

تأثیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر رفتار چرخه‌ای اتصالات بتن آرمه

محمد گل محمدی^{۱*}، نوید آروین خیبری^۲، مهدی مختاری^۳

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران و معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربت حیدریه، خراسان رضوی
^۲ کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، استاد مدعو دانشگاه تربت حیدریه، خراسان رضوی
^۳ دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

(دریافت: ۹۹/۲/۲۲، پذیرش: ۹۹/۱۰/۱۵، نشر آنلاین: ۹۹/۱۰/۱۵)

چکیده

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMAs) خاصیت بازیابی تغییر شکل دائمی را دارا بوده و از جمله آلیاژهای فلزی هستند که ویژگی‌های معمولی فلزها مانند مقاومت، سختی، کارایی، و غیره را از خود نشان می‌دهند. از جمله کاربردهای این آلیاژها می‌توان در جداسازی لرزه‌ای سازه‌ها، خود ترمیمی عناصر ساختمان، صنعت هواپیما، پزشکی، مکانیکی و ساخت مدل‌های مؤثر و ابزار محاسباتی اشاره نمود. در این مقاله به مطالعه اثر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر رفتار چرخه‌ای اتصالات بتن آرمه پرداخته می‌شود. برای این منظور، پس از راستی‌آزمایی دو مدل آزمایشگاهی در نرم‌افزار Seismo Struct، تأثیر چهار پارامتر مقاومت فشاری بتن، اثر موقعیت SMA در داخل ناحیه بحرانی، استفاده هم‌زمان از این آلیاژ به عنوان میلگرد و خاموت و تأثیر مقطع معادل دایروی ستون با خاموت تنگ یا دورپیچ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییر مقاومت فشاری بتن در ناحیه الاستیک بر رفتار اتصال بدون تأثیر بوده، اما در ناحیه غیرالاستیک ظرفیت تحمل بار با افزایش ۳۰ درصدی مقاومت فشاری بتن حدود دو درصد افزایش یافته است. از طرفی دیگر، تأثیر SMA در داخل ناحیه بحرانی سبب اضافه سختی، افزایش سختی و انرژی جذب‌شده چرخه‌ای شده است. همچنین، در حالت استفاده از میلگرد طولی از جنس فولاد و خاموت از جنس SMA، با حذف پدیده باریک‌شدگی از نمودارهای چرخه‌ای، افزایش در انرژی جذب‌شده چرخه‌ای را به دنبال داشته است. نهایتاً منحنی‌های پوش رفتار چرخه‌ای نمونه با مقطع ستون دایروی معادل، چه با خاموت از نوع تنگ و چه از نوع دورپیچ، تقریباً منطبق بر یکدیگر بوده و در مقایسه با نمونه مرجع سختی الاستیک بیش‌تری داشتند.

کلیدواژه‌ها: آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، شبه الاستیسیته، اتصالات بتن آرمه، اثر حافظه شکلی، Seismo Struct.

۱- مقدمه

می‌شود. مصالح آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMAs)^۱ با توجه به توانایی آن‌ها در ائتلاف انرژی قابل توجه و تغییر شکل‌های پسماند ناچیز در طول زلزله‌ها، به منظور مسلح‌سازی اتصالات تیر به ستون مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی خاصیت بازیابی تغییر شکل دائمی بیش از ۱۰ درصد را دارا بوده و از جمله آلیاژهای فلزی هستند که ویژگی‌های معمولی فلزها مانند مقاومت، سختی، کارایی و غیره را از خود نشان می‌دهند (Funakubo و همکاران، ۱۹۸۷).

اثر حافظه‌دار شکلی خاصیتی ویژه است که برخی مواد دارا هستند و می‌توانند پس از برداشتن بار گرمایی که روی آن‌ها اعمال شده است، شکل اولیه خود را مجدداً به دست آورند. در این مواد، بالا بردن دما ممکن است بازگشت کامل کرنش‌های باقی‌مانده را

تحقیقات صورت گرفته بر روی خسارات لرزه‌ای وارد شده بر قاب‌های بتنی نشان می‌دهد که اتصالات تیر به ستون سطح بالایی از خسارت را تحمل کرده‌اند. از آنجایی که خرابی اتصالات تحت بارهای لرزه‌ای، اغلب منجر به فروپاشی جزئی یا کلی سازه می‌شود، لذا اتصالات تیر به ستون بتن مسلح از جمله بحرانی‌ترین نواحی قاب‌های بتن آرمه به شمار می‌روند. این اتصالات بایستی دارای مقاومت و محصورشدگی کافی جهت تحمل بارهای چرخه‌ای وارده شده از طرف اعضای قاب باشند. اتصالات تیر به ستون با میلگردهای فولادی در سازه‌های بتن آرمه همچنان بسیار با ارزش بوده و به عنوان یک لینک ضعیف در چنین سازه‌های در نظر گرفته

1. Shape Memory Alloys

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۵-۱۳۳۴۲۹۶

که براساس یک فرآیند اعمال بار مکانیکی و برداشتن آن بار به وجود آمده است، موجب شود و این واقعیت به صورت ماکروسکوپی در قالب از بین رفتن تغییر شکل‌های ایجاد شده مشاهده می‌گردد (Kemal و Asanovic, ۲۰۰۷).

این مصالح به دلیل میرایی زیاد و کرنش پسماند ناچیز، می‌توانند به عنوان کمک فشر و میراگر لرزشی استفاده شوند. این ویژگی می‌تواند به تجهیزات حمل و نقل عمومی و نیز ساختمان‌های بزرگ برای حفاظت از زلزله افزوده شود (Lecce, ۲۰۱۴). از جمله کاربردهای این آلیاژها عبارت‌اند از جداسازی لرزه‌ای در فونداسیون، خود ترمیمی عناصر ساختمان، صنعت هواپیما، پزشکی، مکانیکی و ساخت مدل‌های مؤثر و ابزار محاسباتی (Krumme و همکاران، ۱۹۹۵؛ Wilde و همکاران، ۲۰۰۰؛ Raniecki و همکاران، ۲۰۰۱).

در این مقاله پس از بررسی خصوصیات مصالح SMA، نمونه‌هایی از اتصالات بتن‌آرمه، با و بدون میلگردهای SMA، در نرم‌افزار Seismo Struct 2020 مدل‌سازی و تحلیل می‌شوند. از آنجایی که استفاده از این آلیاژها در سازه‌ها متحمل هزینه زیادی می‌شوند اما در ترمیم اتصال آسیب‌دیده از این مصالح به عنوان میلگرد اصلی می‌تواند مؤثر واقع شود و از صرف هزینه‌های هنگفت ناشی از ترمیم اتصال به صورت سنتی جلوگیری کند به طوری که صرفاً با اعمال حرارت به اتصالی که از این مصالح استفاده می‌شود، ترمیم صورت می‌پذیرد که رفتاری به مراتب قابل قبول‌تری نسبت به اتصال ترمیم‌شده دارد. برای این منظور، ابتدا جهت کالیبره نمودن نرم‌افزار، از یک نمونه آزمایشگاهی شامل یک اتصال خارجی تیر به ستون بتن مسلح با مشخصات هندسی ارائه شده در شکل (۱) تحت بارگذاری چرخه‌ای استفاده گردید؛ به طوری که با بررسی نتایج مشاهده گردید که رفتار چرخه‌ای مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی از تطابق خوبی برخوردار بودند.

لذا حالت‌های مختلفی از به کارگیری این مصالح در اتصال مورد استفاده قرار گرفت به همین منظور با در نظر گرفتن SMA در ناحیه اتصال تیر به ستون بتن‌آرمه، رفتار چرخه‌ای اتصال در وضعیت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت؛ که عبارت بودند از:

۱- تغییر در مقاومت فشاری بتن،

۲- استفاده از SMA به عنوان خاموت،

۳- قرارگیری SMA در ناحیه پلاستیک (بحرانی) تیر بتن‌آرمه،

۴- استفاده از ستون با مقطع دایروی معادل دارای خاموت

(تنگ یا دورپیچ) از جنس SMA.

۲- تاریخچه تحقیقات

وجود ضعف در کارایی سازه می‌تواند خطرات جدی برای کاربران آن داشته باشد و از این رو ارائه راهکار مناسب جهت رفع

این مشکل کاملاً مورد نیاز است. با توجه به آن که جایگزین نمودن سازه مستلزم هزینه‌های فراوان است، محققین به دنبال تعیین روش‌های مناسب و قابل اجرا جهت بهسازی و ترمیم سازه‌ها با صرف حداقل هزینه و نیز حداقل تخریب در آن‌ها هستند. بررسی‌های انجام شده بر روی دلایل شکست قاب‌های خمشی بتن مسلح در زلزله‌هایی مانند زلزله سال ۱۹۹۵ کوبه در ژاپن، زلزله ۱۹۸۹ سانفرانسیسکو، زلزله ۱۹۹۴ کالیفرنیا و زلزله ۱۹۹۹ ترکیه نشان دادند که انهدام در ناحیه اتصال تیر- ستون این سازه‌ها یکی از دلایل عمده در تخریب کل سازه بوده است (Biddah و Ghobarah, ۱۹۹۸).

Blume و همکاران (۱۹۶۱) یک اتصال داخلی را در برابر بارهای چرخه‌ای آزمایش کردند. در این آزمایش، الگوهای ترک- خوردگی در مراحل مختلف بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. Hanson و Conner (۱۹۶۷) رفتار اتصال خارجی را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، هفت نمونه اتصال خارجی ساخته شده و تحت اثر بارهای چرخه‌ای قرار گرفتند. نتیجه این مطالعات آن بود که ظرفیت یک اتصال بدون وجود آرمتور عرضی به دلیل شکست برشی بتن و کماتش میلگردهای طولی ستون کاهش می‌یابد.

نخستین بررسی همه‌جانبه بر روی رفتار اتصال قاب‌های بتنی در برابر نیروهای زلزله توسط Park و Paulay (۱۹۷۵) انجام گرفت و نشان داده شد که عدم وجود یا ناکافی بودن آرمتور عرضی در ناحیه اتصال تأثیر قابل توجه در کاهش مقاومت برشی و نیز شکست برشی آن خواهد داشت. چنان‌که گفته شد، اتصالات خارجی در طبقات پایینی قاب‌های بتن‌آرمه نسبت به سایر اتصالات بحرانی‌تر هستند.

Kuan (۱۹۹۱) طرحی را برای ترمیم اتصالاتی که خسارت آن‌ها چندان شدید نبود ارائه نمود. بر اساس طرح او تزریق ملات بتن تحت فشار، توانایی بازگرداندن مقاومت و قابلیت جذب انرژی به اتصال خسارت‌دیده را دارد. Filiatrault و Lebrun (۱۹۹۶) در یک اتصال شبکه‌ای سوراخ ایجاد نموده و سپس ملات بتن را با فشار در آن تزریق نمودند. نتیجه این کار، بهبود رفتار سازه در زلزله‌های متوسط گزارش گردید.

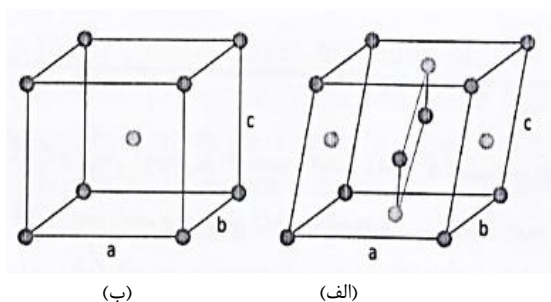
ویژگی‌های متمایز SMA نسبت به مصالح فولادی رایج، بسیاری از دانشمندان را به کار بر روی آن‌ها سوق داد. بررسی رفتار آلیاژهای حافظه‌دار شکلی مهم‌ترین موضوع تحقیقاتی در طول پنج دهه گذشته بوده است، که توجه مهندسين، پزشکان، ریاضیدانان، و دانشمندان علوم مواد از صنعت و دانشگاه را به خود جلب کرده است. روش‌های متعددی برای مدل‌سازی رفتار SMA در مقالات پیشنهاد گردید. یکی از مرسوم‌ترین روش‌های مدل‌سازی ساختار SMA، براساس ترمودینامیک پیوسته با متغیرهای داخلی است. این نوع مدل در طی سال‌های اخیر از سوی محققین و مهندسين،

پیشنهاد نمودند. مشخص شد که افزایش عمق مهاری در اتصال منجر به افزایش سختی بعد از ترک خوردگی و کاهش انحنای نهایی می‌گردد.

Pereiro-Barcelo و همکاران (۲۰۱۹) با انجام مطالعه آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی ستون‌های درون طبقه، به بررسی اثرات سطح محوری و اتصالات تیر به ستون پیوسته یا ناپیوسته و رفتار چرخه‌ای ستون‌های بتن مسلح ترکیبی از میله‌های Ni-Ti و بتن تقویت‌شده با الیاف با کارایی بالا (HPFRC) در ناحیه انتهایی بحرانی ستون و محل احتمالی تشکیل مفصل پلاستیک، پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که نمونه‌های با اتصالات پیوسته، مقاومت جانبی، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی بیشتری دارند. درحالی‌که اتصالات ناپیوسته تغییر مکان‌های پسماند کوچک‌تر و خسارت کم‌تری در ناحیه بحرانی ستون دارند.

۳- رفتار آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

رفتار آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در نتیجه تغییر فاز و شکل‌گیری مجدد ساختار کریستالی رخ می‌دهد. مواد با قابلیت حافظه شکلی دارای دو فاز سرد و داغ هستند. فاز سرد یا مارتنزیت، که از اسم فیزیکی‌دان آلمانی آدولف مارتنز^۵ گرفته شده است، با یک تغییر فاز کریستالی بالا و عجیب شناخته می‌شود و در دو شکل متفاوت دیگر با ثبات خواهد بود. اصالتاً این فاز آلتروپ^۶ کم‌ثبات فولاد را نشان می‌دهد که با سرد کردن سریع شکل می‌گیرد. فاز داغ یا آستنیت^۷، که از اسم فیزیکی‌دان انگلیسی چارلز آستن^۸ گرفته شده است؛ این فاز ساختار هندسی معکبی مرکزی را داراست و به عنوان آلتروپ غیر مغناطیسی آهن نام‌گذاری شده است (شکل (۱)) (Asanovic و Kemal, ۲۰۰۷).



شکل ۱- (الف) مارتنزیت، (ب) ظاهر هندسی آستنیت و توزیع اتم‌های تیتانیوم (خاکستری کم‌رنگ) و نیکل (خاکستری پررنگ) (Asanovic و Kemal, ۲۰۰۷)

موردتوجه ویژه‌ای قرار گرفته است؛ به‌طوری‌که به‌دلیل توانمندی عددی و بازدهی مناسب، هسته حل‌کننده ساختار نمونه را در اغلب شبیه‌سازی‌های روش المان محدود^۲ مهندسی نشان می‌دهد؛ حتی اگر فقط پاسخ ماده میکروسکوپی را شرح دهد (Lagoudas, ۲۰۰۸).

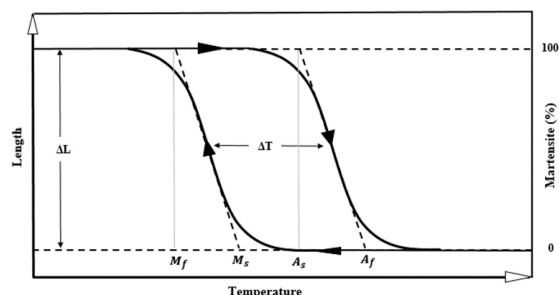
در ابتدای دهه ۱۹۹۰ کاربردهای ابتکاری و مهندسی SMA همانند کاربردهای پزشکی و مکانیکی، ساخت مدل‌های مؤثر و ابزار محاسباتی را تقویت نمودند. Raniecki و همکاران (۲۰۰۱) به بررسی حلقه‌های چرخه‌ای تیرهای SMA شبه‌الاستیک در حالت خمش خالص پرداختند. Liang و Rogers (۱۹۹۷) روابط بنیادی ترمودینامیکی مصالح SMA را در حالت یک بعدی پیشنهاد نمودند. Ivshin و Pence (۱۹۹۴) مدلی برای رفتار چرخه‌ای مستقل از سرعت ارائه نمودند و این مدل را تبدیل فاز القایی دما نامیدند. در سال ۱۹۹۵ تحقیقات گسترده‌ای بر روی مدل‌سازی SMA صورت گرفت. بدین منظور، Shaw و Kyriakides (۱۹۹۵) برخی از جنبه‌های رفتار ترمودینامیکی سیستم‌های NiTi را ارائه نمودند. Boyd و Lagoudas (۱۹۹۴) مدل سازنده‌ای پیشنهاد کردند که قادر به بازسازی کرنش پلاستیک SMA به‌دلیل تبدیل و جهت‌گیری مجدد مارتنزیت^۳ با استفاده از تابع انرژی آزاد و پتانسیل اتلاف بود.

Auricchio و Lubliner (۱۹۹۷) نظریه پلاستیسته عمومی را در SMA به‌کار بردند و مدل سازنده‌ای برای توزیع بارگذاری چند محوری براساس معیار گسیختگی دراکر-پراگر^۴ پیشنهاد کردند، که قادر به بازسازی رفتار کرنش پلاستیک بوده و در سازه‌های دارای SMA با نمونه‌های عددی به‌کار برده شد. در مطالعه‌ای که توسط Souza و همکاران (۱۹۹۸) انجام شد، مدلی برای در نظر گرفتن تبدیل‌های فاز القایی تنش مواد حافظه‌دار شکلی پیشنهاد شد. این کار در چهارچوب نظریه مواد استاندارد و توسط آنالیز هم‌گرایی و بهینه‌سازی صورت گرفت.

در یک مهاربند کمانش تاب هم‌محور دارای مصالح SMA که توسط Miller و همکاران (۲۰۱۲) معرفی شد، مشاهده گردید باوجود تغییر شکل‌های تجمعی، مهاربند همچنان قابلیت تحمل بار قابل‌ملاحظه‌ای را با توجه به توانایی ذاتی میله SMA دارا بود. Oudah و El-Hacha (۲۰۱۷) عملکرد اتصال بتنی مسلح شده با میلگردهای SMA را با هدف بررسی چندین متغیر طراحی در پاسخ اتصال، ازجمله سطح محصورشدگی خاموت، موقعیت و جهت مهاری، مورد آزمایش و تحلیل قرار دادند و توصیه‌هایی برای طراحی با توجه به جزئیات اتصال بهینه و مشخصات مهاری SMA

6. Althorp
7. Austenite
8. Charles Austen

2. Finite Element Method (FEM)
3. Martensite
4. Drucker-Prager
5. Adolf Martens



شکل ۲- تنش محوری بحرانی مورد نیاز برای شروع تبدیلات فاز مارتنزیتی پیش‌رونده به‌عنوان تابعی از دما (Armboldi و همکاران، ۲۰۰۸)

۴- اثر حافظه شکلی

رفتار آلیاژ حافظه‌دار شکلی زمانی که دمای آن پایین‌تر از M_f است، به‌صورت اثر حافظه شکلی است. این رفتار با حفظ تغییر شکل پلاستیک در هنگام باربرداری همراه است. پس از آن اگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی به دمای بالاتر از A_f افزایش یابد، شکل اصلی با تبدیل در فاز آستنیتی بهبود می‌یابد. اثر حافظه شکلی به‌صورت شماتیک در شکل (۳) در فضای تنش- کرنش- دما نشان داده شده است. چنانچه تنش افزایش یابد، رفتار مواد در ابتدا به‌صورت خطی الاستیک (مرحله ۱ تا ۲)، سپس با تغییر شکل پلاستیک شروع به توزیع تنش تقریباً ثابت (مرحله ۲ تا ۳) می‌کند. با این حال، تغییر شکل SMA اشباع شده و افزایش بیش‌تر بار منجر به ایجاد یک شاخه الاستیک خطی (مرحله ۳ تا ۴) می‌شود. پس از باربرداری، تغییر شکل پسماند (نقطه ۵) را می‌توان با حرارت دادن مواد در دمای مشخصه و بدون باربرداری (مرحله ۶ تا ۷) بهبود بخشید. درنهایت اگر مواد را به دمای اولیه سرد کرد، مواد اولیه حالت کاملاً بهبودیافته پیدا می‌کنند (Lecce, ۲۰۱۴). اثر حافظه شکلی مبنی بر انتقال فاز مارتنزیتی مصالح می‌باشد. درواقع رفتار SMA را می‌توان با توجه به انتقال فاز و جهت‌گیری مجدد از انواع مارتنزیت تفسیر کرد. SME در دمای پایین رخ می‌دهد. ساختار مواد در ابتدا از مارتنزیت جفت شده تشکیل شده و پس از بارگذاری، تنش اعمالی برای جفت نشده‌ها به مقدار بحرانی می‌رسد (نقطه ۲) و جهت‌گیری مجدد مارتنزیت مربوط به تغییر شکل ماکروسکوپی (۲ تا ۳) شروع می‌شود (Lecce, ۲۰۱۴).

دو خاصیت دیگر که به اثر حافظه شکلی^۹ مرتبط است، شبه‌الاستیسیته^{۱۰} و ترموالاستیسیته^{۱۱} می‌باشد. خاصیت شبه‌الاستیسیته مربوط به موادی است که می‌توانند پس از تسلیم شدن به‌طور کامل تغییر شکل خود را بازگردانند (در برخی مواد بازیابی تغییر شکل بیش از ۱۰ درصد است). خاصیت ترموالاستیسیته نیز عملکرد وابسته به کرنش بازگشت‌پذیر را در شرایط دمایی نشان می‌دهد (Ölander, ۱۹۳۲).

در سال ۲۰۱۴ روشی برای کنترل سازه یک خرپای بزرگ توسط سیستم‌های SMA پیشنهاد گردید. ازجمله دلایلی که این محصولات به مرحله تجاری نرسیده‌اند، هزینه سیستم‌های پیشنهادی (کمک‌فهر و میراگر)، پیچیدگی کنترل پویا و مقیاس بزرگ خرپا می‌باشد. بسته به خواص مواد آلیاژ و شرایط خارجی، بازیابی تغییر شکل می‌تواند به دو روش صورت گیرد (Lecce, ۲۰۱۴):

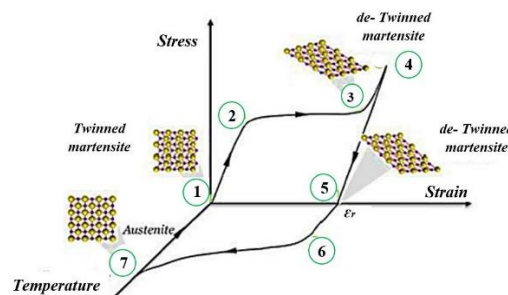
الف) اگر ماده در دمای پایین دارای تغییر شکل باشد، شکل اصلی آن را می‌توان با حرارت دادن در دمای مشخصه بازیافت. این ویژگی به‌عنوان اثر حافظه شکل (SME) شناخته شده است.

ب) اگر ماده در دمای بالا دارای تغییر شکل باشد، شکل اصلی آن را می‌توان به‌سادگی با حذف بار اعمالی بازیافت. این ویژگی به‌عنوان شبه‌الاستیسیته (SE) شناخته شده است. رفتار معمولی اتصال SMA بیانگر مواد فعال است. به‌طور خاص، به‌دلیل تبدیل فاز از دمای پایین (مارتنزیتی^{۱۲}) با درجه حرارت بالا (آستنیتی^{۱۳})، ساختار کریستالوگرافی^{۱۴} SME هر دو قابلیت دریافت و تحریک را فراهم نموده و بازیابی تغییر شکل رخ می‌دهد. این در حالی است که شبه‌الاستیسیته بازیابی تغییر شکل را در غیاب تغییر دما انجام می‌دهد. بنابراین شبه‌الاستیسیته به‌طور کلی در موارد کاربردی غیرفعال استفاده می‌شود (Lecce, ۲۰۱۴). شکل (۲) تنش محوری بحرانی مورد نیاز برای شروع تبدیلات فاز مارتنزیتی پیش‌رونده به‌عنوان تابعی از دما را نشان می‌دهد. این تبدیلات به این شرح است که درجه حرارت یا تبدیلات تنش نمی‌تواند توسط یک مقدار واحد دما یا تنش مشخص شود. درواقع تبدیلات دما از ۴ درجه حرارت ناشی می‌شود. M_s و M_f در طول گرمایش و A_s و A_f در حین سرمایش. M_f و M_s به‌ترتیب بیانگر شروع و پایان درجه حرارت تبدیل فاز اصلی مارتنزیت و A_s و A_f بیانگر درجه حرارت تبدیل معکوس شروع و پایان آستنیت است (Armboldi و همکاران، ۲۰۰۸).

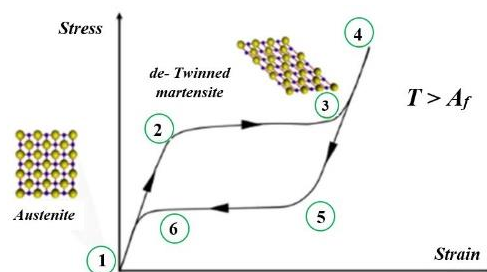
12. Martensite
13. Austenite
14. Crystallography

9. Shape Memory Effect (SME)
10. Pseudoelasticity
11. Thermoelasticity

همچنین از بارگذاری چرخه‌ای در انتهای تیر مطابق با الگوی بارگذاری نشان داده شده در شکل (۷) استفاده می‌شود. در این اتصال برای راستی‌آزمایی از دو نوع بتن شامل بتن معمولی با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال و بتن خودمتراکم با مقاومت فشاری ۴۵ مگاپاسکال استفاده شد. علت استفاده از بتن خودمتراکم، سهولت در اجرا و افزایش مقاومت بتن بود. برای میلگردهای طولی ستون و میلگردهای عرضی تیر و ستون از فولاد و برای میلگردهای طولی تیر از SMA مطابق با خصوصیات ذکر شده در جدول (۱) استفاده گردید.

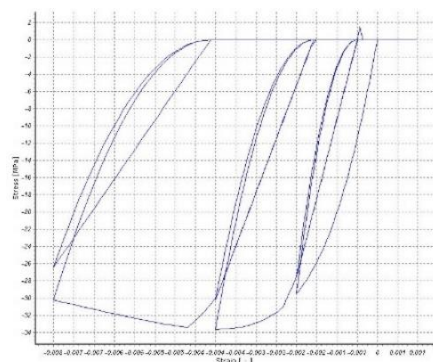


رفتار شبه الاستیسیته SMA با تبدیل ناشی از تنش می‌تواند در دمای بالای A_f همراه باشد. درواقع آلیاژ می‌تواند به‌صورت الاستیک در سطح نرمال بالاتر از مقدار بار اعمالی در فاز آستنیتی تغییر شکل دهد. به‌طور خاص، آلیاژ نیکل-تیتانیوم (نیتینول^{۱۵}) می‌تواند به‌صورت الاستیک نزدیک به ۸ درصد کرنش (درحالی‌که بسیاری از فلزات تنها توانایی کرنش الاستیک کم‌تر از یک درصد را دارا می‌باشند) داشته باشد. اعمال بار باعث تبدیل آستنیت جفت نشده به مارتنزیت می‌شود. پس از باربرداری، فاز مارتنزیت ناپایدار می‌شود و تبدیل به فاز آستنیت اولیه خود و در نتیجه کرنش با حذف بار به‌طور کامل بازیابی می‌شود. رفتار شبه الاستیسیته در فضای تنش-کرنش در شکل (۴) مشاهده می‌شود (Lecce, ۲۰۱۴).



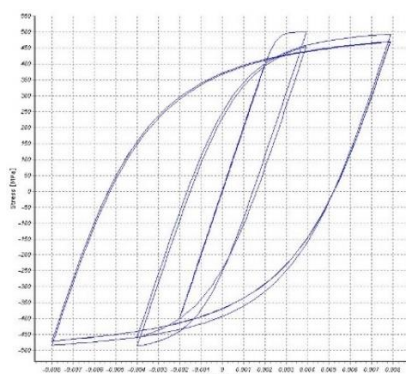
۵- راستی آزمایی

ابتدا جهت کالیبره نمودن نرم افزار، از یک نمونه آزمایشگاهی شامل یک اتصال خارجی تیر به ستون بتن مسلح با مشخصات هندسی ارائه شده در شکل (۵) تحت بارگذاری چرخه‌ای استفاده گردید. به‌طوری‌که با بررسی نتایج مشاهده گردید که رفتار چرخه‌ای مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی از تطابق خوبی برخوردار بودند. به‌همین منظور در این بخش جهت راستی‌آزمایی از نمونه آزمایشگاهی Azariani و همکاران (۲۰۱۸) استفاده می‌شود، که شامل اتصال خارجی تیر به ستون بتن مسلح است. جزئیات



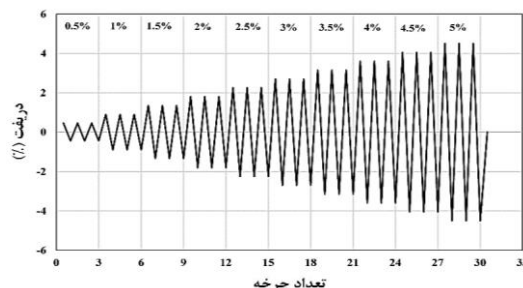
شکل ۸- مدل بتنی غیر خطی Mander و همکاران (راهنمای نرم افزار Seismo Struct، ۲۰۱۶)

برای فولاد نیز مدل هایی همچون مدل دو خطی^{۲۱}، منگوتو-پینتو^{۲۱}، داد-رسترو^{۲۲} و مونته-نوتی^{۲۳} وجود دارد. در این مقاله برای فولاد از مدل منگوتو-پینتو مطابق شکل (۹) استفاده شده است، که مدلی مناسب برای سازه های بتن آرمه بخصوص سازه های تحت اثر بارگذاری چرخه ای می باشد (راهنمای نرم افزار Seismo Struct، ۲۰۱۶).



شکل ۹- مدل فولادی Menegotto و Pinto (راهنمای نرم افزار Seismo Struct، ۲۰۱۶)

همچنین در نرم افزار Seismo Struct این قابلیت وجود دارد که بتوان مصالح با خاصیت فوق ارتجاعی و مصالح هوشمند نظیر SMA را شبیه سازی نمود. مصالح SMA در این نرم افزار تحت عنوان se_sma توسط آریکیو^{۲۴} و ساکو^{۲۵} پیشنهاد شده است؛ به طوری که جهت پیش بینی مدل فوق ارتجاعی این میلگردهای SMA، پارامترهای نشان داده شده در شکل (۱۰) لازم است. برای این منظور مقادیر عددی هریک از پارامترهای نشان داده شده در شکل (۱۰) جهت تعریف این ماده در جدول (۱) ذکر شده است.



شکل ۷- الگوی بارگذاری چرخه ای در انتهای تیر (Azariani و همکاران، ۲۰۱۸)

جدول ۱- مشخصات مصالح فولادی و SMA در اتصال

آزمایشگاهی Azariani و همکاران (Azariani و همکاران، ۲۰۱۸)

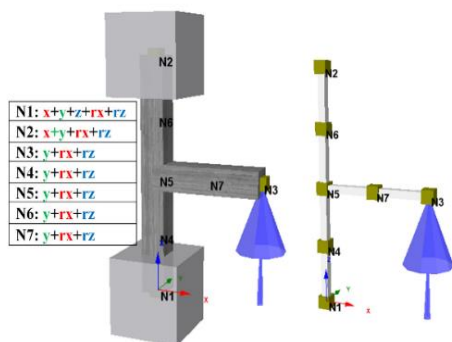
فولاد			
میلگرد طولی	میلگرد عرضی	تیر	ستون
مشخصات	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	۸۳	۲۰۲/۴
	مقاومت تسلیم (مگاپاسکال)	۵۵۰	۴۸۴
	مقاومت نهایی (مگاپاسکال)	۱۱۰۰	۶۴۹
SMA			
وزن مخصوص (N/mm ³)			
تنش آغاز رفتار آستنیت به مارتنزیت (مگاپاسکال)، f_r	۴۳۰		
تنش پایان رفتار آستنیت به مارتنزیت (مگاپاسکال)، f_{p1}	۵۰۰		
تنش آغاز رفتار مارتنزیت به آستنیت (مگاپاسکال)، f_{t1}	۲۰۰		
تنش پایان رفتار مارتنزیت به آستنیت (مگاپاسکال)، f_{t2}	۱۲۰		
محدوده کرنش برای رفتار پایدار فوق ارتجاعی ϵ_1 ، (%)	۴		

نرم افزار Seismo Struct قادر به شبیه سازی خواص مکانیکی مصالح مانند بتن، فولاد، FRP و مصالح هوشمند نظیر SMA با بیشترین دقت است. تحلیل های استاتیکی و دینامیکی تاریخچه زمانی، پوش آور معمولی و تطبیقی، تحلیل دینامیکی افزایشی و مقادیر ویژه از جمله تحلیل های ارائه شده در این نرم افزار می باشد. در کتابخانه مصالح برای بتن مدل بتنی سه خطی^{۱۶}، مدل های بتنی غیرخطی Mander و همکاران^{۱۷}، Mander-Cahng^{۱۸} و Kappos^{۱۹} و konstantinidis^{۱۹} پیشنهاد شده است که در این پژوهش از مدل Mander و همکاران مطابق شکل (۸) استفاده می شود. مدول الاستیک بتن مطابق رابطه پیشنهادی Priestley و همکاران (۱۹۹۶) برابر ۲۴/۸۷ گیگاپاسکال انتخاب شد.

21. Stl_mp
22. Stl_dr
23. Stl_mn
24. Auricchio
25. Sacco

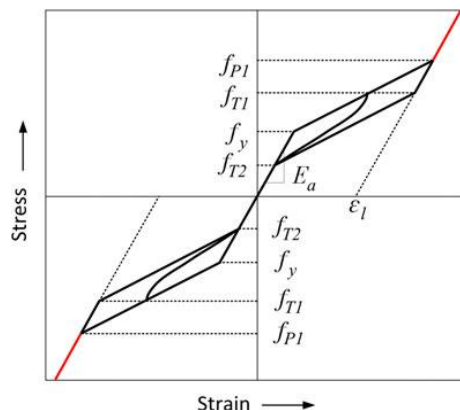
16. Con_tl
17. Con_ma
18. Con_cm
19. Con_hs
20. Stl_bl

اتصال پذیری المان تعیین شد. نهایتاً، ماژول‌های قید از طریق شرایط مرزی المان‌ها تعیین شدند. مدل المان محدود نمونه آزمایشگاهی Azariani و همکاران (۲۰۱۸) در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در این شکل مشخصات مدل سازی شده گره‌ها، اعضا و اتصال، شرایط مرزی و محل اعمال بار چرخه‌ای مشخص شده است. برای بررسی بیشتر در راستی آزمایی، دو نمونه از نمونه‌های آزمایشگاهی Azariani و همکاران (۲۰۱۸) که شامل شرایط مشابه هستند و تنها مقاومت فشاری بتن تفاوت دارد، در نرم افزار ساخته و تحلیل گردید. شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مقایسه منحنی بار-دریفت^{۴۲} انتهای تیر مربوط به نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی دارای SMA را برای دو حالت مقاومت فشاری بتن ۳۰ و ۴۵ مگاپاسکال نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- شرایط مرزی گره‌ها و اعمال الگوی بارگذاری در نرم افزار

همان طور که از شکل (۱۳) مشاهده می‌شود مدلی که مقاومت فشاری آن ۴۵ مگاپاسکال بوده در مقایسه با نمونه مشابه با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال (شکل (۱۲)) تطابق بهتری بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی وجود دارد. به طور کلی در هر دو حالت، مدل تحلیلی توانسته است نمودار حاصل از نتایج آزمایشگاه را به طور نسبتاً مناسبی پوشش دهد. با این حال، اختلاف مشاهده شده بین نتایج عددی و تحلیلی به این علت است که در مدل‌های عددی حلقه‌های چرخه‌ای مربوط به اتصال تیر به ستون، اثرات کاهش مقاومت، کاهش سختی و باریک‌شدگی با خطاهای محاسباتی همراه بودند. خاطرنشان می‌سازد که این اختلافات در مطالعات مشابه محققین دیگر از جمله Azariani (۲۰۱۸) نیز گزارش شده است.



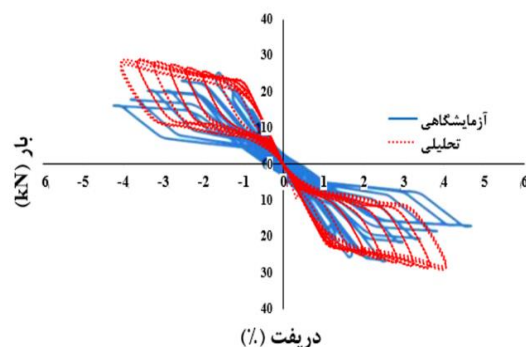
شکل ۱۰- مدل رفتاری مصالح SMA (Shiravand و همکاران، ۲۰۱۷)

در این مقاله تیرها به دو المان و ستون‌ها به چهار المان تقسیم شدند. روش مورد استفاده برای تحلیل اتصال از نوع تحلیل تاریخچه زمانی استاتیکی بود. مشخصات المان‌ها در نرم افزار Seismo Struct در ماژول مربوط به Element تعریف گردید. استفاده از المان‌های مختلفی همچون المان قابی از نوع نیرویی (infrmFB)^{۲۶}، المان قابی با مفصل پلاستیک از نوع نیرویی (infrmFBPH)^{۲۷}، المان قابی با مفصل پلاستیک از نوع تغییر مکان غیر الاستیک (infrmDBPH)^{۲۸}، المان قابی از نوع تغییر مکان غیرالاستیک (infrmDB)^{۲۹}، المان قابی الاستیک (elfrm)^{۳۰}، المان خرابایی غیرالاستیک (truss)^{۳۱}، المان قاب بنایی غیرالاستیک (masonry)^{۳۲}، المان از نوع دندانه دار (rack)^{۳۳}، المان بزرگ فونداسیون کم عمق (SSI1)^{۳۴}، المان بزرگ سر شمع (SSI2)^{۳۵}، المان الاستومتری پاتاقانی (bearing 1)^{۳۶}، المان پاندول اصطکاکی (bearing 2)^{۳۷}، المان جرم توده ای (Imass)^{۳۸}، المان جرم توزیع شده (dmass)^{۳۹} و المان داشبورد میرا (dashpt)^{۴۰} که در نرم افزار موجود است می‌توان استفاده نمود. المان قابی در این نرم افزار از نوع المان قابی با مفصل پلاستیک از نوع نیرویی (infrmFBPH) برای تیر، ستون، میلگردهای طولی و عرضی ستون و تیر انتخاب شد. پس از تعریف مشخصات المان‌ها جهت ایجاد و اتصال آن‌ها در مدل سازی، ماژول اتصال المان^{۴۱} استفاده شد. هندسه سازه در نرم افزار Seismo Struct در یک فرایند سه مرحله‌ای تعریف گردید. برای این منظور، ابتدا تمامی گره‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای تعریف شدند. سپس، روش مربوط به اتصال المان‌ها تعریف و

35. Pile head macro-element
36. Elastomeric Bearing 1 Element (Bouc Wen)
37. Friction Pendulum Bearing/System
38. Lumped mass
39. Distributed mass
40. Dashpot damping
41. Element Connectivity module
42. Load-Drift

26. Inelastic force-based frame element type
27. Inelastic force-based plastic hinge frame element type
28. Inelastic displacement-based plastic hinge frame element type
29. Inelastic displacement-based frame element type
30. Elastic frame element
31. Inelastic truss element
32. Inelastic masonry frame element
33. Rack element type
34. Shallow foundation macro-element

در جدول (۲) خلاصه‌ای از نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی برای نمونه‌های موردنظر ارائه شده است. در این جدول f_c' مقاومت فشاری بتن، P_u بار نهایی در پایان بارگذاری، P_y بار متناظر با تسلیم‌شدگی میلگردهای طولی تیر و δ_u و δ_y دررفت انتهای تیر هستند. در قسمت آزمایشگاهی، بارگذاری چرخه‌ای در انتهای تیر جهت به‌دست آوردن بار نهایی، بار تسلیم و دررفت‌های متناظر اعمال گردیده و تسلیم در سیکل پنجم بارگذاری رخ داده است. مقادیر تحلیلی ارائه‌شده در جدول (۲) نیز براساس نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار Seismo Struct به‌دست آمده‌اند. با مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و تحلیلی موجود در جدول (۲) ملاحظه می‌شود که یک تطابق نسبتاً مناسبی بین آن‌ها وجود دارد.



شکل ۱۲- مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی برای بتن با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال

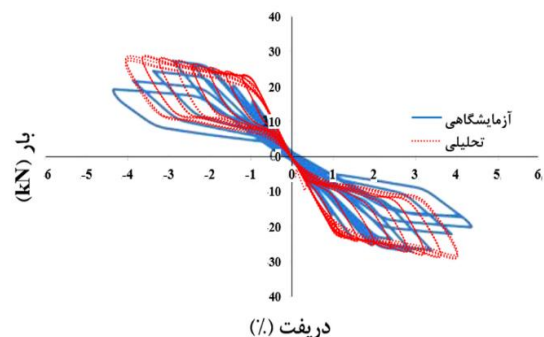
جدول ۲- مقایسه نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی دارای میلگردهای SMA

f_c' (Mpa)	نمونه آزمایشگاهی				نمونه تحلیلی			
	P_y (kN)	δ_y (%)	P_u (kN)	δ_u (%)	P_y (kN)	δ_y (%)	P_u (kN)	δ_u (%)
۳۰	۱۳/۲۳	۱/۴۷	۲۴/۵۹	۲/۷۳	۲۲/۵۵	۱/۲۲	۲۷/۰۷	۴/۰۵
۴۵	۱۳/۶۵	۱/۵۱	۲۷/۲۶	۳/۰۵	۲۳/۰۲	۱/۲۲	۲۸/۲۴	۳/۶۵
مقاومت ۳۰ Mpa					مقاومت ۴۵ Mpa			
اختلاف نتایج	P_y (kN)	۹/۳۲			۹/۳۷			
تحلیلی با	(/.) δ_y	-۰/۲۵			-۰/۲۹			
آزمایشگاه	P_u (kN)	۲/۴۸			۰/۹۸			
	(/.) δ_u	۱/۳۲			۰/۶			

- تأثیر SMA به‌عنوان خاموت در ناحیه پلاستیک (بحرانی) تیر،
- تأثیر استفاده هم‌زمان SMA به‌عنوان میلگرد و خاموت (جدول (۴)).
- تأثیر مقطع معادل دایروی ستون با خاموت تنگ یا دورپیچی (جدول (۵)). معرفی مدل‌های بررسی‌شده در این مقاله جهت مطالعه پارامتری در جدول‌های (۳) تا (۵) آورده شده‌اند.

جدول ۳- مدل‌ها با متغیر مقاومت فشاری بتن در مجموعه

اتصال		
نام مدل	مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)	تغییر مقاومت نسبت به‌حالت اولیه
مدل مرجع	۳۰	۰
SMA+10	۳۳	+۱۰٪
SMA+15	۳۴/۵	+۱۵٪
SMA+20	۳۶	+۲۰٪
SMA+25	۳۷/۵	+۲۵٪
SMA+30	۳۹	+۳۰٪
SMA-10	۲۷	-۱۰٪
SMA-15	۲۵/۵	-۱۵٪
SMA-20	۲۴	-۲۰٪
SMA-25	۲۲/۵	-۲۵٪
SMA-30	۲۱	-۳۰٪



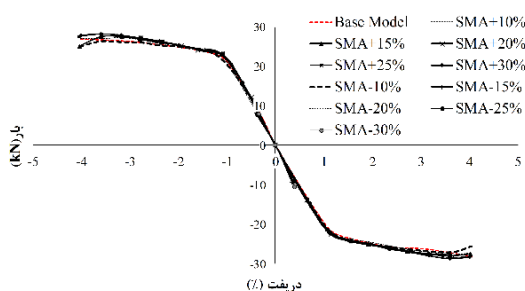
شکل ۱۳- مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی برای بتن با مقاومت فشاری ۴۵ مگاپاسکال

۶- مطالعه پارامتری عددی

در این بخش به‌منظور بررسی تأثیر SMA بر رفتار چرخه‌ای اتصال بتنی، مطالعه پارامتری عددی موردبررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، مدل کالیبره شده دارای مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال در بخش ۵ به‌عنوان مدل مرجع انتخاب و اثر پارامترهای زیر در این نمونه اعمال می‌گردد. همان‌طور که در بخش ۵ ذکر شد، در مدل مرجع میلگردهای طولی ستون و میلگردهای عرضی تیر و ستون از فولاد و میلگردهای طولی تیر از SMA استفاده شده است.

- تأثیر مقاومت فشاری بتن (جدول (۳)).

شده است. جدول (۶) مقادیر P_u ، P_y و δ_u و δ_y به دست آمده از نتایج تحلیل عددی برای هر یک از نمونه‌های مورد بررسی را با تغییر مقاومت فشاری بتن نشان داده و با نمونه مرجع مقایسه می‌کند. همان‌طور که از جدول (۶) ملاحظه می‌شود اثر افزایش یا کاهش مقاومت فشاری بتن بر رفتار چرخه‌ای اتصال دارای SMA در ناحیه الاستیک تقریباً نزدیک به رفتار مدل مرجع است اما در ناحیه غیرالاستیک دارای تفاوت بوده به‌طوری‌که ظرفیت تحمل بار با افزایش ۳۰ درصدی مقاومت فشاری بتن (یعنی بتن با مقاومت ۳۹ مگاپاسکال) میزان ۱/۶۵ درصد نسبت به نمونه اصلی افزایش یافته است. برای درک بهتر تأثیر مقاومت فشاری بتن بر رفتار چرخه‌ای اتصال دارای SMA، شکل (۱۶) ارائه می‌شود. همان‌طور که از شکل (۱۶) ملاحظه می‌گردد، افزایش مقاومت فشاری از ۲۵/۵ مگاپاسکال به ۲۷ مگاپاسکال سبب افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در بارها و دررفت‌های متناظر شده است، اما افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۷ مگاپاسکال به بعد تأثیر ناچیزی بر بارها و دررفت‌های متناظر داشته است.



شکل ۱۵- منحنی‌های پوش رفتارهای چرخه‌ای در مقاومت‌های فشاری مختلف

جدول ۶- تأثیر مقاومت فشاری بتن بر نیروها و دررفت‌های متناظر با حالت تسلیم و نهایی

f_c' (Mpa)	نمونه تحلیلی			
	P_y (kN)	δ_y (%)	P_u (kN)	δ_u (%)
۳۰	۲۲/۵۵	۱/۲۲	۲۷/۰۷	۴/۰۵
۳۳	۲۲/۶۷	۱/۲۲	۲۶/۴۸	۳/۲۴
۳۴/۵	۲۲/۷۳	۱/۲۲	۲۶/۷۲	۳/۶۵
۳۶	۲۲/۷۸	۱/۲۲	۲۶/۸۶	۳/۲۴
۳۷/۵	۲۲/۸۲	۱/۲۲	۲۷/۱۳	۳/۶۵
۳۹	۲۲/۸۷	۱/۲۲	۲۷/۵۷	۳/۶۵
۲۷	۲۲/۳۸	۱/۲۲	۲۵/۵۱	۳/۶۵
۲۵/۵	۲/۴۴	۰/۰۸	۸/۸۵	۰/۴۰۵
۲۴	۲/۴۰	۰/۰۸	۸/۷۳	۰/۴۰۵
۲۲/۵	۲/۳۶	۰/۰۸	۸/۶۱	۰/۴۰۵
۲۱	۲/۳۵	۰/۰۸	۱۰/۴۷	۰/۴۰۵

جدول ۴- مدل‌ها با متغیر استفاده هم‌زمان از SMA به‌عنوان

خاموت و میلگرد

نام مدل	میلگرد SMA	مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)
SMA-Kh-b	میلگرد و خاموت	۳۰
SMA-Khamoot	خاموت	۳۰

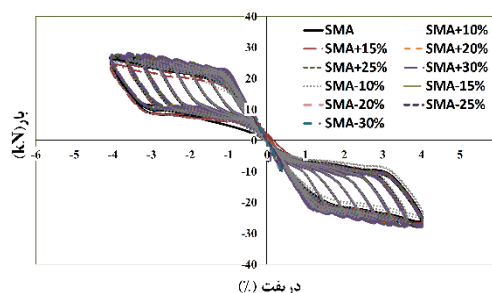
جدول ۵- مدل‌ها با ستون دایروی معادل و خاموت تنگ یا

دورپیچ

نام مدل	نوع خاموت	مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)	تغییر مقاومت نسبت به حالت اولیه
C-Sp	دورپیچ	۳۰	۰
C-Sp-10%	دورپیچ	۳۳	+۱۰٪
C-Sp-20%	دورپیچ	۳۶	+۲۰٪
C-Sp-30%	دورپیچ	۳۹	+۳۰٪
C-Sp-50%	دورپیچ	۴۵	+۵۰٪
C-St	تنگ	۳۰	۰
C-St-10%	تنگ	۳۳	+۱۰٪
C-St-20%	تنگ	۳۶	+۲۰٪
C-St-30%	تنگ	۳۹	+۳۰٪
C-St-50%	تنگ	۴۵	+۵۰٪

۱-۶- تأثیر مقاومت فشاری بتن

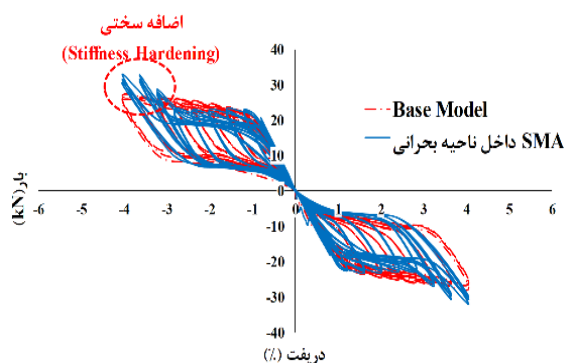
تأثیر مقاومت فشاری بتن بر رفتار چرخه‌ای اتصال بتن‌آرمه دارای SMA، با افزایش و کاهش ده درصدی مقاومت فشاری بتن نسبت به نمونه مرجع در محدوده ۲۱-۳۹ مگاپاسکال مطابق شکل (۱۴) مورد تحلیل عددی قرار گرفته است. در این تحلیل همان مقادیر پیش‌فرض مدل کالبره شده برای پارامترهای مدول الاستیسیته مماسی اولیه، مقاومت کششی تک‌محوره، کرنش در مقاومت فشاری و ضریب پواسون^{۴۳} انتخاب شده‌اند.



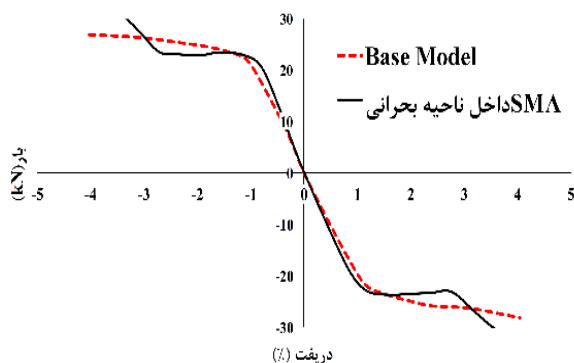
شکل ۱۴- نمودار پوش رفتارهای چرخه‌ای در مقاومت‌های فشاری مختلف

با توجه به فشردگی نمودارها در مقاومت‌های فشاری مختلف نمودارهای پوش رفتارهای چرخه‌ای نیز در شکل (۱۵) نشان داده

نمودار شکل (۱۷) حاصل گردید. ناحیه بحرانی برای تیر بر مبنای مبحث نهم مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲) که منطبق بر آیین نامه بتن آمریکا (ACI318-14) می باشد، محاسبه گردید که در آن طول این ناحیه حداقل دو برابر ارتفاع مقطع تیر بوده و ضوابط میلگردگذاری عرضی در این ناحیه طبق دستورالعمل مذکور رعایت شده است. برای تیر مورد بررسی ناحیه بحرانی برابر ۴۰ سانتی متر محاسبه گردید. همان طور که ملاحظه می شود، تأثیر SMA به عنوان خاموت بر رفتار چرخه های در طول مفصل پلاستیک تیر باعث ایجاد اضافه سختی^{۴۴} و در نتیجه سبب افزایش انرژی جذب شده چرخه ای خواهد شد. این اضافه سختی در ناحیه بحرانی سبب مقاوم شدن تیر گردیده و تخریب در این قسمت را به تأخیر می اندازد و ضمن استفاده از خاصیت بازیابی تغییر شکل SMA، تغییر شکل هایی که به دلیل ترک خوردگی در این ناحیه اتفاق می افتد را جبران می کند. سختی اولیه بیش تر در این حالت دریافت اتصال را کاهش می دهد. مقایسه منحنی پوش رفتارهای چرخه ای نمونه اصلی و نمونه با SMA در داخل یا خارج ناحیه بحرانی تیر در شکل (۱۸) نشان داده شده است.

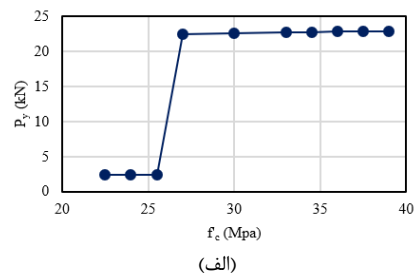


شکل ۱۷- تأثیر SMA به عنوان خاموت در ناحیه بحرانی تیر بر رفتار چرخه ای

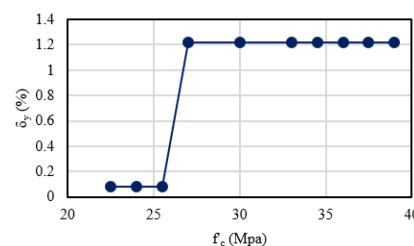


شکل ۱۸- تأثیر SMA به عنوان خاموت در ناحیه بحرانی تیر بر منحنی های پوش رفتار چرخه ای

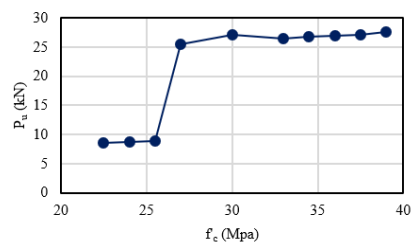
با این حال مطابق شکل (۱۶-د) بیشترین میزان دریافت متناظر با بار نهایی در مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال بوده و برابر ۴/۰۵ درصد به دست آمده است. همچنین مطابق شکل (۱۶-ج) بیشترین بار نهایی در مقاومت فشاری ۳۹ مگاپاسکال و برابر ۲۷/۵۷ کیلو نیوتن حاصل گردید.



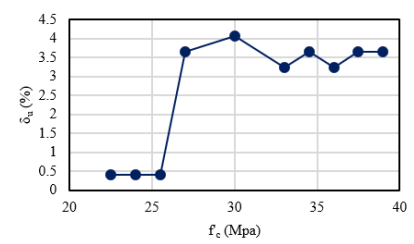
(الف)



(ب)



(ج)



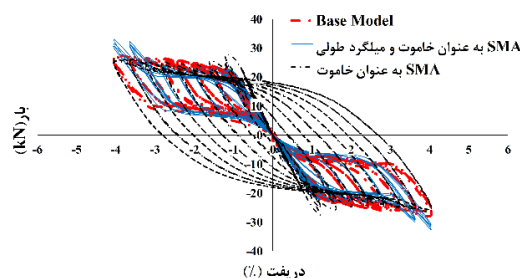
(د)

شکل ۱۶- تأثیر مقاومت فشاری بتن بر: الف) نیرو تسلیم، ب) دریافت متناظر با حالت تسلیم، ج) نیرو نهایی، د) دریافت متناظر با حالت نهایی

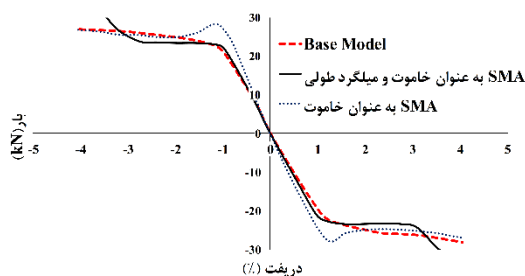
۲-۶- تأثیر SMA به عنوان خاموت در ناحیه پلاستیک (بحرانی) تیر

در این حالت از SMA به عنوان خاموت در ناحیه بحرانی تیر (در طول مفصل پلاستیک) مدل مرجع استفاده شد و نتایج مطابق

نیست. در حالت دوم که از SMA به عنوان خاموت استفاده شد و میلگرد طولی از جنس فولاد بود، در دریفت برابر مقاومت نظیر تسلیم شدگی نسبت به نمونه مرجع بیش تر بوده که در دریفت نهایی آن مقاومت کمتری مشاهده شد (حدود ۲۴ درصد) و نسبت به حالت اول که میلگرد طولی و عرضی از SMA بود، عملکرد بهتری ضمن مقرون به صرفه بودن آن دارد.



شکل ۱۹- تأثیر استفاده هم زمان SMA به عنوان میلگرد طولی و خاموت بر رفتار چرخه‌ای



شکل ۲۰- تأثیر استفاده هم زمان SMA به عنوان میلگرد طولی و خاموت بر منحنی‌های پوش رفتار چرخه‌ای

۴-۶- تأثیر مقطع معادل دایروی ستون با خاموت تنگ یا دورپیچ

در این حالت از ستون دایروی با مقطع و ظرفیت معادل ستون مستطیلی استفاده گردید و طراحی این ستون منطبق بر ضوابط استاندارد مبحث نهم مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲) انجام پذیرفت. خاموت‌ها یک بار به صورت تنگ و بار دیگر به صورت دورپیچ مطابق شکل (۲۱) به کار گرفته شدند. مابقی مشخصات و نحوه قرار گرفتن SMA همانند نمونه مرجع است.

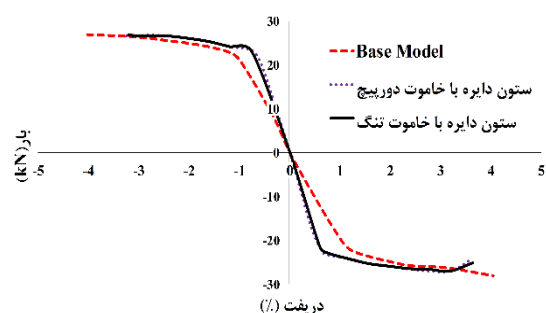
رفتار چرخه‌ای اتصال در این حالت در مقایسه با رفتار چرخه‌ای نمونه مرجع در شکل (۲۲) آورده شده است. همان طور که از شکل (۲۳) ملاحظه می‌شود، منحنی‌های پوش رفتار چرخه نمونه با مقطع دایروی چه با خاموت از نوع تنگ و چه از نوع دورپیچ تقریباً منطبق بر یکدیگر هستند و در مقایسه با نمونه اصلی دارای سختی الاستیک بیش تری خواهند بود.

همان طور که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، تسلیم میلگردهای SMA در دریفتی برابر با نمونه مرجع و با مقاومتی برابر با آن بوده اما در دریفت نهایی علی‌رغم مقداری برابر، بار نهایی بیش تر شده است. بنابراین استفاده از میلگرد SMA تنها در ناحیه پلاستیک انتظار اتصال را در دریفت و مقاومت برآورده کرده و نیازی به ادامه آن بعد از ناحیه مذکور نیست. با این حال اگر تنها در ناحیه پلاستیک میلگرد SMA استفاده شود، صرفه جویی بسیار زیادی انجام شده است به خصوص در دهانه‌های طولی که در مجموعه یک ساختمان ممکن است مقرون به صرفه نباشد. این در حالی است که تنها در ناحیه پلاستیک که فاصله کمی از طول تیر را تشکیل می‌دهد با صرف هزینه‌ای به مراتب کمتر، نیازهای اتصال مرتفع می‌گردد.

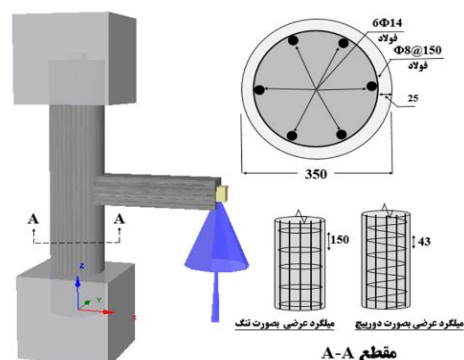
۳-۶- تأثیر استفاده هم زمان SMA به عنوان میلگرد طولی و خاموت

در این حالت تأثیر هم زمان به کارگیری خاموت و میلگرد طولی در مقطع از نوع SMA مورد بررسی قرار گرفته است که در شکل (۱۹) رفتار چرخه‌ای هریک از حالت‌های به کارگیری نسبت به نمونه مرجع نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌گردد تأثیر استفاده SMA به عنوان خاموت و میلگرد طولی توأمان سبب اضافه سختی شده است که با توجه به هزینه بالای آن استفاده از این مقدار میلگرد در طول یک تیر مقرون به صرفه نمی‌باشد. با این حال، در حالتی که تنها خاموت‌ها از نوع SMA و میلگردهای طولی از نوع فولاد بوده، تأثیر چشمگیری بر رفتار چرخه‌ای داشته است به گونه‌ای که اثر باریک‌شدگی^{۴۵} حذف شده و سبب جذب انرژی چرخه‌ای بالایی شده است. در این حالت سختی اولیه و مقاومت آن نسبت به مدل مرجع و مدلی که توأمان از میلگرد و SMA استفاده شده، بیش تر است که دریفت سازه را در چرخه‌های اولیه و نیز ناحیه الاستیک کمتر می‌کند. مضاف بر این در رفتار کلی SMA باریک‌شدگی وجود دارد و ترکیب فولاد و بتن با حذف باریک‌شدگی، خواص مرکب فولاد و SMA را به خوبی نشان می‌دهد. شکل (۲۰) تأثیر استفاده هم زمان SMA به عنوان میلگرد و خاموت بر منحنی‌های پوش رفتار چرخه‌ای هر یک از نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

همان طور که در جدول (۸) مشاهده می‌شود وقتی از SMA به عنوان خاموت و میلگرد طولی استفاده شد، تسلیم میلگردها در دریفت و مقاومتی برابر با نمونه مرجع بود اما در دریفت نهایی مقاومت نهایی بیش تری نسبت به نمونه مرجع داشت (حدود ۲۲ درصد) که در مقایسه با استفاده SMA به عنوان خاموت امری بدیهی بوده که ضمن هزینه بالای این نوع میلگرد مقرون به صرفه

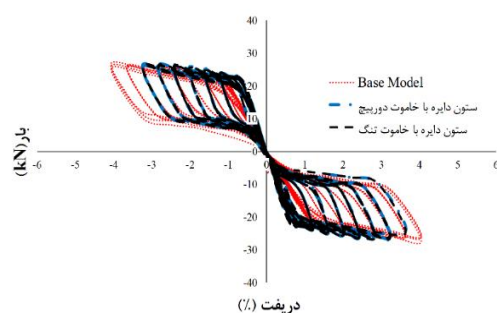


شکل ۲۳- مقایسه منحنی پوش رفتار چرخه‌ای نمونه مرجع با نمونه دارای سطح مقطع دایروی



شکل ۲۱- مشخصات هندسی ستون دایروی با تنگ و ویژه و دورپیچ (ابعاد به میلی متر است)

همان‌طور که از جدول (۹) ملاحظه می‌گردد، میزان بارهای تسلیم نمونه‌های با مقطع دایروی ستون نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته است، اما میزان بار نهایی و دررفت متناظر کاهش یافته است. همچنین از مقایسه دو نمونه با مقطع دایروی ستون مشاهده می‌شود که اثر خاموت مارپیچ، به علت ایجاد محصورشدگی بیشتر، نسبت به خاموت تنگ رفتار بهتری در تحمل بارها و دررفت‌های متناظر داشته است.



شکل ۲۲- مقایسه رفتار چرخه‌ای نمونه اصلی با نمونه دارای سطح مقطع دایروی

جدول ۷- تأثیر SMA به عنوان خاموت در ناحیه بحرانی تیر

f_c' (Mpa)	نمونه مرجع				نمونه دارای خاموت SMA در ناحیه بحرانی تیر			
	P_y (kN)	δ_y (%)	P_u (kN)	δ_u (%)	P_y (kN)	δ_y (%)	P_u (kN)	δ_u (%)
۳۰	۲۲/۵۵	۱/۲۲	۲۷/۰۷	۴/۰۵	۲۲/۵۵	۱/۲۲	۳۲/۸۹	۴/۰۵

جدول ۸- تأثیر استفاده هم‌زمان SMA به عنوان میلگرد طولی و خاموت

f_c' (Mpa)	نمونه مرجع				SMA به عنوان خاموت و میلگرد طولی				SMA به عنوان خاموت			
	P_y (kN)	δ_y (%)	P_u (kN)	δ_u (%)	P_y (kN)	δ_y (%)	P_u (kN)	δ_u (%)	P_y (kN)	δ_y (%)	P_u (kN)	δ_u (%)
۳۰	۲۲/۵۵	۱/۲۲	۲۷/۰۷	۴/۰۵	۲۲/۴۵	۱/۲۲	۳۲/۹	۴/۰۵	۲۷/۲۷	۱/۲۲	۲۵/۲۴	۴/۰۵

جدول ۹- مقایسه نتایج نمونه مرجع با نمونه دارای سطح مقطع دایروی

f_c' (Mpa)	نمونه مرجع				ستون دایروی با خاموت دورپیچ				ستون دایروی با خاموت تنگ			
	P_y (kN)	δ_y (%)	P_u (kN)	δ_u (%)	P_y (kN)	δ_y (%)	P_u (kN)	δ_u (%)	P_y (kN)	δ_y (%)	P_u (kN)	δ_u (%)
۳۰	۲۲/۵۵	۱/۲۲	۲۷/۰۷	۴/۰۵	۲۲/۶۵	۰/۸۱	۲۶/۰۲	۳/۲۴	۲۲/۲	۰/۶۵	۲۶	۳/۲۴

مشابه بودند و تنها در مقاومت فشاری بتن تفاوت داشتند، در نرم-افزار اجزای محدود Seismo Struct ساخته و تحلیل گردیدند. همان‌طور که مشاهده شد، مدلی که مقاومت فشاری آن ۳۰ مگاپاسکال بوده در شیب اولیه نمودار با حفظ سختی نسبت به نمونه آزمایشگاهی افزایش مقاومت داشت. در نمونه مشابه با مقاومت فشاری ۴۵ مگاپاسکال تطابق بهتری ملاحظه گردید و در

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به مطالعه عددی اتصالات بتن‌آرمه با در نظر گرفتن تأثیر میلگرد SMA بر رفتار چرخه‌ای آن‌ها پرداخته شد. برای این منظور جهت راستی‌آزمایی، دو نمونه از نمونه‌های آزمایشگاهی Azariani و همکاران (۲۰۱۸) که شامل شرایط

Asanovic VANJA, Kemal D, "The mechanical behavior and shape memory recovery of cuznal alloys", *Metalurgija*, 2007, 13 (1), 59-64.

Auricchio F, Lubliner J, "A uniaxial model for shape memory alloys", *International Journal of Solids and Structures*, 1997, 34 (27), 3601-3618.

Azariani HR, Esfahani MR, Shariatmadar H, "Behavior of exterior concrete beamcolumn joints reinforced with shape memory alloy (sma) bars", *International Journal of Steel and Composite Structures*. Struct, 2018, 28 (1), 83-98.

Biddah A, Ghobarah A, "Inelastic shear deformation modeling in existing and rehabilitated concrete frames", *Proceedings of the Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 1998.

Blume JA, Newmark NM, Corning LH, "Design of multi-storey concrete buildings for earthquake motions", *Portland Cement Association*, Skokie, Illinois, 1961.

Boyd JG, Lagoudas DC, "Thermomechanical response of shape memory composites", *International Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1994, 5 (3), 333-346.

Filiatrault A, Lebrun I, "Seismic rehabilitation of reinforced concrete joints by epoxy pressure injection technique", *Seismic Rehabilitation of Concrete Structures*, American Concrete Institue, Farmington Hills, 1996, SP-160, 73-92.

Funakubo H, Kennedy JB, "Shape memory alloys", *Gordon and Breach*, xii+ 275, Illustrated. 1987.

Hanson NM, Conner HW, "Seismic resistance of reinforced concrete beam-column joints", *Journal of the Structural Division*, ASCE, 1967, 93, 533-560.

Ivshin Y, Pence TJ, "A constitutive model for hysteretic phase transition behavior", *International Journal of Engineering Science*, 1994, 32 (4), 681-704.

Krumme R, Hayes J, Sweeney S, "Structural damping with shape memory alloys: one class of devices", In *Smart Structures and Materials*, International Society for Optics and Photonics, 1995: Passive Damping, 2445, 225-240.

Kuan SYW, "Response of epoxy-repaired r/c exterior beam-column joints", *Proceedings of the 1991 Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, Vancouver, British Colombia, Canada, 1991, 335-344.

Lagoudas DC, (Ed.), "Shape memory alloys: modeling and engineering applications", In *Springer Science and Business Media*, 2008.

Lecce L, (Ed.) "Shape memory alloy engineering: for aerospace", *Structural and Biomedical Applications*, Elsevier, 2014.

Liang C, Rogers CA, "One dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials", *International Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1997, 8 (4), 285-302.

Miller DJ, Fahnstock LA, Eatherton MR, "Development and experimental validation of a nickel-titanium shape memory alloy self-centering buckling-restrained brace", *International Journal of Engineering Structures*, 2012, 40, 288-298.

هر دو حالت مدل تحلیلی توانست نمودار حاصل از نتایج آزمایشگاه را پوشش دهد. در ادامه به تحلیل پارامتری اتصال نمونه اصلی با در نظر گرفتن چهار عامل تأثیر مقاومت فشاری بتن، تأثیر موقعیت SMA به عنوان خاموت در داخل ناحیه پلاستیک (بحرانی) تیر، تأثیر استفاده همزمان SMA به عنوان میلگرد و خاموت و تأثیر مقطع معادل دایروی ستون با خاموت تنگ یا دورپیچ پرداخته شد که به ترتیب برای هریک نتایج زیر حاصل گردید:

(۱) اثر افزایش یا کاهش مقاومت فشاری بتن بر رفتار چرخه‌ای اتصال دارای SMA در ناحیه الاستیک تقریباً نزدیک به رفتار مدل مرجع است اما در ناحیه غیرالاستیک دارای تفاوت بوده به طوری که ظرفیت تحمل بار با افزایش ۳۰ درصدی مقاومت فشاری بتن (یعنی بتن با مقاومت ۳۹ مگاپاسکال) میزان ۱/۶۵ درصد نسبت به نمونه اصلی افزایش یافته است. افزایش مقاومت فشاری بتن، سختی اتصال را نسبت به مدل مرجع افزایش داده است.

(۲) قرارگیری SMA در طول مفصل پلاستیک تیر سبب ایجاد اضافه سختی شده و سبب افزایش سختی و افزایش انرژی جذب شده چرخه‌ای گردید.

(۳) تأثیر استفاده SMA به عنوان خاموت و میلگرد توأمان سبب اضافه سختی گردید اما علی‌رغم تأثیر مثبتی که بر اتصال دارد، هزینه بالای این میلگردها موجب شده استفاده از آن به عنوان میلگرد طولی غیراقتصادی باشد. با این حال، در حالتی که تنها خاموت‌ها از نوع SMA بوده و میلگردهای طولی از نوع فولاد بوده است، تأثیر چشمگیری بر رفتار چرخه‌ای داشته است به گونه‌ای که اثر باریک‌شدگی حذف شده و سبب جذب انرژی چرخه‌ای بالایی شد. همچنین دریافت سازه در حالتی که فولاد و SMA توأمان در تیر باشند، کاهش یافت.

(۴) منحنی‌های پوش رفتار چرخه‌ای نمونه با مقطع ستون دایروی چه با خاموت از نوع تنگ و چه از نوع دورپیچ تقریباً منطبق بر یکدیگر هستند و در مقایسه با نمونه اصلی دارای سختی الاستیک بیش‌تری گردیدند. می‌توان نتیجه گرفت که نتایج بررسی شده در این مقاله قابل‌تعمیم به مقطع دایروی است و برای سایر مقاطع معادل با مقطع مربعی و با ظرفیت برابر قابل استناد می‌باشد.

۸- مراجع

Armaboldi S, Bassani P, Casati R, Passaretti F, Villa E, Tuissi A, "Wire drawing and functional characterization of thin niti wires", *International of Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*, Stresa (literal), 2008.

- Ölander A, "An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys", *International Journal of the American Chemical Society*, 1932, 54 (10), 3819-3833.
- Oudah F, El-Hacha R, "Joint performance in concrete beam-column connections reinforced using sma smart material", *International Journal of Engineering Structures*, 2017, 151, 745-760.
- Park R, Paulay T, "Reinforced concrete structures", John Wiley & Sons, New York, 1975.
- Pereiro-Barcelo J, Bonet JL, Cabanero-Escudero B, Martínez-Jaen B, "Cyclic behavior of hybrid rc columns using high-performance fiber-reinforced concrete and ni-ti sma bars in critical regions", *International Journal of Composite Structures*, 2019, 212, 207-219.
- Piazza Castello, "Seismostruct Help File, Release 7.0.4", Italy, 2016, URL: <http://www.seismosoft.com>.
- Priestley MJN, Seible F, Calvi GM, "Seismic design and retrofit of bridges", John Wiley and Sons, New York, 1996.
- Raniecki B, Rejzner J, Lexcellent C, "Anatomization of hysteresis loops in pure bending of ideal pseudo elastic sma beams", *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43 (5), 1339-1368.
- Shaw JA, Kyriakides S, "Thermomechanical aspects of Ni-Ti", *International Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1995, 43 (8), 1243-1281.
- Shiravand MR, Nashtae MA, Veismoradi S, "Seismic assessment of concrete buildings reinforced with shape memory alloy materials in different stories", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2017, 26 (15), e1384.
- Souza AC, Mamiya EN, Zouain N, "Three-dimensional model for solids undergoing stress-induced phase transformations", *International Journal of MechanicsA/Solids*, 1998, 17 (5), 789-806.
- The National Building Regulations, "Issue 9", ed. 1392.
- Wilde K, Gardoni P, Fujino Y, "Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges", *International Journal of Engineering Structures*, 2000, 22 (3), 222-229.

EXTENDED ABSTRACT

Influence of Shape Memory Alloys on Cyclic Behavior of Reinforced Concrete Joints

Mohammad Golmohammadi^{a,*}, Navid Arvin kheibari^b, Mehdi Mokhtari^c

^a Structural Engineering, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, University of Torbat Heydarieh, Khorasan Razavi, Iran

^b Structural Engineering, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Visiting Scholar in University of Torbat Heydarieh, Khorasan Razavi, Iran

^c Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Received: 12 May 2020; Accepted: 05 January 2021

Keywords:

Shape memory alloy, Super elastic, Reinforced concrete joints, Hysteresis behavior, Seismo struct.

1. Introduction

Shape memory alloy (SMA) is a particular type of metal alloy that has the recovery property of permanent deformation. This alloy includes the typical properties of steel, such as resistance, hardness, performance, and so on. SMAs are used in some applications, including based-isolated buildings, self-repairing building components, aircraft industry, medical industry, mechanical equipment, and effective models for computing tools. In this paper, the effect of SMAs on the cyclic behavior of reinforced concrete (RC) joints is analytically investigated. To this end, after validation of two experimental models in Seismo Struct software, some parametric studies are conducted, such as 1- the effect of compressive strength of concrete, 2- the position of SMA into the plastic zone, 3- the simultaneous use of SMA as longitudinal bars and stirrup, and 4- the use of an equivalent column with a circular cross-section containing spirals or stirrups.

2. Methodology

2.1. Analytical study

In this study, Seismo Struct software was used to analyze concrete joints based on cyclic loading. This software is able to consider nonlinear geometric behavior and nonlinear behavior of materials and can predict frame behavior under static and dynamic loading in large displacements. This software is appropriate to model different materials such as concrete, steel, FRP, and SMA due to its efficiency and precision (Castello, 2016).

2.2. Modeling materials

The axial behavior models proposed by (Auricchio & Sacco, 1997), (Manegotto & Pinto, 1973) were used for beams and columns for specimens with SMA and steel bars, respectively. Auricchio and Sacco's model was the super-elastic model used in the Seismo Struct software, where SMA was subjected to reverse cyclic loadings under stress-induced transformation. Modulus of elasticity of specimens with steel and SMA bars were considered to be 200,000 and 83,000 MPa, respectively. The model for concrete stress-strain was based on the model proposed by (Mander, Priestley, & Park, 1988).

* Corresponding Author

E-mail addresses: m.golmohammadi@torbath.ac.ir (Mohammad Golmohammadi), navidarvin69@yahoo.com (Navid Arvin kheibari), m.mokhtari.civil@semnan.ac.ir (Mehdi Mokhtari).

2.3. Finite element model

In this paper, beams were divided into 2 elements, and columns were divided into 4 elements. The method used for joint analysis was static-time history analysis. Properties of elements in Seismo Struct were defined in the element classes module. The reason for using different elements was to define the properties of the similar element or different sections and materials. To select the frame element, an inelastic force-based plastic hinge frame element type was used. After defining element properties for making and joining elements in modeling, the Element Connectivity module was used. Structure geometry in Seismo Struct was defined in a three-step process. First, all structural and non-structural nodes were defined. Then, the method for joining elements was defined and element connectivity could be determined. Finally, restraints modules were determined by the boundary elements conditions (Castello, 2016). Fig. 1 shows the finite element model of the specimen including the specifications of nodes, members, and joint modeling.

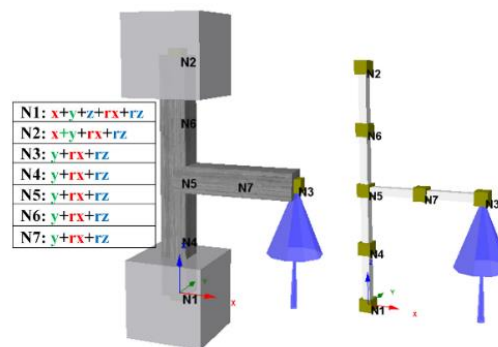


Fig. 1. Finite element model of the specimen

3. Results and discussion

3.1. Effect of compressive strength of concrete

In order to investigate and compare the effect of compressive strength of concrete on the cyclic behavior of RC joints with SMA, the models shown in Table 1 were introduced.

Table 1. Models with variable compressive strength of concrete in the joint

Model name	Compressive strength of concrete (MPa)	Strength variation compared to the initial state
Reference model	30	0
SMA+10	33	+10%
SMA+15	34.5	+15%
SMA+20	36	+20%
SMA+25	37.5	+25%
SMA+30	39	+30%
SMA-10	27	-10%
SMA-15	25.5	-15%
SMA-20	24	-20%
SMA-25	22.5	-25%
SMA-30	21	-30%

3.2. Effect of simultaneous use of SMA as longitudinal bars and stirrup

In order to assess the effect of using SMAs in joints as longitudinal bars and stirrups simultaneously, the following models, shown in table 2, were generated and analyzed.

Table 2. Models with the simultaneous use of SMA as longitudinal bar and stirrup

Model name	SMA type	Compressive strength of concrete (MPa)
SMA-Kh-b	Longitudinal bar and stirrup	30
SMA-Khamoot	Stirrup	30

3.3. Effect of use of an equivalent column with a circular cross-section containing spirals or stirrups

In this case, a column with a circular cross-section and a capacity equivalent to the reference model was proposed. Fig. 2. shows the FE model of the equivalent column with two different types of transverse rebar (spiral and stirrups).

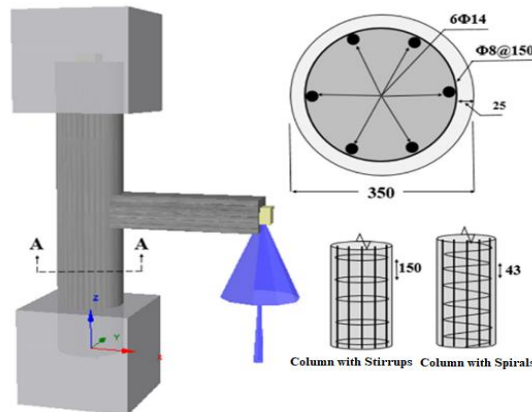


Fig. 2. Finite element model of the equivalent column

In order to investigate the effect of SMA on the equivalent model, the FE models mentioned in table 3 were generated and analyzed.

Table 3. Equivalent models with spiral and stirrup

Model name	Type of transverse rebar	Compressive strength of concrete (MPa)	Strength variation compared to the initial state
C-Sp	Spiral	30	0
C-Sp-10%	Spiral	33	+10%
C-Sp-20%	Spiral	36	+20%
C-Sp-30%	Spiral	39	+30%
C-Sp-50%	Spiral	45	+50%
C-St	Stirrup	30	0
C-St-10%	Stirrup	33	+10%
C-St-20%	Stirrup	36	+20%
C-St-30%	Stirrup	39	+30%
C-St-50%	Stirrup	45	+50%

4. Conclusions

The analytical results showed that the compressive strength of concrete had no effect on the hysteresis behavior of the RC joint in the elastic zone of the joint, while with a 30% increase in the concrete compressive strength in the plastic zone of the joint, the load-bearing capacity increased by about 2%. Also, using SMA in the plastic zone of the beam led to increase in the stiffness, and absorbed cyclic energy. In the case of using the longitudinal bars and stirrups simultaneously as SMA, the pinching effect was disappeared from the hysteresis behavior of the joint, and consequently, high cyclic energy absorption was achieved. Finally, it was observed that implementing the equivalent column with a circular cross-section had the elastic stiffness more than the reference model.

5. References

- Auricchio F, Sacco E, "A superelastic shape-memory-alloy beam model", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1997, 8 (6), 489-501.
- Castello P, "SeismoStruct Help File", Italy. Retrieved from <http://www.seissoft.com>, 2016.
- Mander JB, Priestley MJN, Park R, "Observed stress-strain behavior of confined concrete", *Journal of Structural Engineering*, 1988, 114 (8), 1827-1849.
- Manegotto M, Pinto PE, "Method of analysis for cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending", In *Proceeding of IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads*, 1973 (15-22).