحاظ برآوردن نیاز شکل پذیری قرار دارند. در واقع با بالا رفتن درصد آلیاژ مصرفی، شکل پذیری سیستم های ترکیبی در مقایسه با دیوار برشی فولادی بدون آلیاژ، افزایش می یابد. طبق نتایج، به نظر می رسد تغییر چیدمان آلیاژهای حافظه دار شکلی در طبقات مختلف سازه، نتایج متفاوتی را برای پاسخ سازه به نیاز شکل پذیری در بردارد و چون این نوع آلیاژها، گران قیمت هستند، باید در چیدمان آلیاژهای حافظه دار شکلی تحقیق و بررسی بیشتری صورت پذیرد.

## مراجع

- [1] A. I. of S. (2005). Constr uction, Seismic provisions for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction.
- [2] Z.Ebrahimi, (1993). "Analytical study of bending on steel plate shear wall,"2013.(in Persian)
- [3] C. Elgaaly, Mohamed and Caccese, Vincent and Du, "Postbuckling behavior of steel-plate shear walls under cyclic loads," J. Struct. Eng., vol. 119, pp. 588--605.
- [4] M. Lubell, Adam S and Prion, Helmut GL and Ventura, Carlos E and Rezai, (2000). "Unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading," J. Struct. Eng., vol. 126, pp. 453--460.
- [5] M.Gholhaki,S.Sabouri, (2010). "Effect of ductility factor on behavior factor of steel plate shear walls,"pp.52-63. (in Persian).
- [6] M.Rahgozar, (2013). "Assesment of exceeding strength factor of reinforced building with steel plate shear walls". (in Persian).
- [7] A.Banazade,A.Maleki, (2015). "Analytical study of seismic behavior of wavy steel plate shear wall by ABAQUS software,"pp.1-7. (in Persian).
- [8] P. M. Clayton, J. W. Berman, and L. N. Lowes, (2015). "Seismic performance of self-centering steel plate shear walls with beam-only-connected web plates," JCSR, vol. 106, pp. 198–208.
- [9] Mashhadiali, N and Gholhaki, M and Kheyroddin, A and Zahiri,H (2016). "Analytical evaluation of the vulnerability of framed tall buildings with steel plate shear wall to progressive collapse," Int. J. Civ. Eng., vol. 14, pp. 595--608.
- [10] H. R. K. N. Arabzadeh, Abolfazl and Korrani, (2017). "Numerical and experimental investigation of composite steel shear wall with opening," Int. J. Steel Struct., vol. 17, pp. 1379--1389.
- [11] A. Broujerdian, V and Shayanfar, M (2017). "Corner Crack Effect on the Seismic Behavior of Steel Plate Shear Wall System," Civ. Eng. Infrastructures J., vol. 50, pp. 311--332.
- [12] M. Boroschek, Ruben L and Farias, Gloria and Moroni, Ofelia and Sarrazin, (2007). "Effect of SMA braces in a steel frame building," J. Earthq. Eng., vol. 11, pp. 326--342.
- [13] Chang WS, Araki Y. (2016). Use of shape-memory alloys in construction: a critical review. Proc Inst Civ Eng: Civ Eng. 169(2):87–95.
- [14] Branco M, Gonçalves A, Guerreiro L, Ferreira J. (2014). Cyclic behavior of composite timber-masonry wall in quasi-dynamic conditions reinforced with superelastic damper. Constr Build Mater. 52:166–76.
- [15] Parulekar YM, Ravi Kiran A, Reddy GR, Singh RK, Vaze KK. (2014). Shake table tests and analytical simulations of a steel structure with shape memory alloy dampers. Smart Mater Struct. 23(12):125002.
- [16] Dieng L, Helbert G, Chirani SA, Lecompte T, Pilvin P. (2013). Use of Shape Memory Alloys damper device to mitigate vibration amplitudes of bridge cables. Eng Struct. 56:1547–56.
- [17] Torra V, Auguet C, Isalgue A, Carreras G, Terriault P, Lovey FC. (2013). Built in dampers for stayed cables in bridges via SMA. The SMARTer-ESF project: a mesoscopic and macroscopic experimental analysis with numerical simulations. Eng Struct. 49:43–57.
- [18] Massah SR, Dorvar H. (2014). Design and analysis of eccentrically braced steel frames with vertical links using shape memory alloys. Smart Mater Struct. 23(11):115015.

- [19] Yang CSW, Desroches R, Leon RT. (2010). Design and analysis of braced frames with shape memory alloy and energy-absorbing hybrid devices. *Eng Struct.* 32(2):498–507.
- [20] Leon R, Gao Y. (2016). Resiliency of steel and composite structures. *Front Struct Civ Eng.* 10(3):239–53.
- [21] Fang C, Yam MCH, Lam ACC, Xie LK. (2014). Cyclic performance of extended end-plate connections equipped with shape memory alloy bolts. *J Constr Steel Res.* 94:122–36.
- [22] Yam MCH, Fang C, Lam ACC, Zhang YY. (2015). Numerical study and practical design of beam-to-column connections with shape memory alloys. *J Constr Steel Res.* 104:177–92.
- [23] Wang W, Chan TM, Shao HL, Chen YY. (2015). Cyclic behavior of connections equipped with NiTi shape memory alloy and steel tendons between H-shaped beam to CHS column. *Eng Struct.* 88:37–50.
- [24] Wang W, Chan TM, Shao HL. (2015). Seismic performance of beam–column joints with SMA tendons strengthened by steel angles. *J Constr Steel Res.* 109:61–71.
- [25] Wang W, Fang C, Liu J. (2017). Self-centering beam-to-column connections with combined superelastic SMA bolts and steel angles. *J Struct Eng ASCE.* 04016175.
- [26] Fang C, Wang W, He C, Chen YY. (2017). Self-centring behaviour of steel and steel-concrete composite connections equipped with NiTi SMA bolts. *Eng Struct.* 150:390–408.
- [27] Dezfuli FH, Alam MS. (2013). Shape memory alloy wire-based smart natural rubber bearing. *Smart Mater Struct.* 22(4):045013.
- [28] Ozbulut OE, Hurlbauss S. (2010). Seismic assessment of bridge structures isolated by a shape memory alloy/rubber-based isolation system. *Smart Mater Struct.* 20(1):015003.
- [29] Shahverdi M, Czaderski C, Motavalli M. (2016). Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams. *Constr Build Mater.* 112:28–38.
- [30] F. Graesser, EJ and Cozzarelli, (1991). "Shape-memory alloys as new materials for aseismic isolation," *J. Eng. Mech.*, vol. 117, pp. 2590--2608.
- [31] R. Dolce, Mauro and Cardone, Donatello and Marnetto. (2000). "Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys," *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, vol. 29, pp. 945--968.
- [32] A.-Q. Han, Yu-Lin and Xing, De-Jin and Xiao, Er-Tian and Li, "NiTi-wire shape memory alloy dampers to simultaneously damp tension, compression, and torsion," *Modal Anal.*, vol. 11, pp. 1067--1084, 2005.
- [33] C. Ma, Hongwei and Cho, "Feasibility study on a superelastic SMA damper with re-centring capability," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 473, pp. 290--296, 2008.
- [34] R. T. Speicher, Matthew and Hodgson, Darel E and DesRoches, Reginald and Leon, "Shape memory alloy tension/compression device for seismic retrofit of buildings," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 18, pp. 746--753, 2009.
- [35] M.Saberdel-Sadeh, M.Ghasemieh, "improvement and recovery of concrete buildings with shape memory alloys," 2010. (in Persian).
- [36] S. Mortazav, SMR and Ghassemieh, M and Motahari, "Seismic control of steel structures with shape memory alloys," *Int. J. Autom. Control Eng.*, 2013.
- [37] M. DesRoches, Reginald and McCormick, Jason and Delemont, "Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars," *J. Struct. Eng.*, vol. 130, pp. 38--46, 2004.
- [38] B. Moradi, Saber and Alam, M Shahria and Asgarian, (2014). "Incremental dynamic analysis of steel frames equipped with NiTi shape memory alloy braces," *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, vol. 23, no. 1406--1425.
- [39] Hooshmand, M and Rafezy, B and Hosseinzadeh, Y. (2015). "Evaluating the Seismic Performance of Steel-SMA Hybrid Braces," *Civ. Eng. Infrastructures J.*, vol. 48, pp. 285--296.
- [40] R. Bajoria, Kamalkishor M and Jadhav, (2017). "Performance assessment of Shape Memory Alloy plates for recovery of seismic deflections in steel frames.
- [41] M.Gholhaki, S.Sabouri, (2008). "Experimental study of two three-story ductile steel plate shear walls". (in Persian)
- [42] S. Asgarian, B and Moradi, (2011). "Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 67, pp. 65--74.