

Behavior of the Concrete Shear Walls, Reinforced with Shape Memory Alloys via Finite Element Method

Mehdi Ghassemieh*

*Professor of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
m.ghassemieh@ut.ac.ir*

Seyed Ali Nojoomi

Former graduate student of Structural Engineering, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

In this research, numerical modeling and evaluation of using new smart alloys in concrete shear wall structures is investigated via finite element method. For this purpose, two 5-story concrete shear walls, one of which is without opening and the other is with openings, are modeled in Abaqus software. In these shear walls, steel and shape memory reinforcement with different percentages were installed. Then, the results of seismic behavior analysis after installing members made of shaped-memory alloys in reinforced concrete shear wall with interface joint beams are presented. The results are compared with the response of shear wall structures without these members. There are no shape memory bars in the reference shear wall and all its reinforcements are steel. Utilizing finite element analysis and comparing the behavior between reference shear wall and shear wall by using shaped-memory alloys, results in improving seismic behavior and dramatically reducing residual deformation in shear wall structure. In static loading, similar results were observed, indicating the elimination of permanent deformation by these alloys.

Keywords: *Shaped-Memory Alloy; Ductility; Concrete Shear Wall; Energy Absorption Methods; Finite Element Method*

بررسی رفتار دیوارهای برشی بتنی تقویت شده با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به روش اجزا محدود

دریافت مقاله: ۱۶-۰۱-۱۳۹۹

پذیرش مقاله: ۱۵-۰۲-۱۳۹۹

مهدی قاسمیه*

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

m.ghassemieh@ut.ac.ir

سید علی نجومی

دانش آموخته مهندسی سازه، دانشگاه تهران

چکیده

در این تحقیق مدلسازی و ارزیابی عددی استفاده از آلیاژهای هوشمند در سازه‌های دیوار برشی بتنی به روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور دو دیوار برشی بتنی ۵ طبقه که یکی از آنها بدون بازشو و دیگری دارای بازشو است، در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی می‌شود. در این دیوارها آرماتورهای حافظه‌دار شکلی و فولاد با درصدهای مختلف جایگذاری شد. سپس نتایج حاصل از تحلیل رفتار لرزه‌ای پس از نصب اعضای ساخته شده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در دیوار برشی بتنی مسلح دارای بازشو و تیرهای پیوند رابط ارائه گردیده و با پاسخ سازه‌های دیوار برشی مرجع مقایسه شده است. در دیوار برشی مرجع هیچ آرماتور حافظه‌دار شکلی وجود ندارد و همه آرماتورهای آن از فولاد است. از جمله تحلیل‌های بکار رفته در این بررسی، تاریخچه زمانی به روش اجزا محدود است. با استفاده از این نوع تحلیل و مقایسه رفتاری بین دیوار برشی مرجع و دیوار برشی با بکارگیری آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، بهبود رفتار لرزه‌ای و کاهش چشمگیر تغییرشکلهای نهایی و ماندگار در سازه دیوار برشی با آلیاژ حافظه‌دار شکلی مشخص می‌گردد. در تحلیل‌های استاتیکی در یک بارگذاری رفت و برگشتی نیز نتایج مشابه مشاهده شد که حاکی از حذف تغییر شکل ماندگار توسط این آلیاژها بود. واژه‌های کلیدی: آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، شکل پذیری، دیوار برشی بتنی، روش‌های جذب انرژی، روش اجزاء محدود.

یک روش متداول و اقتصادی طراحی سازه‌ها در برابر زلزله، ایجاد امکان ورود بخش‌هایی از سازه در شرایط بحرانی بارگذاری زلزله به حالت مومسان (پلاستیک)، از طریق یک سازوکار پیش تعیین شده و دارای طراحی مناسب است. اما از آنجایی که ارضای شرایط طراحی خیلی شکل پذیر برای سازه‌های دیوار برشی بتنی دشوار می‌باشد، امکان کنترل مکانیکی سازه بوسیله استفاده از اعضای که ویژگی‌های سختی و میراکنندگی قابل توجهی داشته باشند و از طرفی پس از اتمام بارگذاری بحرانی زلزله کرنش‌ها و تغییرشکلهای پسماند ناچیزی در آنها بجای بماند، درپچه‌ای بسوی کاهش خسارات و لطمات زلزله و خدمت پذیری بهتر ساختمانها پس از اتمام این بارگذاری سنگین خواهد بود. هنگامی که ساختمانها در معرض زلزله یا امواج تحریک ناشی از انفجار قرار می‌گیرند، ضروری است بخشی از محتوای انرژی تحمیل شده به سازه از طریق مسیرها و فرایندهای مشخص و دارای ظرفیت جذب انرژی کافی، به شیوه ایمن و با کمترین خسارات ممکن، مستهلک گردد؛ تا از تأثیرات مخرب یک چنین پدیده‌ای با الگوهای بارگذاری نامشخص و غیرقابل پیش بینی کاسته شود.

تجربیات زلزله‌های اخیر نشان داده که نبود سازوکارهای جذب انرژی مناسب یکی از دلایل رفتار ضعیف ساختمانها است. بسیاری از ساختمان‌های چندین طبقه دارای دیوارهای برشی در اطراف حفره‌های آسانسور یا راه‌پله هستند که این دیوارهای برشی سختی جانبی قابل توجهی را برای ساختمان در برابر بارگذاری‌های جانبی مثل زلزله و باد تأمین می‌کنند. تیرهای پیوند می‌توانند باعث ایجاد رفتار قابی در سازه باشند، به همین دلیل در طول زلزله باید توانایی ورود به مرحله رفتار غیرخطی و پس از تسلیم را داشته باشند. بنابراین و با توجه به نسبت دهانه به ارتفاع کم، احتیاج به فولادگذاری پیچیده و متراکم دارند تا بتوان رفتار شکل پذیر از آنها انتظار داشت. از طرفی بدلیل احتیاج به فولادگذاری قطری (خاموتها) و سایر ملاحظات اجرایی، فرآیند ساخت آنها نیز دشوار است. روش معمول در طراحی ساختمان‌های چندین طبقه آن است که نقاط خاص را بعنوان مفصل خمیری و معمولاً در تیرها در نظر می‌گیرند و آنها را برای این منظور جزئیات بندی و طراحی می‌کنند. این نقاط طوری طراحی می‌شوند که امکان استهلاک بخش قابل ملاحظه‌ای از انرژی تحمیل شده به سازه در آنها از طریق ورود به محدوده ناکشسان وجود داشته باشد و از طرفی کمترین میزان کرنشها و تغییر شکلهای ماندگار در کل سازه را امکانپذیر نمایند. بطور خاص برای دیوارهای برشی بتنی، استهلاک انرژی زلزله با استفاده از انواع ساز و کارهای مکانیکی از جمله میراگرها مطالعه شده [۱]. اما نتایج بطور کامل ارضا کننده نیازها و معیارهای عملکردی نبوده‌است. محدوده ممکن به نسبت کوچک تغییر شکلهای کشسان این دسته از سازه‌ها، نیاز به اعضا و یا ساز و کارهای تقویت کننده‌ای که در عین داشتن سختی و شکل پذیری مناسب، فراهم کننده خواص میرایی و استهلاک انرژی کافی برای سازه اصلی در حین زلزله (یا هر بارگذاری ناگهانی جانبی دیگر) باشند را بیش از پیش آشکار می‌کند. امکان فراهم آوردن سختی و شکل پذیری مناسب و کافی، همزمان با ارضای نیازمندیهای سرویس دهی و بازگشت به شکل اولیه سازه و کمینه شدن کرنشهای پس ماند نهایی، در سازه‌های دیوار برش بتنی امری دشوار بنظر می‌رسد. زیرا بعد از وقوع رفتارهای خمیری همواره بخشی از تغییر شکلهای بصورت ماندگار و دائمی در سازه باقی می‌مانند. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی که با نام لاتین Shape Memory Alloy - SMA شناخته می‌شوند، موادی هوشمند هستند که به دلیل برخورداری از خصوصیات مکانیکی و ترمومکانیکی ویژه بسیاری از نیازمندیهای فوق را برآورده می‌سازند. کارآمدی و اثر بخشی استفاده از این مواد و آلیاژ در صنعت ساختمان سابقه چندانی ندارند. بررسی امکان، کاربرد، توانایی‌ها و قابلیت‌های استفاده از این نوع آلیاژها در تحقیق [۲] ارائه شده است.

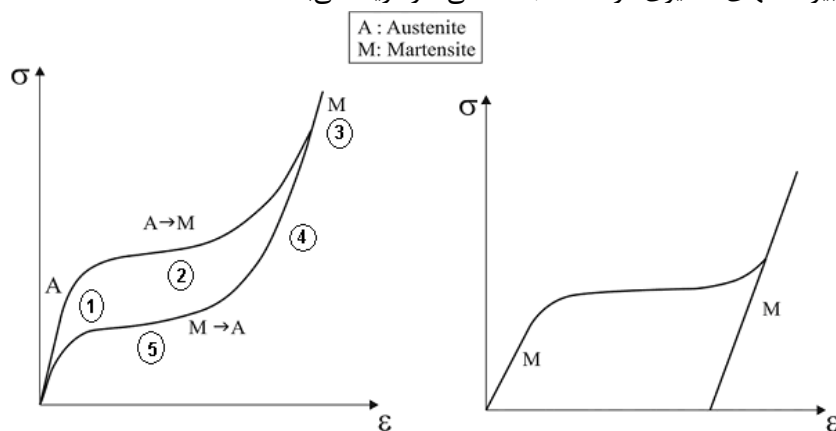
در سال‌های اخیر محققین بسیاری اثر استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی را در کاربردهای لرزه‌ای مورد بررسی قرار داده‌اند. برونو و والنته [۳] با روشهای تحلیلی و با استفاده از ایده شاخصهای خرابی و با استفاده از الگوی ساده شده مواد حافظه دار شکلی، امکان استفاده از این مواد را به صورت تحلیلی بررسی کردند. به این منظور یک تحلیل

مقایسه ای بین سازه های بتن مسلح مقاوم شده با مصالح سنتی و مصالح مقاوم شده با آلیاژهای حافظه دار شکلی به عنوان میراگر و همچنین به عنوان مهاربند انجام دادند. کاردونه و همکاران [۴] به بررسی آزمایشگاهی قابهای بتن مسلح مقاوم سازی شده با میراگرهای مستهلک کننده و بازگرداننده پرداختند. چادرسکی و همکاران [۵] به بررسی رفتار ویژه یک تیر بتن مسلح با سیم های حافظه دار شکلی پرداختند. نتایج بررسی بیانگر امکان استفاده از سیم های حافظه دار شکلی در تیرهای بتن مسلح به منظور بدست آوردن سختی و مقاومت متغییر می باشد. دسروچ و دلمانیت [۶] آزمایش های متعددی را بر روی سیمها و میلله های مواد حافظه دار شکلی برای ارزیابی پتانسیل آنها در طراحی و بهسازی لرزه ای سازه ها انجام داده اند. دلچه و همکاران [۷ و ۸] رفتار مکانیکی مواد حافظه دار شکلی را برای کاربردهای لرزه ای مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعات رشته های متعدد نیکل-تیتانیوم تحت بارگذاری کششی قرار داده شد و رفتار فراکشسان آنها بررسی گردید، همچنین وابستگی پاسخ رفتاری به دما، سرعت بارگذاری و تعداد چرخه ها مورد بررسی قرار گرفت. قاسمیه و همکاران [۹] به بررسی اثر استفاده از رشته های مواد حافظه دار شکلی به صورت مهاربندی (میراگر) در بازشو دیوارهای برشی بتن مسلح پرداختند و نتایج به دست آمده بیانگر عملکرد مناسب این میراگرها بوده است. مطهری و همکاران [۱۰] به بررسی اثر استفاده از مواد حافظه دار شکلی به صورت میراگر پرداختند. نتایج این تحقیق بیانگر کاهش تغییرشکلهای ماندگار در سازه در اثر استفاده از این مواد می باشد. اندریلی و همکاران [۱۱] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به بررسی اثر استفاده از مواد حافظه دار شکلی به منظور بازسازی سازه های قدیمی پرداختند. ویلده و همکاران [۱۲] به بررسی امکان استفاده از سیستمهای جداگر پی متغییر همراه با مواد حافظه دار شکلی برای پلهای بلند پرداختند. سیستم جداگر حافظه دار شکلی در زلزله های با شدت کم، به عنوان نگهدارنده صلب مابین پایه و عرشه پلهای عمل می کند. برای اولین بار قاسمیه و همکاران [۱۳] اقدام به استفاده از این آلیاژهای حافظه دار شکلی در دیوار برشی نمودند و در آن مطالعه درصدهای مختلفی از آن آلیاژها و تاثیرات آنرا بصورت عددی مطالعه نمودند. در ادامه آن تحقیق، قاسمیه و همکاران [۱۴] اقدام به بررسی استفاده از آلیاژهای حافظه دار در سازه های بتن مسلح و تحت اثر زلزله و پس لرزه نمودند و تاثیرات اینگونه آلیاژها را در رفتار سازه های بتنی ملاحظه نمودند. آرین و قاسمیه [۱۵ و ۱۶] تاثیر آلیاژهای حافظه دار را در پل های بتنی و تحت اثر مولفه های جانبی و قائم زلزله مطالعه نمودند. قاسمیه و همکاران [۱۷] بصورت عددی و با استفاده از روش اجزاء درشت (macro) تحلیل هائی به روی دیوارهای برشی بتن مسلح با استفاده از آلیاژهای حافظه دار و بدون آن مطالعه نموده و تاثیرات آن آلیاژها را گزارش نمودند. خالو و همکاران [۱۸-۱۹] در پژوهشهایی امکان استفاده از آلیاژهای سوپرالاستیک را در سازه های قاب خمشی بتنی مورد بررسی قرار دادند. آنها از آلیاژهای نیتینول به عنوان میلگرد استفاده کردند و توانستند تغییر شکل ماندگار سازه را کاهش دهند.

در این تحقیق سعی گردیده تا با استفاده از روش اجزاء محدود تاثیر و بکارگیری آلیاژهای حافظه دار شکلی در دیوارهای برشی بتن مسلح با بازشو و بدون بازشو بررسی شود. از مواردی که میتوان به نقش و اهمیت این نوع آلیاژها پی برد، توانائی در کاهش جابجائی و جابجائی های ماندگار در طبقات است که در این مطالعه با استفاده از روش تحلیل تاریخچه زمانی این کمیتهای بررسی و ارائه می گردند.

آلیاژهای حافظه دار شکلی آلیاژهای هستند که سختی کافی و شکل پذیری فوق العاده را به همراه قابلیت بازگشت به حالت اولیه در هر حالتی از کرنش را همزمان دارند. این نوع آلیاژها بعد از تحمل تغییر شکلهای خمیری قابل توجه، امکان بازگشت به حالت و شکل اولیه خود را دارند؛ و یا در مرحله رفتاری دیگر خود در صورت اعمال حرارت تمایل به برگشت به شکل اولیه خود را پیدا می کنند. در بازه های خاصی از دما یا در شرایط مشخصی، رفتار ماده بصورت ابر کشسان (Superelastic) است که تا حدود کرنشهای ده درصد، در این شرایط پس از مراحل باربرداری به شکل اولیه خود بازمی گردد (شکل ۱). آلیاژهای حافظه دار شکلی در دو حالت کریستالی به نامهای آستینیت و

مارتنزیت موجود می باشند. حالت آستنیت حالت اصلی با تقارن بالا بوده و حالت مارتنزیت حالت محصول با تقارن کمتر می باشد. آستنیت در دماهای بالا و تنشهای پایین و مارتنزیت در دماهای پایین و تنشهای بالا پایدار می باشند. لذا با اعمال بارگذاریهای حرارتی و یا مکانیکی این دو حالت می توانند به یکدیگر تبدیل شوند. اشکال مختلف مارتنزیت نیز می توانند در دماهای پایین به یکدیگر تبدیل شوند و فرآیند جهت گیری مجدد و یا Twinning و Detwinning شکل خواهد گرفت [۳]. با وجود اینکه رفتار حافظه دار بودن شکلی (شکل ۱) از آلیاژهای حافظه دار شکلی در ۴۰ سال گذشته شناخته شده بود، این ماده تا کنون برای استفاده در تعمیر و بهسازی رفتار ساختمان بکار گرفته نشده است. امروزه امکان استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی در ساختمان سازی و بخصوص در تعمیر و بهسازی بطور وسیع وجود دارد. بدلیل طبیعت ترمومکانیکی تبدیل حالت، رفتار مواد حافظه دار شکلی وابسته به سرعت بارگذاری می باشد. در بارگذاری های با سرعت پایین در هنگام تبدیل حالت، گرما آزاد شده و دمای ماده ثابت خواهد ماند. این فرآیند به عنوان فرآیند همدمای شناخته می شود ولی در بارگذاریهای با سرعت بالا مانند بارگذاری های زلزله ماده وقت کافی برای مبادله حرارت با محیط را نخواهد داشت و گرمای نهان ماده موجب می شود که دمای نمونه تغییر کند. این فرآیند نیز به عنوان فرآیند بی دررو در ادبیات فنی شناخته شده است. همانطور که در شکل ۱ بصورت شماتیک منحنی های تنش- کرنش رفتار فراکشسان آلیاژهای حافظه دار شکلی دیده می شود؛ این رفتار در واقع پنج شاخه کلی دارد [۳]. شاخه های ۱ و ۴ مربوط به تغییر شکلهای الاستیک در دو حالت پایدار آلیاژهای حافظه دار شکلی آستنیت و مارتنزیت است. شاخه های ۲ و ۳ به ترتیب مربوط به تغییر فاز مسیر رفت (از آستنیت به جدا شدگی مارتنزیت) و برعکس (از جداشدگی مارتنزیت به آستنیت) می باشد. شاخه ۵ مربوط به تغییر شکلهای خمیری در حالت جداشدگی مارتنزیت می باشد.



شکل ۱- منحنی های رفتاری دوگانه آلیاژهای حافظه دار شکلی [۲]

۲- اهداف تحقیق

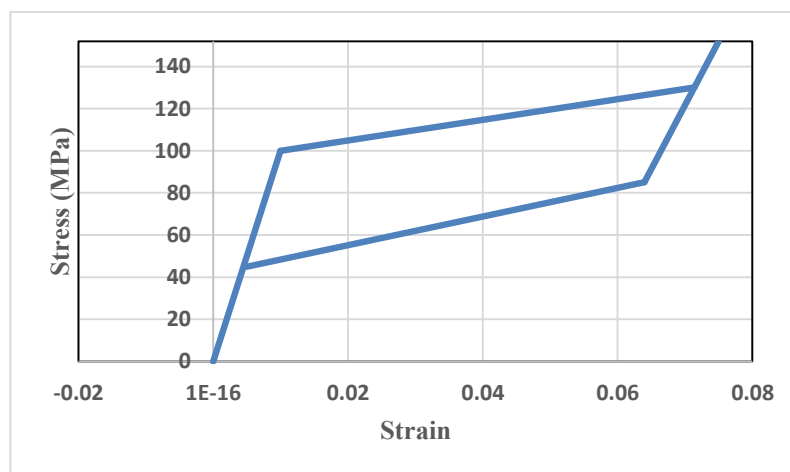
در این تحقیق مدلسازی عددی دیوار برشی با استفاده از آلیاژهای حافظه دار و همچنین بدون آلیاژهای یادشده به روش اجزاء محدود انجام گردیده است. برای دیوار برشی بتن مسلح از رفتار ابرکشسان این آلیاژ بهره برده شده و امکان بهبود لرزه ای دیوارهای برش بوسیله آنها مورد بررسی قرار گرفته است. روش پیشنهادی شامل استفاده از سیمها و یا رشته های آلیاژهای حافظه دار شکلی بصورت تسلیح در دیوار در کل دیوار برش بتن مسلح است. بطور خاص استفاده از این آلیاژها بمنظور تعمیر و ارتقای رفتار این نوع سازه ها است. در صورت نیاز و به عنوان یک کاربرد خاص، نصب اعضای از آلیاژهای حافظه دار شکلی به عنوان مهاربند می تواند بصورت مهار آنها به صفحات خاصی باشند که به اجزای سازه دیوار چسبیده اند.

۳-مدلسازی عددی دیوارهای برشی

در این تحقیق، بدلیل قابلیت‌های گسترده، از نرم‌افزار ABAQUS، برای انجام تحلیل‌های اجزای محدود استفاده شده است [۲۰]. اما از آنجا که مدل رفتاری ابرکشسان (Superelastic) بصورت پیش‌فرض در این نرم‌افزار تعبیه نشده است، این رفتار که مدل کردن آن از لوازم این تحقیق بشمار می‌رفت، تحت عنوان "رفتار ماده تعریف شده از سوی کاربر" "User Implemented Material" در محیط برنامه‌نویسی Fortran، به این نرم‌افزار شناسانده شده است. برای اطمینان از صحت و توانایی الگوریتم رفتار ماده تعریف شده در نرم‌افزار، چندین نمونه مدل اجزاء محدود از اجزاء مختلف با این ماده تحت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی ساخته و آزمایش شدند تا از مطابقت کامل مدل رفتاری ارائه و اعمال شده با پژوهش‌های آزمایشگاهی اطمینان حاصل شود. در الگوریتم رفتاری یاد شده این امکان در نظر گرفته شده تا بتوان اثر تغییر پارامترهای مختلف رفتار ابرکشسان، در آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بررسی شود. در مدلهای بکار رفته مشخصات مکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در جدول ۱ و نمودار تنش و کرنش رفتار ابر کشسان در شکل ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی آلیاژ بکار رفته

مقدار	مشخصات مکانیکی
۱۰ GPa	ضریب کشسان
۱۰۰ MPa	تنش ورود از رفتار آستنیت به مارتنزیت
۱۳۰ MPa	تنش اتمام رفتار تبدیل از آستنیت به مارتنزیت
۸۵MPa	تنش آغاز مجدد رفتار آستنیت (تبدیل از مارتنزیت)
۴۵MPa	تنش اتمام روند تبدیل از رفتار مارتنزیت به آستنیت
۹	درصد محدوده کرنش‌ها برای رفتار پایدار فراکشسان
۶۵ kN/m ³	وزن مخصوص



شکل ۲- نمودار تنش-کرنش رفتار ابرکشسان مدل عددی

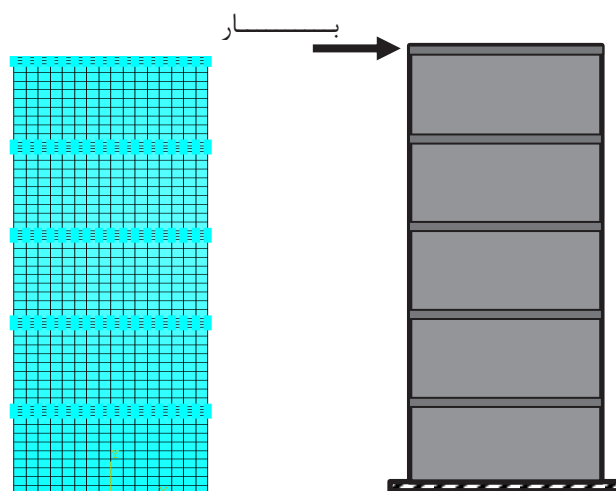
۳-۱- هندسه مدل

برای بررسی امکان بهسازی سازه‌های دیوار برشی بتن مسلح با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، چند دسته مدل ساخته شد که به آنها اشاره می‌گردد.

۳-۱-۱- مدل دیوار بتن مسلح بدون بازشو

مدلی از دیوار بتن مسلح ساده بدون بازشو و با ابعاد هندسی و شبکه بندی (شکل ۳) و مشخصات به شرح زیر ساخته شده که نتایج تحلیل‌های لرزه‌ای مختلف انجام شده بر روی آن به قرار زیر است.

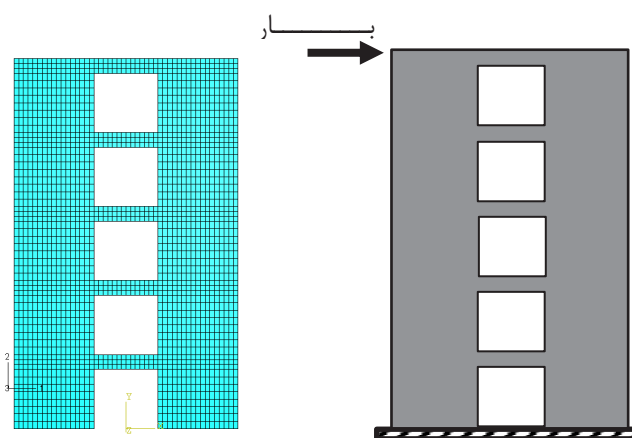
هندسه مدل: دیواری به عرض دهانه ۵ متر و ارتفاع ۱۵ متر و ضخامت ۳۰ سانتی‌متر و بار مرده در هر طبقه بصورت متمرکز در تراز طبقات ۱۲۰۰ تن می باشد. پایه دیوار برشی به صورت صلب مدل شده و بار جانبی استاتیکی به بالای آن وارد می شود.



شکل ۳- مدل دیوار برشی ۵ طبقه، بدون بازشو

۳-۱-۲-۳- مدل دیوار بتنی دارای بازشو

مدل دیوار برشی بتنی دارای بازشو با ابعاد هندسی و شبکه بندی اجزاء محدود (شکل ۴) و مشخصات به شرح زیر ساخته شد که همانند سری مدل های قبلی چندین نوع تحلیل مختلف روی آنها صورت پذیرفته است. هندسه مدل: دو دیوار به عرض های ۳ متر و ارتفاع ۱۵ متر و ضخامت ۳۰ سانتیمتر که توسط تیرهای پیوند به ابعاد ۲,۴ متر طول، ۶۰ سانتیمتر ارتفاع و ۳۰ سانتیمتر ضخامت دارند پیوند خورده اند؛ مدل گردیده. بار مرده در هر طبقه بصورت متمرکز در تراز طبقات و به مقدار ۱۲۰۰ تن در نظر گرفته شده است. پایه دیوار برشی به صورت صلب مدل شده و بار جانبی استاتیکی به بالای آن وارد می شود.

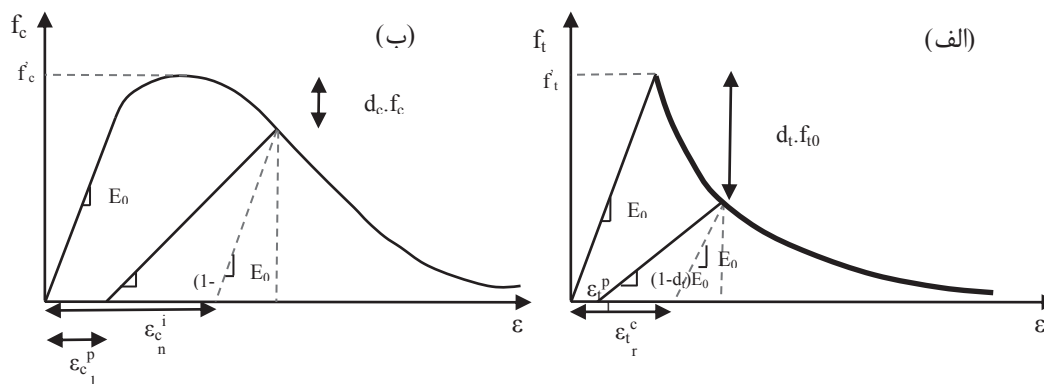


شکل ۴- مدل دیوار برشی ۵ طبقه دارای بازشو

المان های بکار رفته در ناحیه بتنی مدل از نوع المان های Solid مکعبی ۸ گره ای (C3D8) می باشند و به علت آنکه آرماتورهای موجود در دیوار تنها دارای رفتار محوری کششی و فشاری هستند از المان های (T3D2) Truss جهت مدل سازی آرماتورهای دیوار استفاده شده است. در مدل عددی، آرماتورهای دیوار برشی می بایست با المان های

بتنی دیوار برشی در همکنش داشته باشند که برای ایجاد آن از اندرکنش embedded region مابین آرماتور و بتن دیوار برشی بکار گرفته شده است.

بتن ماده‌ای با رفتار پیچیده‌ایست که بسته به آسیب‌های وارده در طول بارگذاری، از خود سختی‌های مختلفی نشان می‌دهد. بنابراین در نظر گرفتن آسیب بتن و تأثیر آن بر سختی بتن در مدل‌سازی عددی و صحت رفتار مدل بسیار حائز اهمیت است. مدل پلاستیسیته آسیب^۱ (CDP) مدلیست که توسط فنوس و لی ارائه شده است که در آن برای کرنش‌های کششی و فشاری مختلف برای بتن ضریب آسیب قائل می‌شود [۲۱]. به همین منظور در این مقاله از CDP جهت شبیه‌سازی رفتار بتن دیوار برشی استفاده شده است. در مدل CDP، ضریب آسیب کششی (D_t) و فشاری (D_c) در محدوده مابین صفر و یک تعریف می‌شوند که عدد صفر در آن نشانگر سالم بودن بتن، عدد یک در فشار نشانگر خردشدگی کامل و در کشش نشانگر ترک خوردگی کامل است. ضریب آسیب بتن با کرنش پلاستیک رابطه مستقیم دارد و در بارگذاری‌های رفت و برگشتی سختی بتن را کاهش می‌دهد. شکل ۵ رفتار بتن را در یک طول فرایند بارگذاری-باربرداری در محدوده کششی و فشاری نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود هنگامی که بتن وارد محدوده پلاستیک می‌شود در باربرداری با شیبی کمتر از سختی اولیه (E_0) به تنش صفر باز می‌گردد. میزان شیب بازگشتی به تنش صفر به میزان آسیبی که بتن در محدوده پلاستیک دیده است بستگی دارد و میزان آن برابر با حاصل ضرب سختی اولیه (E_0) در $(1-D_c)$ یا $(1-D_t)$ می‌باشد.



شکل ۵- رفتار تک محوری بتن (الف) در کشش (ب) در فشار

برای مدلسازی فولاد از المان ایزوتروپیک استفاده شد. در محدوده رفتار غیر خطی نیز از مدل کینماتیک استفاده شد. از آنجا که در این پژوهش بارگذاری به صورت دینامیکی است رفتار کینماتیک برای آن مناسب است.

در حالت کلی مصالح حافظه‌دار شکلی را می‌توان به دو صورت، مدل‌سازی کرد. این دو صورت مدل‌سازی به ترتیب مدل‌های یک‌بعدی و سه‌بعدی می‌باشند. در این پژوهش بدلیل آنکه از آرماتورهای حافظه‌دار شکلی مورد استفاده، رفتاری یک‌بعدی دارند؛ مدل یک‌بعدی مبنا کار قرار گرفته است. تنش محوری σ و دمای نسبی T به عنوان متغیرهای کنترل فرض می‌شوند و نسبت مارتنزیت و آستنیت به عنوان متغیرهای داخلی فرض می‌شوند. فرض اساسی این مدل بر این است که این کمیت‌ها در هر زمان رابطه ۱ زیر را ارضا می‌کنند.

$$A + M = 1 \quad 1$$

که در آن A سهم نسبی آستنیت و M سهم نسبی مارتنزیت از ساختار اتمی آلیاژ می‌باشد. با گرفتن مشتق از رابطه فوق نسبت به زمان رابطه ۲ اقتباس می‌شود.

$$A' + M' = 0 \quad 2$$

¹ CONCRETE DAMAGE PLASTICITY (CDP)

که در آن A' نرخ تغییر رشد آستنیت و M' نرخ تغییر رشد مارتنزیت می باشد.

رفتار سوپرالاستیک در حالت تنش تک محوری شامل دو تبدیل فاز می باشد که یکی تبدیل فاز از مارتنزیت به آستنیت و دیگری از آستنیت به مارتنزیت می باشد. نمودار تغییرات تنش-حرارت، برای نواحی که در آن تبدیل فازهای اتمی به وقوع می پیوندند را می توان به خطوط مستقیم تقریب زد. بنابراین روابط ۳ و ۴ برای تبدیل فازها اقتباس می شود.

$$A' = A'^{(AM)} + A'^{(MA)} \quad ۳$$

$$M' = M'^{(AM)} + M'^{(MA)} \quad ۴$$

که در آن $A'^{(AM)}$ سرعت حذف آستنیت، $A'^{(MA)}$ سرعت ایجاد آستنیت، $M'^{(AM)}$ سرعت ایجاد مارتنزیت و $M'^{(MA)}$ سرعت حذف مارتنزیت می باشد. برای توصیف تولید آستنیت، معرفی توابعی نظیر توابع زیر ضروری می باشد. این توابع بر اساس دما و تنش، محدوده ای برای تولید آستنیت مشخص می کنند.

$$F^{MA} = \sigma - C^{MA} \cdot T \quad ۵$$

$$F_s^{MA} = F^{MA} - R_s^{MA} \quad ۶$$

$$F_f^{MA} = F^{MA} - R_f^{MA} \quad ۷$$

در عبارات فوق R_s^{MA} و R_f^{MA} به صورت زیر تعریف می شوند.

$$R_s^{MA} = -C^{MA} \cdot T_s^{MA} \quad ۸$$

$$R_f^{MA} = -C^{MA} \cdot T_f^{MA} \quad ۹$$

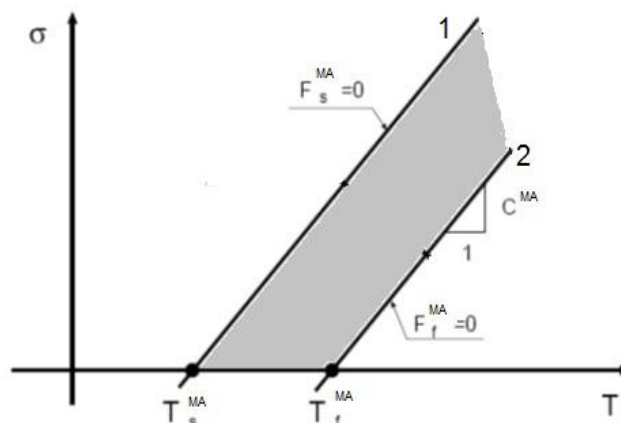
T_s^{MA} و T_f^{MA} به ترتیب دماهای آغاز و پایان تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت در تنش صفر می باشند و C^{MA} نسبت تنش به دمای آغاز و پایان تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت در تنش غیر صفر می باشد. این پارامترها به صورت شماتیک در شکل ۶ ارائه شده است. اگر پارامتر R در معادلات مذکور جایگذاری شود عبارات ۱۰ و ۱۱ حاصل می گردد.

$$F_s^{MA} = \sigma - C^{MA} \cdot (T - T_s^{MA}) \quad ۱۰$$

$$F_f^{MA} = \sigma - C^{MA} \cdot (T - T_f^{MA}) \quad ۱۱$$

خط شماره یک که در شکل ۶ مشخص شده است مرز مثبت و منفی F_s^{MA} را مشخص می کند، به طوری که روی خط این میزان برابر صفر و در بالای آن مثبت و پایین آن منفی محسوب می شود. این حالت برای رابطه شماره ۱۱ نیز در خط دو صادق است. ناحیه ای که در آن تبدیل آستنیت اتفاق می افتد مابین این دو خط است که در بین این دو خط F_s^{MA} کوچکتر از صفر و F_f^{MA} بزرگتر از صفر می باشد. حاصل ضرب این دو عبارت در این محدوده همیشه کوچکتر از صفر است و در بقیه نواحی بزرگتر از صفر و بر روی خطوط مرزی برابر صفر می باشد.

$$\text{If } (F_f^{MA} \cdot F_s^{MA} < 0) \text{ Then } M \rightarrow A \quad ۱۲$$



شکل ۶- محدوده تبدیل مارتنزیت به آستنیت در مدل یک بعدی

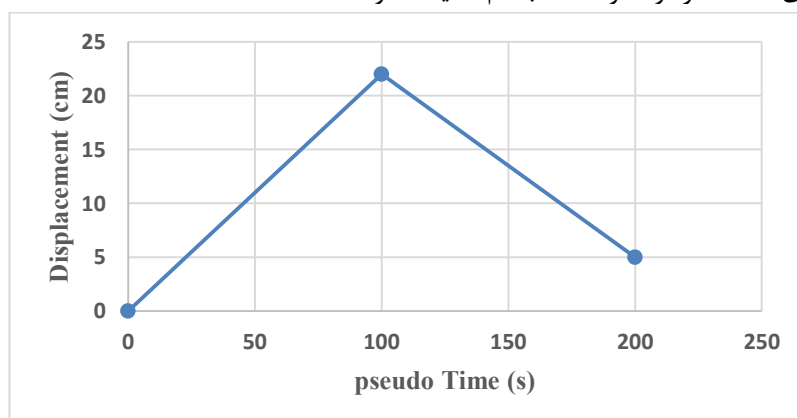
۳-۲- انواع تحلیل‌های صورت گرفته

بر روی مدل‌های ساخته شده در این تحقیق، دو گونه اصلی تحلیل عددی نرم‌افزاری صورت گرفته: تحلیل‌های استاتیکی و تحلیل‌های دینامیکی. در جدول ۲ دیوارهای برشی بتنی که در این مقاله مورد مدل‌سازی تحلیل قرار گرفت ارائه شده است. مطابق با این جدول دو نوع دیوار برشی (بدون بازشو و با بازشو) وجود دارد که با درصدهای مختلفی از آرماتورهای SMA و فولاد مدلسازی و تحلیل شدند.

جدول ۲- درصد آرماتورهای دیوارهای برشی بتنی مورد مطالعه					
مدل ها	درصد فولاد	توزیع آرماتور فولادی	درصد SMA	توزیع آرماتور SMA	
مدل ۱	۴	mm $\Phi 24 @ 100$	۰		دیوارهای بدون بازشو
مدل ۲	۸	mm $\Phi 32 @ 100$	۰		
مدل ۳	۵	mm $\Phi 26 @ 100$	۳	mm $\Phi 20 @ 100$	
مدل ۴	۰		۴	mm $\Phi 24 @ 100$	
مدل ۵	۳	mm $\Phi 20 @ 100$	۵	mm $\Phi 26 @ 100$	
مدل ۶	۰		۳	mm $\Phi 20 @ 100$	
مدل ۷	۳	mm $\Phi 20 @ 100$	۱۲	mm $\Phi 40 @ 100$	دیوارهای با بازشو
مدل ۸	۳	mm $\Phi 20 @ 100$	۵	mm $\Phi 26 @ 100$	
مدل ۹	۳	mm $\Phi 20 @ 100$	۰		
مدل ۱۰	۳	mm $\Phi 20 @ 100$	۱	mm $\Phi 12 @ 100$	
مدل ۱۱	۳	mm $\Phi 20 @ 100$	۴	mm $\Phi 24 @ 100$	
مدل ۱۲	۳	mm $\Phi 20 @ 100$	۰		

۳-۲-۱- تحلیل‌های استاتیکی با یک چرخه رفت و برگشت

ابتدا برای ارزیابی رفتار و تغییر شکل‌های پسماند در سازه‌های مدل شده، یک بارگذاری یکنواخت (monotonic) به همراه باربرداری مطابق با شکل ۷، تا جایی اعمال شده که نیروهای اعمال شده باقیمانده در راس سازه به حالت صفر بازگردد. دلیل طراحی چنین بارگذاری، این نیاز بود که تغییر شکل‌ها و کرنش‌های پسماند در دو دسته مدل ساخته شده، با درصدهای مختلف از فولاد و SMA با هم مقایسه شوند.



شکل ۷- بارگذاری استاتیکی با یک چرخه رفت و برگشت

۳-۲-۲-تحلیل‌های کامل لرزه‌ای-تاریخچه زمانی

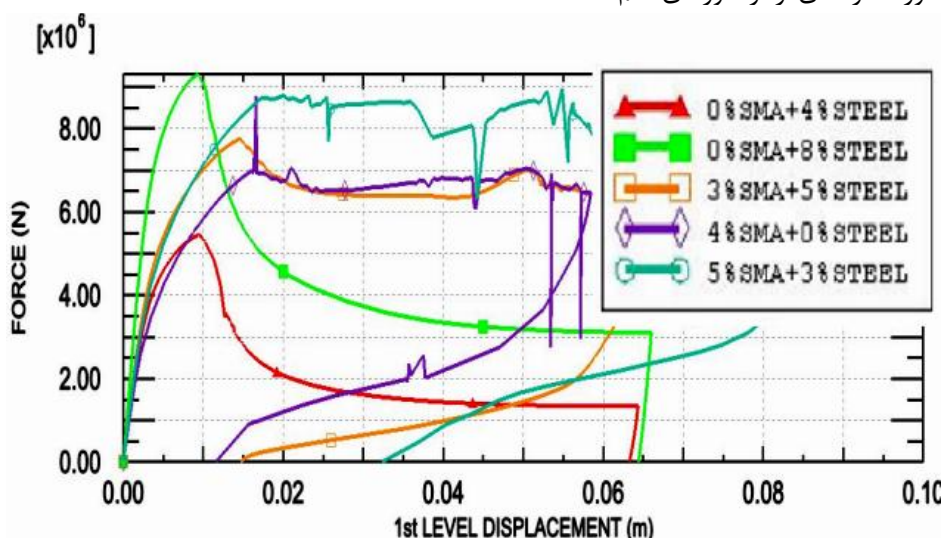
به منظور بررسی رفتار و عملکرد نزدیکتر به مدل‌ها در یک زلزله واقعی، در سازه‌های مدل شده، چندین نوع تحلیل تاریخچه زمانی زلزله‌هایی که شرح آنها در فصل گذشته آمد اعمال شد، سپس تغییر مکانهای کلی و نسبی در هر طبقه، شتابها و سرعت‌های ایجادشده در تراز طبقات و سایر اطلاعات مفید بدست آمده از تحلیل‌ها با هم مقایسه و تفسیر شده‌اند.

به این منظور، دو شتاب‌نگاشت از زلزله‌های بزرگ و مخرب در سطح جهان برای اعمال به عنوان تحریک لرزه‌ای گزیده شده‌است. انتخاب این زلزله‌ها با نگاه به این معیار صورت گرفته که محتوای فرکانسی آنها حتی‌الامکان در محدوده‌هایی یکسان نباشد. معیار گزینش این شتاب‌نگاشت‌ها از میان شتاب‌نگاشت‌های موجود زمین لرزه‌ها، همان طور که بیان شد، محتوای فرکانسی آنهاست که با توجه به بسط فوریه شتاب‌نگاشت‌ها، دو زمین لرزه "کوینا" و "السنترو" برگزیده شدند.

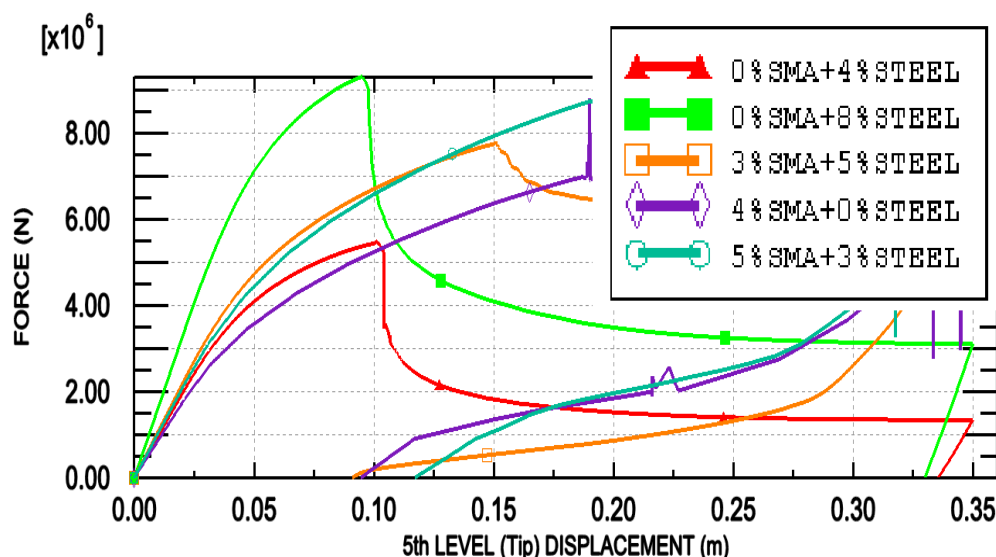
۴- بررسی نتایج تحلیل‌های انجام شده

۴-۱- نتایج تحلیل‌های استاتیکی روی دیوارهای ۵ طبقه بدون بازشو

بارگذاری به این ترتیب اعمال شده است که، میزان بیشینه، ۳۵ سانتی‌متر جابجایی در راس سازه‌ها اعمال گردید و سپس وارد مسیر باربرداری شده‌است. فرایند باربرداری تا جایی ادامه پیدا کرده که نیروهای تکیه‌گاهی تماماً صفر گردند. آنچه در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده، نتایج حاصل از بارگذاری روی دیوارها با چند حالت ترکیب مختلف از فولاد و یا آلیاژ حافظه دار شکلی در مجموع با ۴ و ۸ درصد تسلیح شده‌اند. بر اساس آنچه که از این نتایج مشاهده می‌شود سازه‌های دیوار تسلیح شده با فولاد (رنگهای قرمز و سبز)، مقاومت نهایی بیشتری نسبت به دیوارهایی که به میزان با آلیاژهای حافظه دار شکلی تسلیح شده‌اند نشان میدهند. اما به وضوح میزان جابجایی‌های پسماند در آنها نیز بیشتر است. نکته قابل توجه دیگر این است که سازه‌های دیوار تسلیح شده با فولاد، رفتار یکنواخت‌تری دارند در حالیکه در سازه‌های دیوار تسلیح شده با آلیاژهای حافظه دار شکلی، شکست‌ها، خردشدگی‌ها و تخریب‌های موضعی، باعث افت و خیزهایی در نمودار رفتاری سازه شده است. این پدیده میتواند ناشی مسائل عددی در تحلیل و یا از بخش سخت شدگی نهایی در رفتار آلیاژهای حافظه دار شکلی باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل‌های ۸ و ۹ میتوان اینگونه نتیجه گرفت که جابجایی در طبقات پایین‌تر در سازه‌هایی که با آلیاژهای حافظه دار شکلی بیشتری تسلیح شده‌اند، بیشتر است. این میتواند ناشی از رفتار شکل پذیرتر اینگونه سازه‌ها باشد. آرماتورهای ذکر شده در این شکل‌ها به صورت درصدی از آرماتورهای قائم هستند.



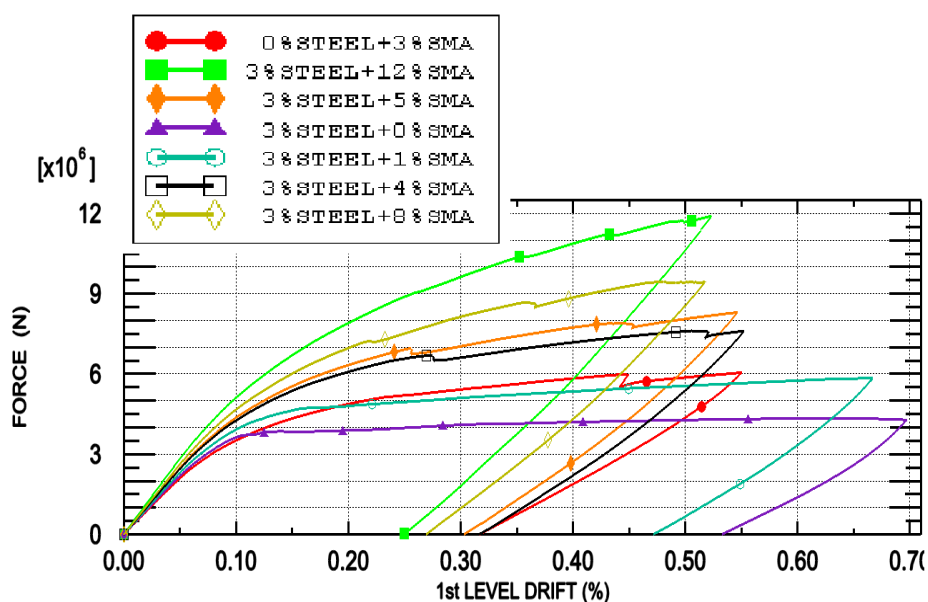
شکل ۸- نمودار نیرو-تغییر مکان طبقه نخست سازه با چند ترکیب ۴ و ۸ درصد تسلیح



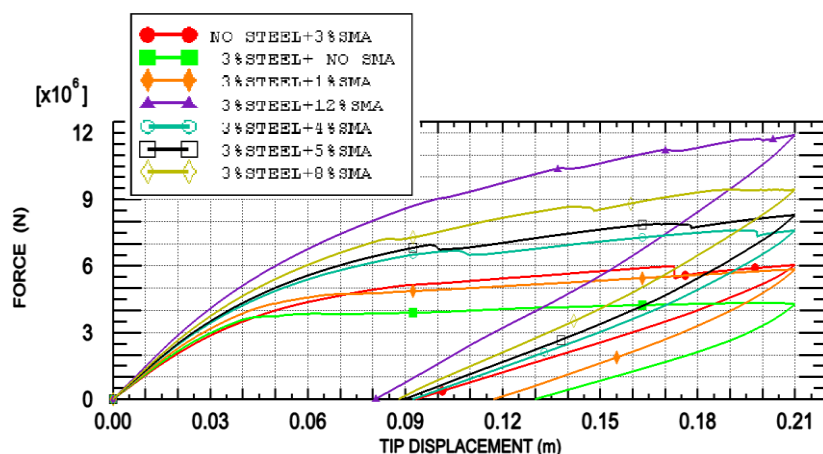
شکل ۹- نمودار نیرو-تغییر مکان طبقه آخر سازه با چند ترکیب ۴ و ۸ درصد تسلیح

۴-۲- نتایج تحلیل‌های استاتیکی تکنوا روی دیوارهای ۵ طبقه دارای بازشو

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نتایج حاصل از اعمال بارگذاری‌های نوع استاتیکی تکنوا با یک چرخه رفت و برگشت، روی بخشی از دیوارهای با بازشو که همگی با ۳٪ فولاد تسلیح شده‌اند و پارامتر متغییر در آنها درصد آلیاژهای حافظه‌دار شکلی است؛ ارائه گردیده. نکته‌ای که انتظار آن هم می‌رفت آنست که همانطور که در شکل‌های فوق ملاحظه می‌شود، همزمان با دور شدن از راس سازه، تفاوت میزان جابجایی‌های بیشینه هر طبقه، در سازه‌هایی که درصد SMA بیشتری دارند نسبت به بقیه آشکارتر می‌شود. آنچه که بطور مسلم از این تحلیل‌ها برداشت می‌شود این است که استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی باعث کاهش تغییر شکل‌های ماندگار در سازه دیوار برشی بتن مسلح می‌شود که این پدیده با افزودن درصد آلیاژ آشکارتر می‌شود.



شکل ۱۰- نمودار نیرو-تغییر مکان طبقه اول سازه، ۳٪ فولادگذاری و درصدهای مختلف SMA



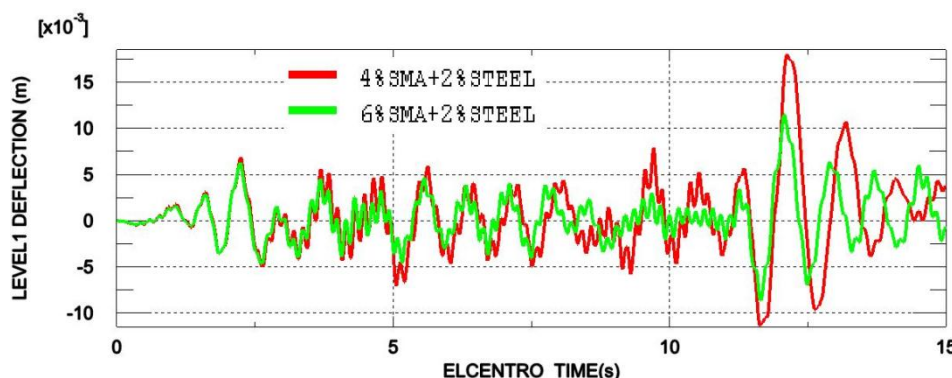
شکل ۱۱- نمودار نیرو-تغییر مکان طبقه آخر سازه، ۳٪ فولادگذاری و درصدهای مختلف SMA

۳-۴- نتایج تحلیل‌های دینامیکی روی دیوارهای ۵ طبقه بدون بازشو

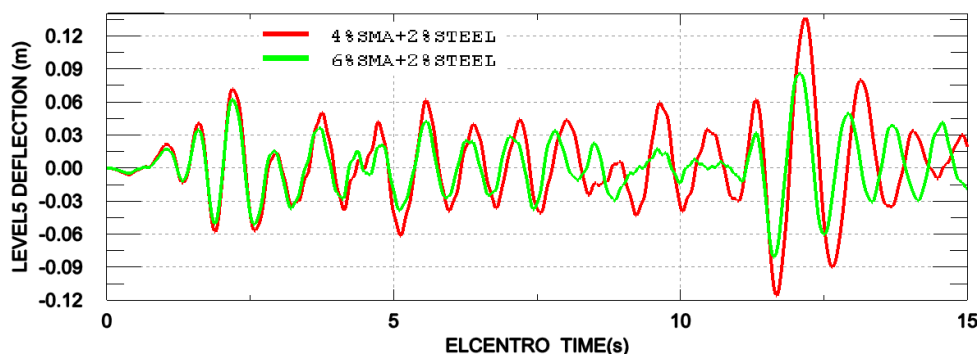
نزدیک‌ترین نوع تحلیل‌ها به رفتار واقعی سازه، تحلیل تاریخچه زمانی است که در این بررسی ارائه شده است. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نتایج حاصل از این تحلیل‌ها روی سازه دیوار بتن مسلح بدون بازشو تحت زلزله السنترو را ارائه می‌نماید. شکل ۱۲ نمودار جابجایی طبقه اول سازه بتنی در دو حالت تسلیح است که در یکی، ۴٪ آلیاژ حافظه دار و در دیگری ۶٪ آلیاژ حافظه دار در کنار ۲٪ فولاد مشترک در دو حالت بکار رفته دیده می‌شود که جابجایی بیشینه در سازه‌ایی که میزان بیشتری SMA در آن (به‌صورت تسلیح) بکار رفته به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. شکل ۱۳ نمودار جابجایی طبقه پنجم همان سازه بتنی در دو حالت تسلیح است که در یکی، ۴٪ SMA و در دیگری ۶٪ SMA در کنار ۲٪ فولاد مشترک در دو حالت به کار رفته است. در این طبقه نیز مانند سایر طبقات، بیشینه جابجایی در سازه‌ایی که میزان بیشتری SMA در آن (به‌صورت مسلح) بکار رفته به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. همچنین نکته‌ای که از نتایج این تحلیل‌ها برداشت می‌شود، این است که جابجایی‌های نسبی پسماند در طبقات پایین‌تر با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی کاهش به مراتب بیشتری خواهد یافت. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ رفتار سازه مشابه را تحت زلزله کوینا را با اندکی تغییر در درصد تسلیح فولاد و آلیاژ حافظه دار نشان می‌دهد. نتایج حاصل از استفاده از این نوع آلیاژ در این تاریخچه زمانی هم مشابه تاریخچه زمانی قبل، کاهش تغییر شکل‌های ماندگار و کاهش تغییر مکانهای نسبی طبقات می‌باشد.

۴-۴- نتایج تحلیل‌های دینامیکی روی دیوارهای ۵ طبقه دارای بازشو

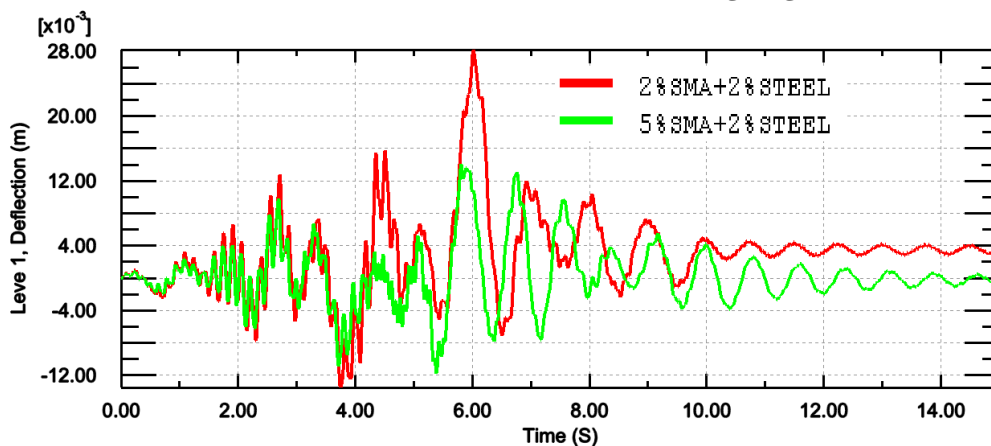
شکل‌های ۱۶ و ۱۷ جابجایی طبقات نخست و پنجم سازه بتنی پنج طبقه با بازشو را در دو حالت تسلیح که در یکی ۵٪ SMA در کنار ۲٪ فولاد و در دیگری تنها ۲٪ فولاد بدون استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بکار رفته را ارائه می‌نماید.



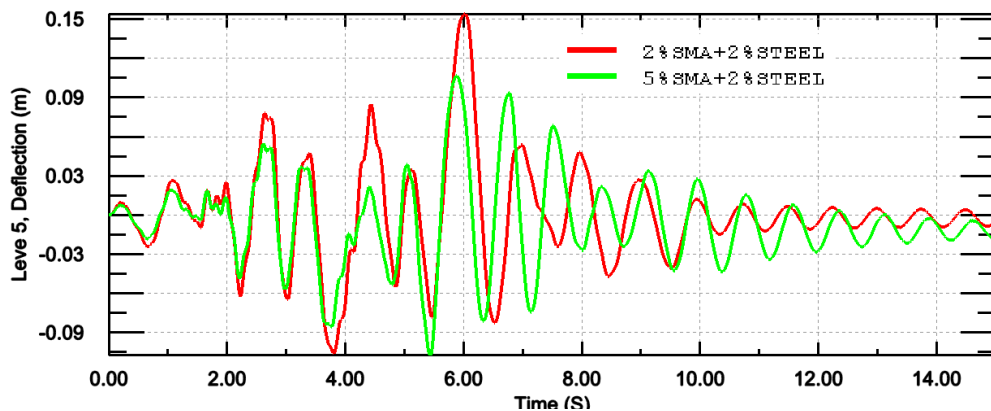
شکل ۱۲- نمودار جابجایی نسبی طبقه نخست سازه، تحت زلزله السنترو، ۲٪ فولاد با ۴٪ SMA و ۲٪ فولاد با ۶٪ SMA



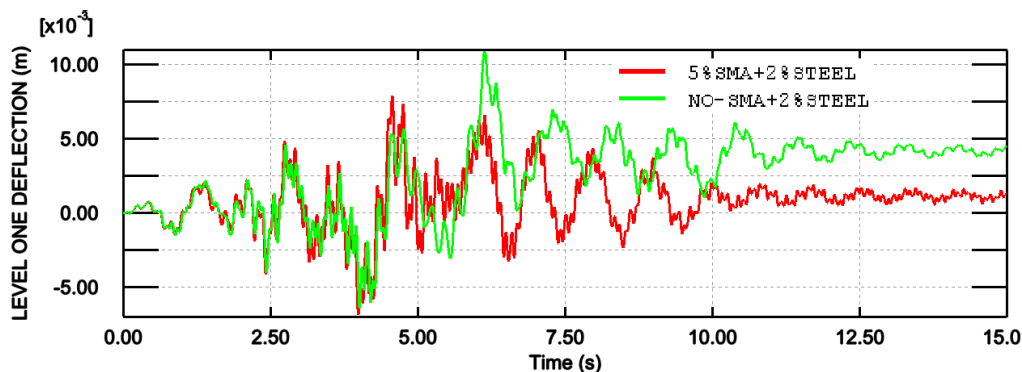
شکل ۱۳- نمودار جابجایی نسبی طبقه پنجم سازه، تحت زلزله السنترو، ۲٪ فولاد با ۴٪ SMA و ۲٪ فولاد با ۶٪ SMA



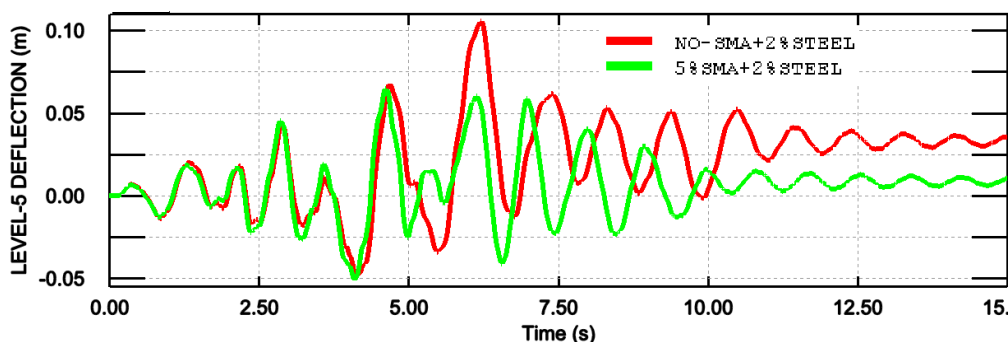
شکل ۱۴- نمودار جابجایی نسبی طبقه نخست سازه، تحت زلزله کوبینا، ۲٪ فولاد با ۲٪ SMA و ۲٪ فولاد با ۵٪ SMA



شکل ۱۵- نمودار جابجایی نسبی طبقه پنجم سازه، تحت زلزله کوبینا، ۲٪ فولاد با ۲٪ SMA و ۲٪ فولاد با ۵٪ SMA

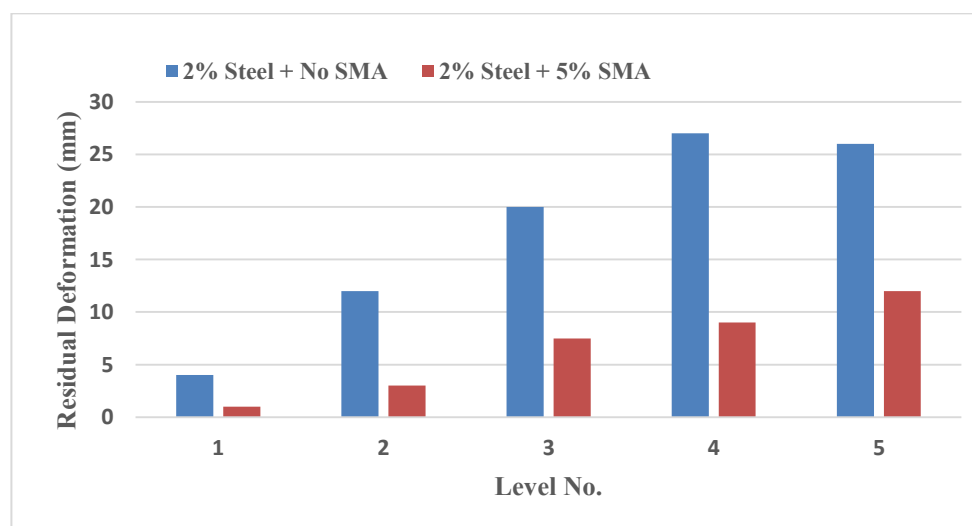


شکل ۱۶- نمودار جابجایی نسبی طبقه نخست سازه، تحت زلزله کوبینا، ۲٪ فولاد با ۲٪ SMA و ۲٪ فولاد با ۵٪ SMA



شکل ۱۷- نمودار جابجایی نسبی طبقه پنجم سازه، تحت زلزله کوبینا، ۲٪ فولاد با ۲٪ SMA و ۲٪ فولاد با ۵٪ SMA

همچنین مقایسه میزان بیشینه جابجایی‌های جانبی در هر طبقه در این تحلیل‌ها بیانگر نقش قابل تامل این آلیاژها در کاهش جابجایی جانبی طبقات است. میزان جابجایی پسماند در هر طبقه (شکل ۱۸) و مقایسه آن‌ها در دو حالت با و بدون استفاده از SMA ها بیانگر نقش انکار ناپذیر این آلیاژها در کاهش جابجایی جانبی پسماند طبقات است. مطابق با این شکل کاهش تغییر شکل ماندگار برای طبقات ۱ الی ۵ به ترتیب برابر با ۰.۶۷، ۰.۷۵، ۰.۹۸، ۰.۷۲، ۰.۵۳٪ است. بر اساس این اعداد، هرچه طبقه بالاتر باشد اثر SMA در کاهش تغییر شکل ماندگار کمتر می‌شود و در طبقات پایینی اثر خود را بهتر نشان می‌دهد.



شکل ۱۸- بیشینه تغییر شکلهای ماندگار در طبقات، سازه ۵ طبقه، تحت زلزله کوبینا

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در دیوارهای برشی با و بدون بازشو بصورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، الگوریتم رفتار مادی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر پایه فعالیت‌های قبلی انجام شده و پشته‌های موجود در ادبیات فنی در قالب یک زیربرنامه قابل اعمال به نرم‌افزار ABAQUS تهیه و آزموده شد. سازه‌های دیوار تسلیح شده با فولاد، مقاومت نهایی بیشتری نسبت به دیوارهایی که به همان میزان با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی تسلیح شده‌اند نشان می‌دهند. اما به وضوح میزان جابجایی‌های پسماند در آن‌ها بیشتر است. در تحلیل‌های بعمل آمده، حالات مختلفی آورده شده که در آن‌ها میزان جابجایی نهایی پسماند یکسان است؛ هدف از آوردن این نتایج، نشان دادن این نکته بود که، در صورت میل به پذیرش جابجایی‌های شدید، با درصد کمتری از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نسبت به مدل‌های مشابه با درصدهای بالاتر تسلیح فولادی، می‌توان به جابجایی نهایی

پسماند کمتری دست یافت. همزمان با دور شدن از راس سازه‌ها به سمت پی، تفاوت میزان جابجایی‌های بیشینه هر طبقه، در سازه‌هایی که درصد SMA بیشتری دارند نسبت به بقیه آشکارتر می‌شود. جابجایی‌های نسبی پسماند در طبقات پایین‌تر با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی کاهش به مراتب بیشتری خواهد یافت. نکته شایان توجه اینکه در طبقات پایین‌تر اثر کاهش تغییر شکل‌های پسماند نسبی در طبقات، با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بسیار بیشتر دیده می‌شود. بر اساس آنچه در تحقیق حاضر دیده شد، امکان وقوع این پدیده وجود دارد که در جریان اعمال تحریک‌های جانبی دینامیکی مثل زلزله، دیوار برشی بتن مسلح تقویت‌شده با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، نسبت به سازه شاهد، که در آن به همان میزان فولاد به جای آن آلیاژها استفاده شده، در بعضی از گام‌های زمانی پاسخ‌های تغییرمکانی بزرگتری را تجربه نماید، اما حتی در این صورت نیز، پس از اتمام تحریک لرزه‌ای، تغییرشکل‌های پسماند کمتری نسبت به سازه شاهد داشت. از نتایج چندین تحلیل از هر دو گونه تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی روی سازه‌های دیوار برشی دارای بازشو، اینگونه برداشت می‌شود که کرنش‌های پسماند پس از اتمام بارگذاری‌ها در آنها در طبقات میانی بر جای می‌ماند.

۶- مراجع

- [1] Otsuka K, and Wayman C.M. (1998). "Shape Memory Materials", Cambridge University Press, UK.
- [2] Motahari S.A., and Ghassemieh M. (2007). "Multilinear one-dimensional shape memory material model for use in structural engineering applications", *Engineering Structures*, 29, pp. 904-913.
- [3] Bruno S., and Valente C. (2002). "Comparative Response Analysis of Conventional and innovative seismic protection strategies". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, pp. 1067-1092.
- [4] Cardone D., Dolce M., and Ponzio F.C. (2004). "Experimental behavior of R/C Frames retrofitted with dissipating and re-centering braces". *Journal of Earthquake Engineering*, 8(3), pp. 361-396.
- [5] Czaderski C., Hahnebach B., and Motavalli M., (2006). "RC beam with variable stiffness and strength". *Construction and building materials*, 20, pp. 824-833.
- [6] DesRoches R., and Delemont M. (2002). "Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys". *Engineering Structures*, 24, pp. 325- 32.
- [7] Dolce M., Cardone D., and Nigro D. (2000). "Experimental tests on seismic deceives based on shape memory alloys". *12th World Conference of Earthquake Engineering (12WCEE)*, New Zealand.
- [8] Dolce M., and Cardone D. (2001). "Mechanical behavior of Shape Memory alloys for seismic applications – 2. Austenite NiTi wires subjected to tension", *International Journal of Mechanical Sciences*, 43, pp.2657-77.
- [9] Ghassemieh M., Nojoumi S.A, Kari A, and Bahaari M.R. (2007). "Upgrading of concrete shear wall system using shape memory alloys". *11th international conference on inspection, appraisal, repairs & maintenance of Structures, north Cyprus*.
- [10] Motahari S.A, Ghassemieh M. and Abolmaali S.A. (2007). "Implementation of shape memory alloy dampers for passive control of structures subjected to seismic excitations". *Journal of Constructional Steel Research*, 63, pp. 1570-1579.

- [11] Indiril M, Carpani B, Martelli A, Castellano M.G, Infanti S, Crosi G, Biritognolo M, Bonci A, Viscovic A, and Viani S. (2000). "Experimental test on masonry structures provided with shape memory alloy antseismic devices". 12th World Conferences of Earthquake Engineering (12WCEE) , New Zealand.
- [12] Wilde K., Gardoni P., and Fujino Y. (2000). "Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges". *Engineering Structures*, 22, pp. 222–229.
- [13] Ghassemieh, M., Mostafazadeh, M., and Sadeh, M.S. (2012) "Seismic control of concrete shear wall using shape memory alloys" *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23, pp. 535-543.
- [14] Ghassemieh M., Ghodrati S.M., Bahaari M.R., and Nojoomi S.A., (2013) "Seismic enhancement of coupled shear walls using shape memory alloys", *Journal of Civil Engineering and Science*, 2, pp.93–101.
- [15] Aryan H., and Ghassemieh M. (2015) "Seismic enhancement of multi-span continuous bridges subjected to three directional excitations", *Smart Materials and Structures*, 2, 045030.
- [16] Aryan H., and Ghassemieh M. (2017) "A superelastic protective technique for mitigating the effects of vertical and horizontal seismic excitations on highway bridges", *Journal of Intelligent Material Systems and structures*, 28(12) 1533–1552
- [17] Ghassemieh M., Rezapour, M., and Sadeghian V. (2017) "Effectiveness of the shape memory alloy reinforcement in concrete coupled shear walls", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28, pp.640–52.
- [18] Khaloo, AR, Eshgi, I, Piran, P, "Study of behavior of RC beams with smart rebars using finite element modeling", *Inter. Journal of civil engineering*, 8(3), Sep. 2010, pp. 221-231
- [19] Khaloo, AR, Mobini, M, "Investigating the behavior of RC frames using super elastic nitinol", *1st middle East Conf. on Smart Monitoring Assessment and Rehabilitation of Civil Structures*, Feb. 2011, Dubai, UAE, 8p.
- [20] HKS. ABAQUS User's Manual Version 6.9, (2003). Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., USA.
- [21] Lee, J, and Fenves G.L. (1998) "Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures," *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8), pp. 892–900.

