

## بررسی رفتار دیوارهای بتنی مجهز به آلیاژهای حافظه شکلی مارتنازیتی

مهدی قاسمیه<sup>۱\*</sup>، مریم صابردل ساده<sup>۲</sup> و مهناز مصطفی زاده<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> دانش‌آموخته مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

\* نویسنده مسئول

دریافت ۹۴/۶/۱ پذیرش ۹۵/۴/۱۲

### چکیده

توجه به راهکارهایی که بتوان پس از بارگذاری شاهد کرنش‌های پسماند کمتری در دیوارهای برشی بتنی بود همواره مورد توجه پژوهشگران مختلف بوده است. رفتار حافظه‌شکلی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی این امکان را برای آن‌ها به وجود می‌آورد که پس از باربرداری با اعمال تنش و یا دما کرنش‌های پسماند خود را حذف کنند. از این خاصیت می‌توان جهت پیش فشردن دیوارها استفاده نمود. هدف از این مقاله بررسی اثر استفاده از خاصیت حافظه شکلی مواد حافظه‌دار شکلی در دیوارهای برشی با درصد‌های مختلف کاربرد میلگرد آلیاژ حافظه‌دار شکلی می‌باشد. همچنین اثر استفاده از خاصیت حافظه شکلی مواد قبل از بارگذاری و اثر پیش فشردگی بتن توسط این خاصیت مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS رفتار مدل‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر کاهش کرنش‌های پسماند در صورت استفاده از میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی مارتنازیتی می‌باشد که البته پیش کشیدگی قبل از بارگذاری بر اساس رفتار حافظه شکلی ضمن افزایش این اثر موجب افزایش مقاومت نیز می‌گردد.

**واژگان کلیدی:** آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، دیوار برشی بتنی، رفتار حافظه‌شکلی، کرنش پسماند.

### ۱- مقدمه

محققین در سال‌های اخیر به بررسی امکان استفاده از مواد حافظه‌دار شکلی در کاربردهای مهندسی سازه و زلزله پرداخته‌اند. اولین کار در این زمینه به تحقیق Graesser و Cozzarelli بر می‌گردد که آن‌ها امکان استفاده از ماده نیتینول را به عنوان یک میراگر زلزله پیشنهاد دادند. آن‌ها اثر فرکانس و تاریخچه بارگذاری را بر روی میزان جذب انرژی سیم‌های نیتینول بررسی کرده و همچنین یک مدل رفتاری یک بعدی برای مدل‌سازی رفتار شبه‌الاستیک این مواد پیش‌بینی کردند [۱]. Inaudi و Kelly، یک ساختمان چهار طبقه به همراه میراگرهای حافظه‌دار شکلی را توسط میز لرزه‌ای مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که وقتی میزان کشش اولیه میراگرها بر روی فرکانس طبیعی سازه تنظیم شود، رفتار سازه بهبود چشمگیری خواهد یافت [۲]. Sweeney و Hayes [۳] و Clark و همکاران [۴] در تحقیقاتشان چنین نتیجه گرفتند که کابل‌های ساخته شده از مواد حافظه‌دار شکلی می‌توانند تغییر شکل و شتاب پاسخ سازه‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. Adachi و Unjoh در یک آزمایش کاهش یافته ابعادی بر روی مدل یک

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نسبت به سیستم‌های متداول مستهلک کننده انرژی دارای مزایا و ویژگی‌های منحصر به فردی هستند. این آلیاژها از فلزات متفاوتی مانند مس، روی، آلومینیوم، نیکل، تیتانیوم، منگنز و آهن ساخته می‌شوند و به عنوان موادی هوشمند شناخته شده‌اند، عدم نیاز به تعویض پس از زلزله، مقاومت بالا در برابر خوردگی و خستگی، قابلیت بازگشت به حالت اولیه به وسیله اعمال دما، قابلیت استهلاک انرژی زیاد و تحمل کرنش تا حدود ده درصد بدون باقی‌گذاشتن کرنش پسماند از جمله مزایا و ویژگی‌های این مواد است. معروف‌ترین و پرکاربردترین آلیاژ حافظه‌دار شکلی، نیتینول است که ترکیبی از نیکل و تیتانیوم می‌باشد. خصوصیت اصلی این مواد، رفتار سوپر-الاستیک<sup>۱</sup> و حافظه شکلی<sup>۲</sup> آن‌ها است. بدین معنی که قادر به تحمل کرنش‌های بزرگ تا حدود ده درصد، بدون ایجاد کرنش پسماند هستند و همچنین قادر به حذف کرنش‌های پسماند به کمک اعمال دما می‌باشند.

1- Super elastic

2- Memory effect

برنامه اجزا محدود غیر خطی مدل پلاستیسیته برای سازه‌های یک بعدی را با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی مطرح نموده و رفتار آن را بررسی کردند [۱۴]. همچنین Motahari و Ghassemieh به بررسی اثر استفاده از مواد حافظه‌دار شکلی به صورت میراگر پرداختند که نتایج این تحقیق بیانگر کاهش تغییر شکل‌های ماندگار در سازه در اثر استفاده از این مواد می‌باشد [۱۴]. در این پژوهش سازه ده طبقه پیشنهاد شده توسط Ghorbani-Renani و همکاران [۱۵] به عنوان سازه مبنا برای بررسی و مقایسه عملکرد دیوارها انتخاب گردید. این دیوار در تحقیق نامبرده با مقیاس مناسب جهت استفاده در آزمایشگاه به صورت دیواری به عرض ۱/۳ متر، ارتفاع ۲/۷ متر و ضخامت ۰/۲ متر ساخته شد. در این تحقیق آلیاژ حافظه‌دار شکلی با رفتار حافظه‌دار شکلی با درصدهای مختلف جایگزین فولاد موجود در دیوار گردید، این درصدها عبارتند از ۱۲/۵، ۲۵، ۳۷/۵، ۵۰، ۶۲/۵، ۷۵، ۸۷/۵ و ۱۰۰، دیوارهای مدل شده تحت بارگذاری یکنواخت قرار داده شد و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه گردید. ضمناً درصدهای مختلف آلیاژ حافظه‌دار شکلی در دیوار و اثرات آن که همانا پیش‌فشاردهی در سازه می‌باشد مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

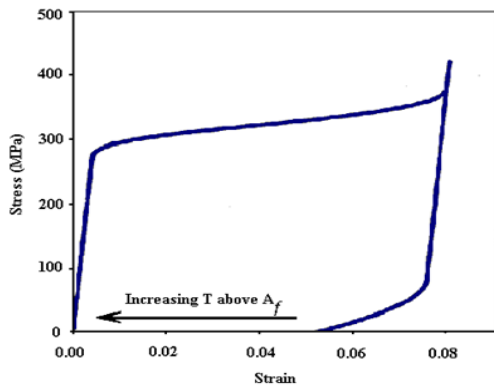
آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به دو صورت کریستالی آستنیت<sup>۳</sup> و مارتنزیت<sup>۴</sup> وجود دارند که رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. این مواد در دماهای بالا به صورت آستنیت و در دماهای پایین به صورت مارتنزیت می‌باشند. حالت آستنیت دارای سختی و تقارن بیشتری نسبت به حالت مارتنزیت می‌باشد. رفتار منحصر به فرد این ماده به دلیل تبدیل از یک حالت به حالت دیگر در اثر تغییر دما و یا تنش می‌باشد که موجب رفتار غیر خطی برگشت پذیر می‌شود. اگر ماده در حالت آستنیت باشد پس از باربرداری کرنش پسماند به جای نمی‌گذارد و این بیانگر رفتار سوپرالاستیک این آلیاژ می‌باشد (شکل (۱-الف)).

اما اگر در حالت مارتنزیت باشد، کرنش پسماند به جای می‌گذارد (منحنی ABC در شکل (۱-ب)) که می‌توان با اعمال دما، کرنش پسماند را به صفر رساند. در این حالت آلیاژ حافظه‌دار رفتار حافظه‌دار شکلی از خود نشان می‌دهد (منحنی CDA در شکل (۱-ب)).

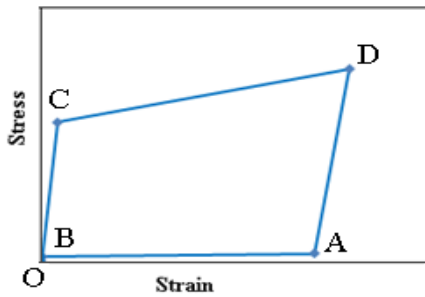
پل، در کشور ژاپن به این نتیجه رسیدند که مواد حافظه‌دار شکلی در حالت مارتنزیت (حافظه شکلی)، رفتار مناسب‌تری نسبت به حالت آستنیت (فوق‌الاستیک) دارند [۵]. Tamai و Kitagawa رفتار کابل‌های حافظه‌دار شکلی و کاربرد آن‌ها در عناصر مقاوم در برابر زلزله در ساختمان‌ها را مورد بررسی قرار دادند [۶]. Wilde و همکاران در یک تحقیق تحلیلی، این مواد را در Base Isolation پایه پل‌ها به کار بردند [۷]. Ohi عناصر مهاربندی حافظه‌دار شکلی NiTiCo را مورد آزمایش قرار داد. مهاربندها پس از اعمال کرنش‌های تا حد ۵ درصد به حالت اولیه خود بازگشتند [۸]. Dolce و Cardone نتایج آزمایش‌های کششی و پیچشی بسیاری بر روی نمونه‌های با ابعاد مختلف و تحت بارگذاری‌های مختلف انجام دادند و میزان جذب انرژی و کرنش پسماند آن‌ها را تحت بارهای شبه استاتیکی و دینامیکی با فرکانس‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند [۹، ۱۰]. DesRoches و Delemont امکان استفاده از نگهدارنده‌های حافظه‌دار شکلی را برای کاهش پاسخ بدنه یک پل چند دهانه با پایه‌های ساده بررسی کردند. اثر استفاده از نگهدارنده‌های پل حافظه‌دار شکلی توسط تحلیل‌های عددی انجام شده صورت پذیرفت. تغییر مکان نسبی پایه و بدنه پل به عنوان ملاک مقایسه در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده بیانگر اثر مناسب جایگزین کردن نگهدارنده‌های پل فولادی با نگهدارنده‌های حافظه‌دار شکلی می‌باشد. با بررسی اثر زلزله نزدیک<sup>۱</sup> بر روی پل مشاهده شد که استفاده از مواد حافظه‌دار شکلی می‌تواند اثر زیادی در بهبود رفتار پل‌ها داشته باشد. این امر به علت سخت‌شدگی نهایی این مواد در کرنش‌های بالا می‌باشد [۱۱]. Ghassemieh و Iranmanesh رفتار یک سازه دارای بادبندهای BRSB که توسط Mahin و Uriz مورد آزمایش قرار گرفته بود، با استفاده از برنامه اجزاء محدود ANSYS برای بادبندهای SMA و BRSB مدل کردند و رفتار رفت و برگشتی (Cyclic) این دو سیستم را با یکدیگر مقایسه کردند، نتایج نشان دهنده عملکرد مناسب این آلیاژها در سازه‌های دارای بادبند بوده است [۱۲]. Abolmaali و همکاران مشخصات استهلاک انرژی اتصالات تی شکل<sup>۲</sup> با پیچ‌های فولادی و حافظه‌دار شکلی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که میزان استهلاک انرژی برای اتصال با بست حافظه‌دار شکلی بیش از نمونه با بست فولادی می‌باشد [۱۳]. Motahari و Ghassemieh با تهیه

3- Austenite  
4- Martensite

1- Near filed earthquakes  
2- T-Stub bolted connections



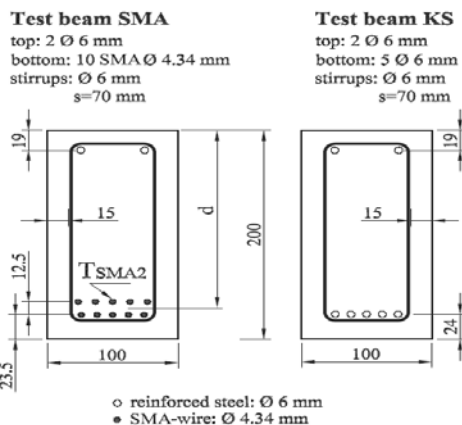
شکل ۲- مشخصات مادی آلیاژ حافظه‌دار شکلی (رفتار حافظه شکلی) [۱۷]



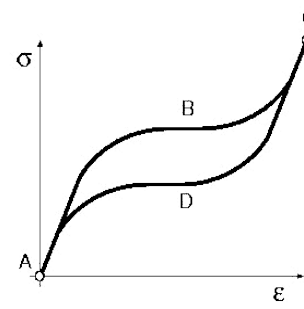
شکل ۳- مدل رفتاری معرفی شده به نرم‌افزار در بارگذاری یکنواخت

#### ۴- بررسی صحت عملکرد مدل رفتاری

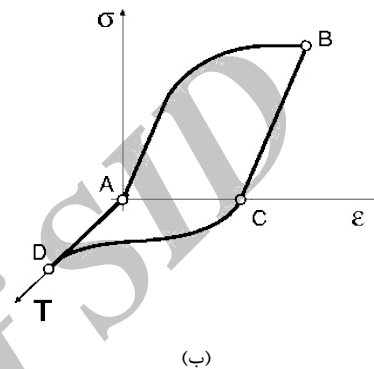
به منظور بررسی صحت عملکرد برنامه در مدل‌سازی بتن و همچنین کنترل زیربرنامه تعریف شده از نتایج آزمایشگاهی مربوط به بارگذاری تیر تحت نیروی ثابت که توسط متولی و همکاران [۱۷] صورت پذیرفته بود استفاده گردید. مشخصات تیر مورد آزمایش قرار گرفته شده و نحوه بارگذاری آن در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است.



شکل ۴- مشخصات تیر آزمایش شده در آزمایشگاه [۱۸]



(الف)



(ب)

شکل ۱- رفتار آلیاژ حافظه‌دار شکلی: (الف) رفتار فوق الاستیک، (ب) رفتار حافظه شکلی

#### ۳- الگوریتم مدل رفتاری حافظه شکلی، ارائه شده توسط کاربر

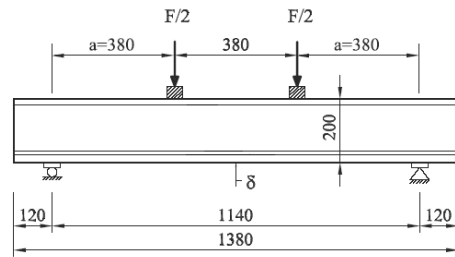
در این تحقیق، به دلیل قابلیت‌های گسترده، از نرم‌افزار ABAQUS، برای انجام تحلیل‌های اجزاء محدود استفاده شده است، اما از آن‌جا که مدل رفتاری حافظه شکلی به صورت پیش‌فرض در این نرم‌افزار تعبیه نشده است، این رفتار که مدل کردن آن از لوازم این تحقیق به شمار می‌رفت، از طریق زیر برنامه، و تحت عنوان رفتار ماده تعریف شده از سوی کاربر<sup>۱</sup> در محیط برنامه‌نویسی Fortran، به نرم‌افزار مذکور شناسانده شده است. رفتار مکانیکی SMA، بر اساس مطالعات Brocca و همکاران [۱۶] مطابق شکل (۲) جهت تعریف در زیربرنامه در نظر گرفته شد.

به علت ویژگی خاص مواد حافظه‌دار شکلی در بازگرداندگی تغییر شکل‌ها با اعمال دما، فرض گردید که در بارگذاری یکنواخت پس از اتمام بارگذاری، به ماده به طور کامل اجازه بازگشت به حالت اولیه داده شده است، در نتیجه مدل رفتاری تعریف شده در زیربرنامه در حالت بارگذاری یکنواخت به صورت شکل (۳) می‌باشد.

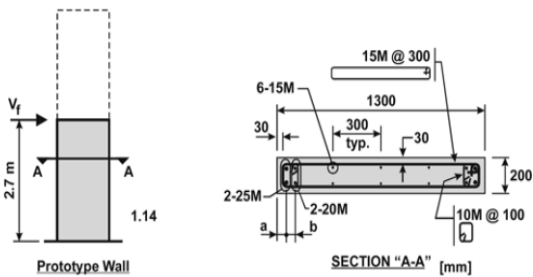
1- User implemented material

### ۵- مشخصات مدل سازه بتنی

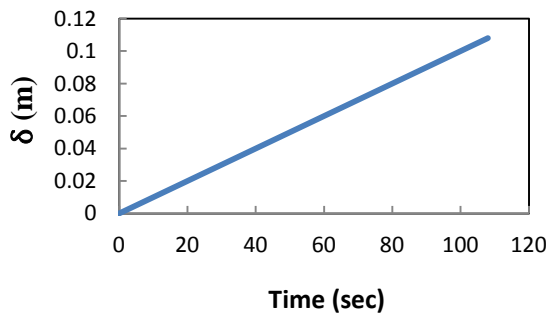
دیوار برشی که توسط Ghorbani-Renani و همکاران در دانشگاه تورنتو آزمایش شده است [۱۵] با استفاده از نرم افزار ABAQUS مدل سازی شد. مدل شماتیک سازه آزمایش شده در شکل (۸) و بارگذاری تغییر مکانی در شکل (۹) نشان داده شده است. این بارگذاری به صورت جابجایی اعمالی به لبه بالای دیوار می باشد. مشخصات مادی و هندسی مدل آزمایش شده در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۵- بارگذاری اعمال شده به تیر آزمایش شده در آزمایشگاه [۱۸]



شکل ۸- مدل شماتیک سازه آزمایش شده در آزمایشگاه [۱۶]



شکل ۹- بارگذاری یکنواخت (بر حسب متر) وارده بر سازه

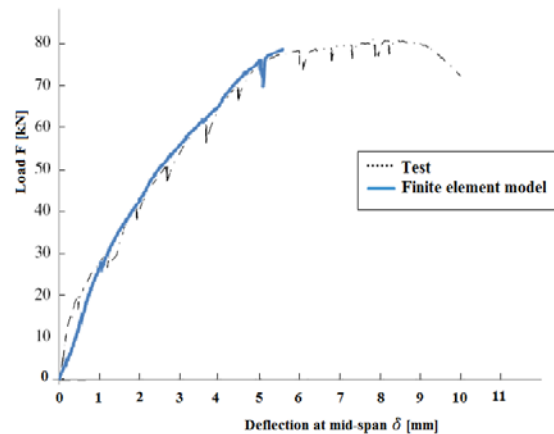
جدول ۱- مشخصات مکانیکی بتن و فولاد مورد استفاده در مدل

[۱۵]

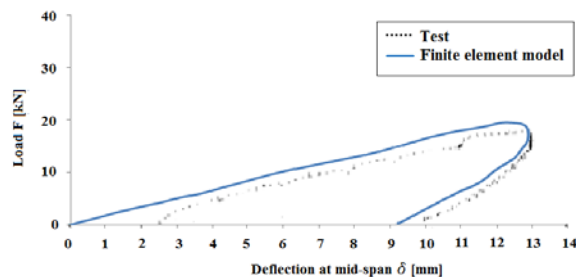
وزن مخصوص ( $\text{kN/m}^3$ )	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت فشاری (MPa)	
۲۸	۰/۲۲۳	۲۹/۱۴	۲۸/۳	بتن
۷۴	۰/۳	۲۱۰	-	فولاد

در این پژوهش مدل هایی شبیه سازی شدند که در آن ها از خاصیت حافظه شکلی مواد قبل از اعمال بارگذاری استفاده گردید. به این ترتیب که قبل از قرار دادن این آلیاژها در دیوار این مواد تحت بارگذاری و باربرداری قرار داده شدند تا مقداری

شکل های (۶) و (۷) نتایج حاصل از مدل سازی در نرم افزار نتایج آزمایشگاهی را در دو تیر بدون آلیاژ حافظه دار شکلی و با آلیاژ حافظه دار شکلی نشان می دهند.



شکل ۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل نرم افزاری در تیر ساده بدون آلیاژ حافظه دار شکلی



شکل ۷- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل نرم افزاری در تیر با آلیاژ حافظه دار شکلی

نتایج بیانگر این مطلب است که زیربرنامه تعریف شده قادر به مدل سازی مناسب رفتار حافظه شکلی در نرم افزار ABAQUS می باشد.

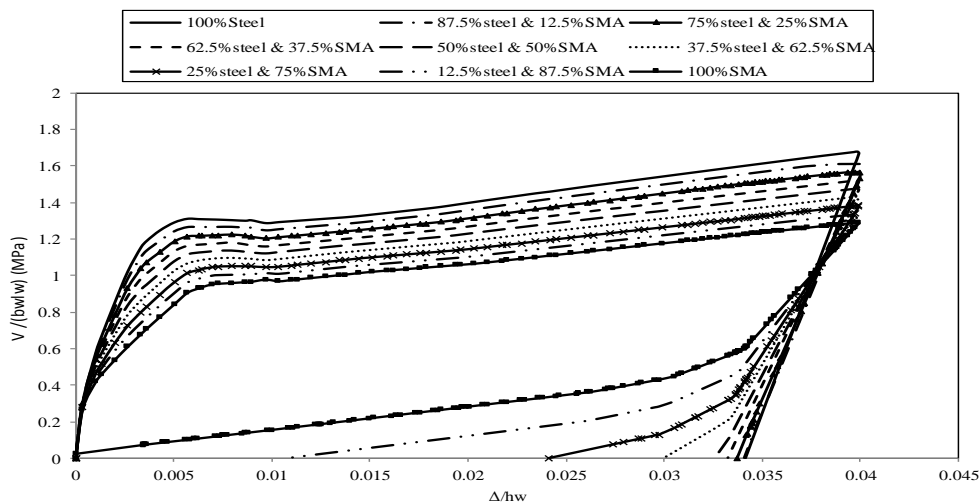
با افزایش درصد آلیاژ حافظه‌دار شکلی در مدل تا ۵۰٪، کاهش تغییر شکل ماندگار به تدریج صورت می‌گیرد و زمانی که درصد این آلیاژ در مدل از درصد فولاد بیشتر می‌شود، تغییر شکل ماندگار به شدت کاهش می‌یابد به صورتی که جایگزینی کامل فولاد با آلیاژ حافظه‌دار شکلی سبب می‌گردد که تغییر شکل ماندگار در مدل صفر شود. این کاهش تغییر شکل ماندگار در مدل با افزایش درصد آلیاژ حافظه‌دار شکلی در حالی صورت می‌پذیرد که با افزایش این آلیاژ، کاهش تنش ایجاد شده در پای دیوار را شاهد هستیم و این نشان دهنده کاهش مقاومتی دیوار است. شکل (۱۰) نشان می‌دهد که افزایش درصد آلیاژ حافظه‌دار شکلی با رفتار حافظه‌شکلی در مدل سبب گردیده تا سطح محصور در نمودار کاهش یابد و این کاهش سطح بیانگر کاهش استهلاک انرژی در مدل می‌باشد. همچنین می‌توان بیان کرد که با وجود کاهش تغییر شکل‌های ماندگار در مدل، افزایش این آلیاژ سبب کاهش مقاومت و استهلاک انرژی شده است. در نتیجه در زمان استفاده از این آلیاژ باید توجه شود که کدام یک از این پارامترها اهمیت بیشتری برای سازه دارد تا با توجه به اهمیت هر پارامتر، استفاده و یا عدم استفاده از این آلیاژ توجیه شود. همچنین شکل (۱۰) بیانگر این مطلب است که تا زمانی که درصد آلیاژ حافظه‌دار شکلی کمتر از ۵۰٪ فولاد مصرفی در مدل است، در زمان بارگذاری این آلیاژ در مرحله الاستیک خود باقی می‌ماند و در نتیجه در هنگام باربرداری تغییر ناگهانی در آن‌ها دیده نمی‌شود، یعنی در هنگام بارگذاری این آلیاژها در مرحله OC از شکل (۳) قرار دارند.

تغییر شکل ماندگار در آن‌ها ایجاد شود، آن‌گاه این مواد در دیوار برشی مورد استفاده قرار گرفتند و قبل از اعمال جابجایی در بام با اعمال دما به این مواد مقدار تغییر شکل ماندگار این مواد حذف گردید، این عمل سبب می‌گردد تا بتن پیش‌فشرده گردد و این امر سبب افزایش مقاومت دیوار می‌شود.

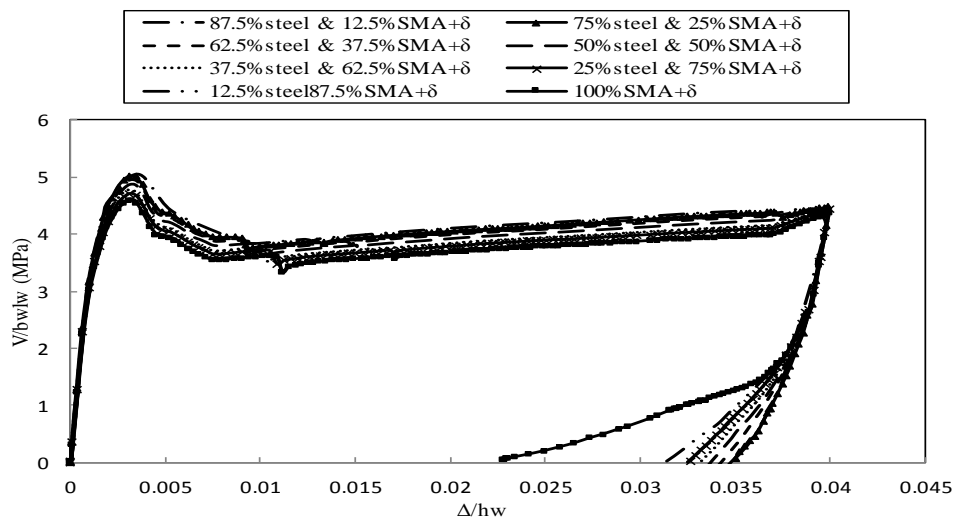
## ۶- نتایج تحلیل

به منظور بررسی مقدار تغییر شکل ماندگار و همچنین تغییر مقاومت در اثر افزایش آلیاژ حافظه‌دار شکلی، مدل تحت بارگذاری استاتیکی یکنواخت قرار گرفت. در این مرحله از مدل-سازی از بارهای اعمالی به دیوار اعم از بار کف و پارتیشن‌بندی صرف‌نظر شده است. نتایج حاصل از این بارگذاری بر روی مدل-های ساخته شده با درصد‌های مختلف آلیاژ حافظه‌دار شکلی که بدون اثر پیش‌فشرده‌گی در نظر گرفته نشده است در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، مدل ساخته شده با ۱۰۰٪ فولاد بیشترین تغییر شکل ماندگار را داشته و همچنین در این مدل بیشترین تنش در پای دیوار در اثر حداکثر جابجایی اعمال شده در بام به وجود می‌آید. با توجه به زیر برنامه تعریف شده، در هنگام باربرداری چنانچه آلیاژ حافظه‌دار شکلی مدل در مرحله‌ای قرار گیرد که با اعمال دما یا نیرو بتواند به حالت اولیه خود ( کرنش صفر) برگردد، این تغییر شکل به طور خودکار به آلیاژ اعمال می‌شود. (چنانچه سطح تنش آلیاژ حافظه‌دار شکلی در قسمت CD از شکل (۳) باشد، با باربرداری وارد مرحله AB می‌شود و به طور خودکار به قسمت B می‌رسد.



شکل ۱۰- مقایسه رفتار مدل تحت بارگذاری یکنواخت



شکل ۱۱- مقایسه رفتار سازه پیش فشرده تحت بارگذاری یکنواخت

فشرده در حدود  $\frac{2}{5}$  برابر مقاومت دیوار بدون پیش فشرده‌گی است. اما نتایج نشان می‌دهند که اعمال پیش فشرده‌گی سبب افزایش تغییر شکل‌های ماندگار در مدل شده است. شکل (۱۱) نشان دهنده این مطلب است که با افزایش آلیاژ حافظه‌دار شکلی بیشتر از  $50\%$  فولاد، کاهش تغییر شکل ماندگار در مدل بدون پیش فشرده‌گی با سرعت بیشتری انجام می‌شود و این کاهش در این مدل‌ها بسیار زیاد است. در حالی که سرعت کاهش این پارامتر در مدل پیش فشرده بسیار کم بوده و تنها در مدل با  $100\%$  آلیاژ حافظه‌دار شکلی شاهد کاهش تغییر شکل ماندگار به میزان قابل توجه هستیم.

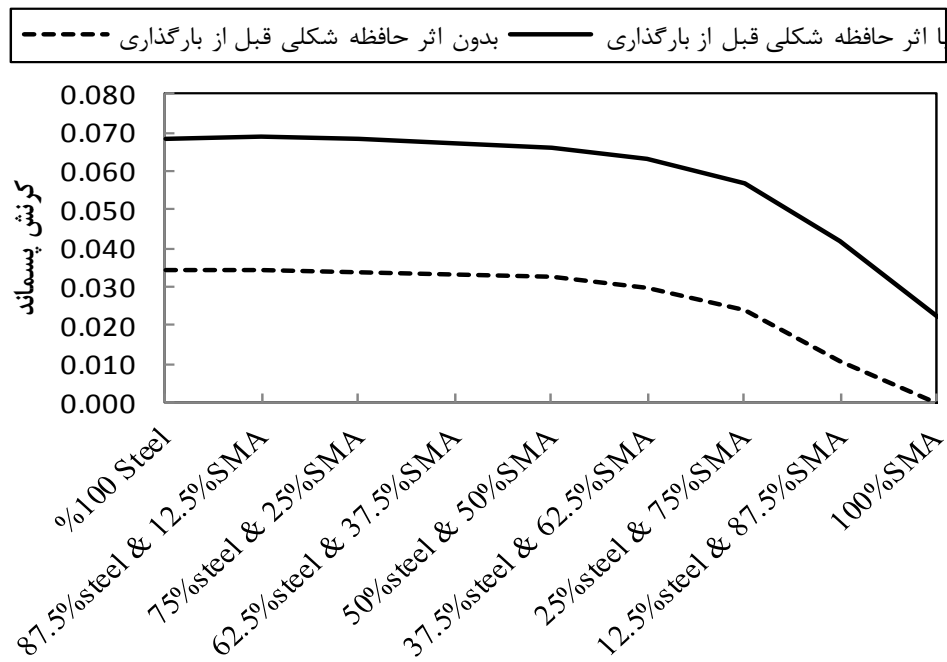
همان‌گونه که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، در مدل‌های با پیش فشرده‌گی همانند مدل‌های بدون پیش فشرده‌گی افزایش آلیاژ حافظه‌دار شکلی سبب گردیده تا مقاومت دیوار کاهش یابد. البته این کاهش مقاومت با کاهش کرنش پسماند همراه بوده است. همچنین این شکل نشان می‌دهد که مدل‌های پیش فشرده، اتلاف انرژی بیشتری نسبت به مدل‌های ساده دارند؛ زیرا در این حالت سطح محصور این منحنی‌ها بسیار بیشتر از سطح محصور منحنی‌های بدون پیش فشرده‌گی می‌باشد.

با توجه به ملاک‌ها و شرایط تأثیرگذار در طراحی سازه، می‌توان درصد آلیاژ حافظه‌دار شکلی و فولاد را تعیین نمود. همچنین می‌توان تعیین نمود که آیا نیازی به استفاده از اثر حافظه شکلی قبل از بارگذاری می‌باشد یا خیر. شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مقایسه‌ای بین کرنش پسماند و تنش ماکزیمم را در مدل بدون اثر حافظه شکلی قبل از بارگذاری و با اثر حافظه شکلی پیش از بارگذاری (پیش فشرده) را نشان می‌دهد.

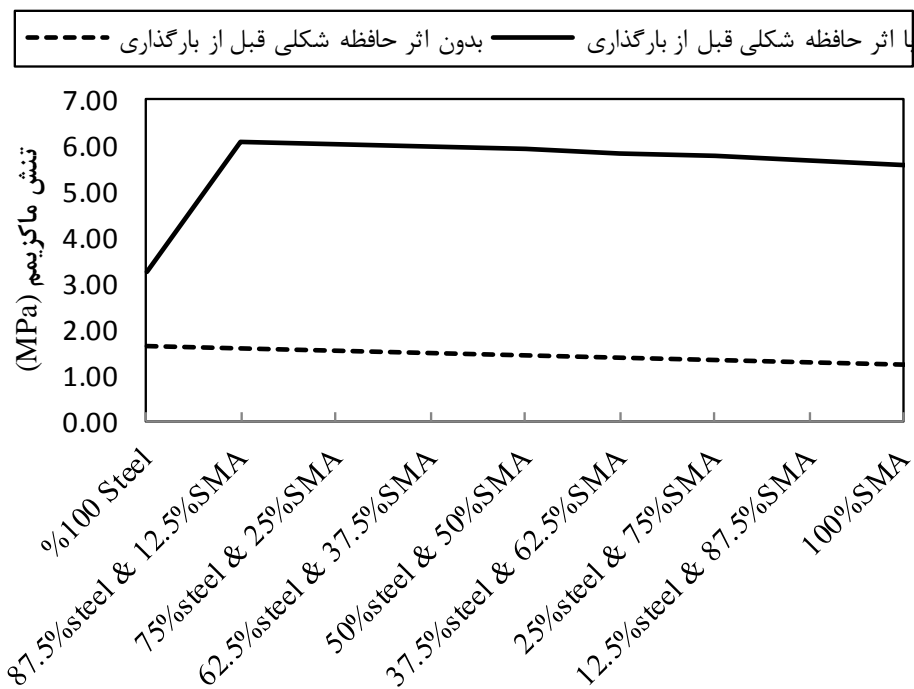
فولاد و آلیاژ حافظه‌دار شکلی در دیوار برشی در حالت اعمال جابجایی به صورت موازی عمل می‌کنند یعنی دارای جابجایی‌های برابر هستند و نیروی منتقل شده به آن‌ها به نسبت سختی آن‌ها می‌باشد. سختی فولاد و آلیاژ حافظه‌دار شکلی متناسب با  $(EI/L^3)$  مربوط به آن‌ها می‌باشد، با فرض ثابت بودن  $L$  برای هر دو ماده خواهیم داشت که سختی این دو ماده متناسب با  $EI$  آن‌ها است. تا زمانی که سطح مقطع فولاد و آلیاژ حافظه‌دار شکلی با هم برابر باشد، با توجه به این مطلب که مدول الاستیسیته فولاد بیشتر از مدول الاستیسیته SMA می‌باشد، سختی خمشی فولاد بیشتر از سختی خمشی SMA می‌شود. در نتیجه نیرویی که به آلیاژ حافظه‌دار شکلی انتقال می‌یابد کمتر از نیرویی است که به فولاد منتقل می‌شود. این نیرو سبب می‌شود تا این آلیاژ وارد مرحله پلاستیک شود، این موضوع را می‌توان از قسمت انتهایی نمودار مربوط به  $50\%$  آلیاژ حافظه‌دار شکلی و  $50\%$  فولاد در شکل (۱۰) دریافت. همچنین شکل (۱۰) نشان می‌دهد زمانی که درصد آلیاژ حافظه‌دار شکلی بیشتر از درصد فولاد در مدل می‌گردد، این آلیاژ به مقدار بیشتری وارد مرحله پلاستیک شده و در نتیجه شکنندگی نمودار در مرحله باربرداری سریع‌تر انجام می‌شود.

شکل (۱۱) نشان دهنده نمودارهای مربوط به مدل در حالت با اعمال رفتار حافظه شکلی (پیش فشرده) می‌باشد.

مقایسه شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان می‌دهند که اعمال پیش فشرده‌گی در سازه سبب گردیده تا رفتار سازه شکل‌پذیرتر گردد. همچنین این عمل سبب افزایش قابل توجه مقاومت دیوار شده است به طوری که در انتهای بارگذاری مقاومت دیوار پیش-



شکل ۱۲- مقایسه کرنش پسماند در مدل‌های بدون اثر حافظه شکلی و با اثر حافظه شکلی پیش از بارگذاری



شکل ۱۳- مقایسه تنش ماکزیمم در مدل‌های بدون اثر حافظه شکلی و با اثر حافظه شکلی پیش از بارگذاری

آلیاژ حافظه دار شکلی، جنبه اقتصادی طرح نیز باید در نظر گرفته شود.

همچنین جدول (۲) مقایسه‌ای بین مدل‌های با اثر حافظه شکلی قبل از بارگذاری و بدون آن را نشان می‌دهد. این جدول معیار مناسبی برای تعیین درصد آلیاژ می‌باشد. در تعیین درصد

فشرده کردن بتن استفاده کرد که در نتیجه شاهد افزایش چشمگیر مقاومت در دیوارهای برشی بتنی خواهیم بود.

#### ۸- مراجع

- [1] Graesser, E. J., Cozzarelli, F. A., "Shape Memory Alloys as New Materials for Seismic Isolation", Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117 (11), 2590-2608
- [2] Inaudi, J., Kelly, J., "Experiments on Tuned Mass Dampers Using Viscoelastic, Frictional and Shpe Memory Alloy Materials", First World Conference on Structural Control, 3-5 August, 1994, pp 127-136.
- [3] Sweeney, S. C., Hayes, J. R., "Shape Memory Alloy Dampers for Seismic Rehabilitation of Existing buildings", 27<sup>th</sup> Joint Meeting-Wind and Seismic Effects, May, 1995.
- [4] Clark, P. W., Aiken, I. D., Kelly, J. M., Higashino, M., Krumme, R., "Experimental and Analytical Studies of Shape Memory Alloy Dampers for Structural Control", SPIE Smart Materials Conference 1996.
- [5] Adachi, Y., Unjoh, S., "Development of Shape Memory Alloy Damper for Inteligent Bridge Systems", SPIE 1999, pp 31-42.
- [6] Tamai, H., Kitagawa, Y., "Pseudoelastic Behavior of Shape Memory Alloy Wire and its Application to Seismic Resistance Member for Building", IWCMM10, Galway, Ireland, August, 2000.
- [7] Wilde, K., Gardoni, P., Fujino, Y., "Base Isolation System with Shape Memory Alloy Devices for Elevated Highway Bridges", Engineering Structures, 2000, 22 (3), 222-229.
- [8] Ohi, K., "Pseudo-dynamic Earthquake Response Tests and Cyclic Loading Tests on Steel Frames Including Pseudo-Elastic Elements", NSF-JSPS, US-Japan Seminar on Advanced Stability and Seismicity Concepts for Performance Based Design of Steel and Composite Structures, Kyoto, Japan, 2001.
- [9] Dolce, M., Cardone, D., "Mechanical Behavior of Shpaememoru Alloys for Seismic Applications-1. Martensite and Austenite Niti Bars Subjected to Torsion", International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43, 2631-2656.
- [10] Dolce, M., Cardone, D., "Mechanical Behavior of Shpae Memory Alloys for Seismic Applications-2. Austenite NiTi wires Subjected to Tension", International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43, 2657-77.

جدول ۲- مقایسه‌ای بین کرنش پسماند و تنش در مدل‌های با و بدون اثر حافظه شکلی پیش از بارگذاری

با اثر حافظه شکلی قبل از بارگذاری		بدون اثر حافظه شکلی قبل از بارگذاری		درصد SMA از کل میلگردها
تنش حداکثر (MPa)	کرنش پسماند (%)	تنش حداکثر (MPa)	کرنش پسماند (%)	
-	-	۱/۶۳۳	۳/۴۲	۱۰۰% Steel
۴/۴۷۹	۳/۴۹	۱/۵۸۵	۳/۴۱	۸۷/۵% Steel & ۱۲/۵% SMA
۴/۴۸۱	۳/۴۸	۱/۵۳۱	۳/۳۷	۷۵% Steel & ۲۵% SMA
۴/۴۹۹	۳/۴۳	۱/۴۸۲	۳/۳۳	۶۲/۵% Steel & ۳۷/۵% SMA
۴/۴۷۷	۳/۳۷	۱/۴۳۷	۳/۲۶	۵۰% Steel & ۵۰% SMA
۴/۴۵۰	۳/۳۱	۱/۳۸۹	۳	۳۷/۵% Steel & ۶۲/۵% SMA
۴/۴۲۳	۳/۲۵	۱/۳۴۲	۲/۴۱	۲۵% Steel & ۷۵% SMA
۴/۳۹۴	۳/۱۱	۱/۲۹۹	۱/۰۹	۱۲/۵% Steel & ۸۷/۵% SMA
۴/۳۵۴	۲/۲۵	۱/۲۵۱	۰	۱۰۰% SMA

#### ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور بررسی رفتار حافظه شکلی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، یک دیوار برشی با درصد‌های مختلف این آلیاژ در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن رفتار حافظه شکلی پیش از بارگذاری تحت بارگذاری یکنواخت قرار داده شد. نتایج حاصل بیانگر این مطلب بوده‌اند که در بارگذاری یکنواخت، با افزایش نسبت میلگردهای آلیاژ حافظه شکلی به میلگردهای فولادی، مقدار کرنش پسماند با توجه به ماهیت آلیاژهای حافظه شکلی کاهش می‌یابد، طوری که مدل با ۱۰۰٪ آلیاژ حافظه‌دار شکلی کم‌ترین کرنش پسماند را دارد. همچنین با توجه به این مطلب که بتن در فشار رفتار بسیار بهتری نسبت به کشش دارد. در نتیجه چنانچه بتوان با تمهیداتی وارد شدن بتن به کشش را به تأخیر انداخت سبب می‌گردد تا رفتار بهتری از این ماده مشاهده شود. رفتار حافظه شکلی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی می‌تواند به عنوان راه حلی برای ایجاد تأخیر در ایجاد ترک در بتن به کار گرفته شود، به این صورت که از این ماده می‌توان برای پیش-



- [11] DesRoches, R., Delemont, M., "Seismic Retrofit of Simply Supported Bridges Using Shape Memory Alloys", *Engineering Structures*, 2002, 24, 325-332.
- [12] Ghassemieh, M., Iranmanesh, A. H., "Finite Element Analysis of Framed Structures Using Shape Memory Alloy Braces Subjected to Seismic Loadings", *ASME/ASCE/SES Conference on Mechanics and Materials*, Baton Rouge, LA, US, 2005.
- [13] Abolmaali, A., Treadway, J., Aswath, P., Lu, F.k., McCarthy, E., "Hysteresis Behavior of t-stub Connections with Superelastic Shape Memory Fasteners", *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62 (8), 831-838.
- [14] Motahari, S. A., Ghassemieh, M., "Multilinear on E-Dimensional Shape Memory Material Model for Use Instructural Engineering Applications", *Engineering Structures*, 2007, 29, 904-913.
- [15] Ghorbani-Renani, I., Velez, N., Tremblay, R., Palermo, D., Massicotte, B., Léger, P., "Modeling and Testing Influence of Scaling Effects on Inelastic Response of Shear Walls", *ACI Structural Journal*, 2009, 106 (3), 358-367.
- [16] Brocca, M., Brinson, L. C., Bazant, Z. P., "Three-Dimensional Constitutive Model for Shapememory Alloys Based on Microplane Model", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2002, 50, 1051-1077.
- [17] Czaderski, C., Hahnebach, B., Motavalli, M., "RC Beam with Variable Stiffness and Strength", *Journal of Construction and Building Materials*, 2006, 20, 824-833.

Archive

## EXTENDED ABSTRACT

# Utilizing Pretension SMAs with Memory Effect Characteristics in Concrete Structure

Mehdi Ghassemieh\*, Maryam Saberdel Sadeh, Mahnaz Mostafazadeh

*School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran*

Received: 23 August 2015; Accepted: 02 June 2016

### Keywords:

Shape memory alloys, Shape memory effect, Pretension, Concrete shear wall

## 1. Introduction

Shape Memory Alloys (SMA) are smart and novel materials that exhibit variable stiffness and strength associated with their different polycrystalline phases. The Shape Memory Effect (SME) and Superelastic Effect (SE) are two distinct properties that make SMA a smart material. Shape memory effect (free recovery effect) means that a large (pseudo-) plastic deformation can be reversed by heating. If the going back is prevented by, e.g., concrete, a stress in the SMA results (constrained recovery effect) [1]. A Superelastic SMA can restore its initial shape spontaneously even from its inelastic range upon unloading.

The specific objective of this study is to investigate the effect of ordinary and pretension SMAs with memory effect behavior in concrete shear walls separately. For this purpose, we analyzed concrete shear walls with different percent of SMAs and steels under monotonic loading in ABAQUS Finite element. Two different concrete shear walls, one reinforced with ordinary SMA together with steel rebars and the other with pretension SMA with steel rebars, have been analyzed. The seismic behavior of the two concrete structure models has been compared in terms of their load against displacement.

## 2. Methodology

### 2.1. SMA parameters

In this study, the SMA characteristics in ABAQUS are introduced as "user implemented material" in FORTRAN subroutine. Mechanical behavior of SMA which represented by Brocca et al. [2] was used for SMA's modeling, see Fig. 1.

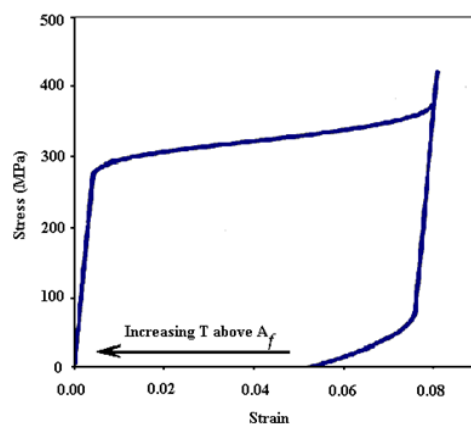


Fig. 1. Mechanical behavior of SMA (memory effect) [1]

\* Corresponding Author

E-mail addresses: m.ghassemieh@ut.ac.ir (Mehdi Ghassemieh), saberdel@ut.ac.ir (Maryam Saberdel sadeh), Mahnaz.mostafazadeh@mavs.uta.edu (Mahnaz Mostafazadeh).

## 2.2. Parameters of the model

Analysis was undertaken on a concrete shear wall model with similar geometry and mechanical properties of the experimental model conducted by Ghorbani-Renani et al. [3]. Geometry and mechanical properties of material used in the experimental model are given in Table 1.

**Table 1.** Geometry and mechanical properties of material

Mechanical properties							Geometry properties		
Steel			Concrete				Thickness (m)	Length (m)	Height (m)
$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	n	$E_c$ (GPa)	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	n	$E_c$ (GPa)	$f_c$ (MPa)			
78	0.3	210	28	0.223	29.14	28.3	0.2	1.3	2.7

## 3. Results and discussion

In this paper, lateral response of model subjected to increasing monotonic loading and then unloading was recorded. The load was applied at the top of the wall in the lateral direction. In analysis concrete wall utilizes the SMAs with memory effect, after unloading takes place; the SMA rebars are heated in order to recover the residual deformations.

Two different reinforcement were used for analysis first concrete shear wall with ordinary SMA and steel rebars, second concrete shear wall with pretension SMA with steel rebars.

Table 2 shows the comparison of the results obtained from models without SMA's pretension and with SMA's pretension.

**Table 2.** Comparison between model results

		100% Steel	87.5% steel & 12.5% SMA	75% steel & 25% SMA	62.5% steel & 37.5% SMA	50% steel & 50% SMA	37.5% steel & 62.5% SMA	25% steel & 75% SMA	12.5% steel & 87.5% SMA	100% SMA
		Without SMA's pretension	Residual strain (%)	3.42	3.41	3.37	3.33	3.26	3	2.41
	Maximum stress (MPa)	1.633	1.585	1.531	1.482	1.437	1.389	1.342	1.299	1.251
With SMA's pretension	Residual strain (%)	--	3.49	3.48	3.43	3.37	3.31	3.25	3.11	2.25
	Maximum stress (MPa)	--	4.479	4.481	4.499	4.477	4.45	4.423	4.394	4.354

As shown in Table 2, replacing steel reinforcement by SMA caused reduction in residual displacement (in both models) and it lead to decrease the strength of concrete shear wall in models without SMA's pretension but in models with pretension SMA replacing steel reinforcement by SMA until 50% increase the concrete shear walls strength and replacing more than 50% lead to decreasing strength of models.

From the results obtained, using pretension SMA with memory effect instead of ordinary SMA with memory effect in concrete shear wall causes strength and residual displacement of shear wall to increase.

## 4. Conclusions

Analysis results showed that although using ordinary SMAs with memory effect characteristic in concrete shear walls caused decrease in residual displacement, they also caused decrease in wall's strength as well. On the other hand, since concrete is weak in tension, using pretension SMAs instead of ordinary SMA caused increase in wall's strength and decrease in residual displacement. Therefore, utilizing pretension SMAs with memory effect characteristics in concrete shear wall instead of ordinary one can decrease residual strain after unloading and improve concrete behavior in tension, to some extent.

## 5. References

- [1] Czaderski C., Hahnebach B., Motavalli M., "RC Beam with Variable Stiffness and Strength", Journal of Construction and Building Materials, 2006, 20, 824-833.
- [2] Brocca, M., Brinson, L. C., Bazant, Z. P., "Three-dimensional Constitutive Model for Shape Memory Alloys Based on Microplane Model", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2002, 1051-1077.
- [3] Renani, I., Velev, N., Tremblay, R., Palermo D., Massicotte, B., Léger, P., Modeling and Testing Influence of Scaling Effects on Inelastic Response of Shear Walls", ACI Structural Journal, 2009, 106, 3.