

ارزیابی مدل‌های رفتاری مناسب جهت شبیه‌سازی عددی آلیاژ حافظه دار شکلی نوین پایه مس

مه‌رسا میرزاحسینی^۱، محسن گرامی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران

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

چکیده

بیشتر مطالعات گذشته بر روی آلیاژهای حافظه دار شکلی، به یکی از پرکاربردترین نوع این آلیاژها با نام نیکل تیتانیوم $Ni-Ti$ مربوط می‌شوند. با این حال قیمت بالا و رفتار پیچیده‌ی این آلیاژ به دلیل وابستگی بسیار زیاد به نرخ کرنش، محققین بسیاری را به سوی تولید آلیاژهای جایگزین سوق داده است. مقاله حاضر ضمن ارزیابی خواص آلیاژ نوین پایه مس $Cu-Al-Mn$ که توسط یکی از محققین ژاپنی به نام اراکی معرفی گردیده، قابلیت مدل‌های رفتاری برای شبیه‌سازی عددی این آلیاژ را بررسی می‌کند. آلیاژ مورد نظر ضمن بر خورداری از خواص نظیر سوپر الاستیسیته قابل قیاس با $Ni-Ti$ ، دارای قیمت مناسب تر و وابستگی ناچیز به نرخ کرنش می‌باشد. با بهره‌گیری از خواص این آلیاژ قابلیت سه مدل مستقل از نرخ؛ مدل گراسر کوزارلی، مدل فاگازا و مدل خودبازگشتی؛ در توصیف رفتار این آلیاژ نوین مورد بررسی قرار گرفت. مدل گراسر کوزارلی با وجود پیچیدگی بیشتر نسبت به مدل‌های چند خطی فاگازا و خودبازگشتی، به دلیل داشتن پارامترهای کنترل‌کننده، توصیف دقیق‌تری از رفتار آلیاژ بویژه در نقاط شروع تبدیل دو فاز از خود نشان داد. همچنین پارامترهای ثابت این مدل برای توصیف رفتار میله ای ۱۴ میلی متری از جنس آلیاژ مذکور با انجام فرایند سعی و خطا در نرم افزار متلب ارائه گردید. نتایج شبیه‌سازی عددی رفتار آلیاژ $Cu-Al-Mn$ در آزمایش کشش و شبه استاتیک توسط دو مدل فاگازا و خودبازگشتی نشان داد، این مدل‌ها در کنار سادگی کاربرد و عدم نیاز به پارامترهای آزمایشگاهی پیچیده، انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی داشته‌اند.

کلمات کلیدی: آلیاژ حافظه دار شکلی، مدل‌های رفتاری، مدل گراسر کوزارلی، مدل فاگازا، مدل خودبازگشتی.

* نویسنده مسئول: محسن گرامی

پست الکترونیکی: mgerami@semnan.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2016.41240

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۰۶، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۰۶

شناسه دیجیتال

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2016.41240>

۱- مقدمه

آلیاژهای حافظه دار شکلی^۱ نوعی آلیاژ فلزی هستند که دارای خواصی چون تحمل کرنش‌های بزرگ، قابلیت بازگشت به شکل اولیه بدون هیچگونه تغییر شکل دائمی و جذب انرژی در فرایند بارگذاری و باربرداری می‌باشند، ویژگی‌های مذکور کاربرد این مواد را در کنترل رفتار لرزه ای مناسب می‌سازد [۱].

آلیاژهای حافظه دار شکلی دارای دو فاز اصلی می‌باشند که ساختار کریستالی متفاوتی دارند. فاز اول مارتنزیت^۲ و فاز دیگر آستنیت^۳ نام دارد. فاز آستنیت معمولاً فاز مادر نیز نامیده می‌شود و ساختار کریستالی مکعبی دارد، در حالیکه مارتنزیت ساختار کریستالی نامنظمی دارد. خواص منحصر به فرد آلیاژهای حافظه دار شکلی در نتیجه تبدیل فاز مارتنزیت و آستنیت می‌باشد، این تبدیلات فاز جامد به جامد به عنوان تبدیلات مارتنزیت شناخته می‌شوند و می‌تواند تحت تاثیر دما باشد (اثر حافظه داری شکلی) و یا تحت اثر تنش (اثر فوق الاستیسیته) قرار گیرد. در واقع این دو خاصیت جزو مهمترین خواص آلیاژهای حافظه دار شکلی هستند.

با این حال کاربرد این مواد در سازه‌های واقعی مستلزم شناخت کافی از دیگر خصوصیات رفتاری و پارامترهای موثر خواهد بود. نتایج آزمایشگاهی در این زمینه نشان می‌دهد که خواص اغلب آلیاژهای حافظه دار بویژه نیکل تیتانیوم (Ni-Ti)، که از پر کاربردترین نوع این آلیاژها می‌باشد، به شدت تحت تاثیر نرخ کرنش می‌باشد. به عنوان مثال برخی محققین [۲، ۳، ۴ و ۵] اشاره نمودند که افزایش نرخ کرنش با افزایش تنش تبدیل معکوس^۴ و بدون تغییر قابل توجه در تنش تبدیل رو به جلو^۵ سبب کاهش انرژی تلف شده خواهد شد. از طرف دیگر، در سال ۱۹۹۸ توبوشی و همکاران [۶]، در نرخ کرنش‌های بالاتر کاهش در تنش تبدیل معکوس، افزایش در تنش تبدیل رو به جلو و در نتیجه انرژی تلف شده بیشتری را مشاهده نمودند. در سال ۲۰۰۸ دایانادی و راثو [۷] دریافتند که با افزایش نرخ کرنش تا ۰/۲۵ هرتز حلقه هیستریزس، حرکت رو به جلو داشته و انرژی تلف شده افزایش می‌یابد. سول و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۸] نشان دادند که برای یک محدوده فرکانسی پایین (کمتر از ۰/۰۵ هرتز) انرژی تلف شده به آرامی افزایش می‌یابد و در یک محدوده فرکانسی بالا (بین ۰/۰۵ تا ۳ هرتز) مقدار آن کاهش می‌یابد. ازبلت و هارلباس در سال ۲۰۱۰ [۹] به بررسی اثر فرکانس بارگذاری در محدوده ۰/۰۵ تا ۲ هرتز (که محدوده فرکانسی رویداد های لرزه ای در این رنج قرار دارد) بر روی رفتار کابل‌های سوپر الاستیک Ni-Ti پرداختند آنها دریافتند که با افزایش فرکانس از ۰/۰۵ تا ۲ هرتز، میرایی ویسکوز معادل و انرژی تلف شده تا ۴۷ درصد کاهش می‌یابد. نتایج آزمایشات نشان دهنده ی وابستگی رفتار این آلیاژ به نرخ کرنش می‌باشند [۱۰]. بنابراین با توجه به ماهیت بارگذاری زلزله، بررسی عددی این مواد در سیستم های لرزه ای و میزان اثر بخشی آنها، نیازمند استفاده از مدلهایی با قابلیت شبیه سازی دقیق از رفتار ماده تحت بار چرخه ای می‌باشد.

محققین متعددی به ارائه مدل‌های عددی جهت شبیه سازی رفتار آلیاژهای حافظه دار شکلی پرداخته‌اند. مدل‌های ساختاری^۶ دسته‌ای از مدل‌های ارائه شده هستند که اغلب بر پایه ملاحظات ترمومکانیکی و ترمودینامیکی استوارند [۱۱، ۱۲ و ۱۳]. با این حال پیچیدگی-های این نوع مدل‌ها کاربرد آنها را در شرایط لرزه ای غیر عملی می‌سازد. در کنار مدل‌های ساختاری دسته ای دیگر از مدل‌ها تحت عنوان مدل‌های پدیده شناختی^۷ معرفی گردید که قابلیت بیشتری در کاربردهای عددی داشته اند. مدل پیشنهادی توسط گراسر و کوزارلی در سال ۱۹۹۱ [۱۴] همچنین مدل‌های هیستریزس دو خطی توسط محققینی چون تامسون و همکاران [۱۵] در سال ۱۹۹۵، سعادت و همکاران در سال ۲۰۰۱ [۱۶]، ماسودا و نوری در سال ۲۰۰۲ [۱۷]، آندراز و دسراچ در سال ۲۰۰۵ [۱۸] از جمله مدل‌های پدیده شناختی هستند. یکی از پر کاربردترین مدل‌های موجود در مطالعات عددی، مدل پیشنهادی فاگازا در سال ۲۰۰۳ [۱۹] بوده است. این مدل اصلاح شده ی مدل ترکیبی تک محوره آرچیو و ساکو در سال ۱۹۹۷ [۲۰] می‌باشد. با این حال تمامی مدل‌های ارائه شده در مراجع مذکور با هدف مدل سازی رفتار شبه استاتیک مواد و صرف نظر از وابستگی رفتار آلیاژهای حافظه دار شکلی به نرخ کرنش بوده است [۲۱].

1 SMA (Shape Memory Alloy)
2 Martensite
3 Austenite
4 Reverse transformation
5 Forward transformation
6 Constitutive
7 Phenomenological

هرچند محدود روش‌هایی ارائه شده اند که اثر پارامتر نرخ کرنش را در SMA ها در نظر می‌گیرد به عنوان مثال روش ارائه شده توسط مطهری و قاسمیه در سال ۲۰۰۷ [۲۲]، مدل نورو- فازی تطبیقی ازبلیت و هارلباس در سال ۲۰۱۰ [۹]. با این حال بیشتر مطالعات عددی پیشین بر روی آلیاژهای Ni-Ti و با بهره گیری از مدل فاگازابوده است که با توجه به وابستگی رفتار این آلیاژ به نرخ کرنش، نتایج مدلسازی را با تقریب زیادی همراه خواهد کرد. به منظور مرتفع نمودن این مشکل دو راه حل پیش رو خواهد بود. راه حل اول انجام مطالعات با تکیه بر روش‌های اخیر که البته به دلیل عدم وجود آزمایش‌های کافی و عدم قطعیت در وابستگی آلیاژ به نرخ کرنش، مطالعات آزمایشگاهی بیشتری می‌طلبد. راه دوم کاربرد آلیاژهای جایگزینی است که وابستگی رفتاری کمتری به نرخ کرنش داشته باشند.

آلیاژهای حافظه دار پایه مس دسته ای از آلیاژها هستند که (با هزینه کمتر و وابستگی رفتاری کمتر به نرخ کرنش) به عنوان جایگزینی برای Ni-Ti مورد مطالعه قرار گرفته اند. در میان آلیاژهای پایه مس، Cu-Al-Be به دلیل هزینه پایین و ماشین کاری راحت تر نسبت به Ni-Ti بسیار مورد توجه بوده است. علاوه بر این، آلیاژ Cu-Al-Be نسبت به سایر آلیاژهای پایه مس مثل Cu-Al-Ni و Cu-Zn-Al شکل پذیری بیشتری دارد. با این وجود، سوپر الاستیسیته آن خیلی کمتر از Ni-Ti بوده و کرنش بازگشت و شکست آن به ۴ درصد و ۸ درصد محدود می‌گردد، از سوی دیگر ترکیب بلریم در صورت عدم کاربرد صحیح، خطرات بلقوه ای برای سلامتی بدن انسان به همراه خواهد داشت [۲۳]. در سالهای اخیر آلیاژ جدیدی بر پایه مس (Cu-Al-Mn) مورد بررسی قرار گرفته است این آلیاژ ضمن برخورداری از کرنش بازگشتی قابل قیاس با Ni-Ti، دارای هزینه کمتر و وابستگی ناچیز به نرخ کرنش می‌باشد [۲۴، ۲۵، ۲۶]. در مقاله حاضر ابتدا خواص آلیاژ Cu-Al-Mn به عنوان جایگزینی برای Ni-Ti مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس با تکیه بر این خواص قابلیت شبیه سازی رفتار آن توسط سه مدل رفتاری بررسی می‌شود.

۲- ارزیابی خواص رفتاری آلیاژ Cu-Al-Mn در مقایسه با Ni-Ti

آراکی و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۲۳] با بررسی میله‌هایی از جنس Cu-Al-Mn به قطرهای ۴ و ۸ میلی متر، سوپر الاستیسیته و خواص مکانیکی تاثیر گذار در کاربردهای لرزه ای را مورد بررسی قرار داده اند. برای این منظور نمونه‌های مورد نظر در معرض تست کشش چرخه ای (شبه استاتیک و جابه جایی کنترل) قرار گرفته است. نتایج نشان داده است ماکزیمم کرنش بازگشتی به ترتیب برای میله‌های ۴ و ۸ میلی متری حدود ۱۲ و ۹ درصد و کرنش شکست هر دو نمونه حدود ۱۸ درصد بوده است. جدول ۱ به منظور مقایسه خواص میله‌های از جنس این آلیاژ با آلیاژهای پر کاربرد پایه نیکل و مس ارائه شده است. مطابق جدول کرنش بازگشت Cu-Al-Mn بزرگتر از Cu-Al-Be و قابل قیاس با Ni-Ti بوده و کرنش شکست Cu-Al-Mn هر چند کمتر از نصف Ni-Ti بوده است اما دو برابر کرنش شکست Cu-Al-Be و در حد مطلوبی می‌باشد. همچنین در این آزمایش خستگی کم چرخه در هیچیک از نمونه‌ها مشاهده نشده است و این امر کاربرد میله‌هایی از این نوع را در سیستم‌های لرزه ای (که در معرض ۱۰ ها کوپل سیکلیک نیرو هستند) مناسب می‌سازد.

جدول ۱: مقایسه پارامترهای ثابت در آلیاژها [۲۳]

آلیاژ حافظه دار	مدول الاستیک (GPa)	تنش تبدیل (MPa)	کرنش شکست (%)	کرنش بازگشت (%)
Ni-Ti	۶۹-۹۷	۱۵۰-۸۰۰	۵۰-۴۰	۹
Cu-Al-Be	۷۰	۱۶۹	۸	۴/۵
Cu-Al-Mn (میله ۴ میلی متری)	۲۰	۱۶۰-۱۸۰	۱۸	۱۲
Cu-Al-Mn (میله ۸ میلی متری)	۲۰	۲۶۰	۱۸	۹

در مطالعه دیگری در سال ۲۰۱۲ آراکی و همکاران [۲۶] جهت بررسی وابستگی رفتار آلیاژ مورد بحث به نرخ بارگذاری، دو میله به طول ۱۵۰ و قطر ۸ میلی متر را تحت بارگذاری‌هایی با فرکانس ۰/۰۱، ۰/۵ و ۱ هرتز و تا دامنه کرنش ثابت ۴/۵ درصد قرار دادند. شکل ۱ به عنوان نمونه، رابطه تنش- کرنش یکی از میله‌های آزمایش شده را در چرخه‌ها و فرکانس‌های بارگذاری مختلف نشان می‌دهد. بر اساس نتایج منحنی تنش کرنش نمونه‌ها در نرخ‌های بارگذاری متفاوت، در هیچکدام از نمونه‌ها وابستگی قابل توجهی به نرخ وجود نداشته است.

مقدار مدول یانگ و تنش تبدیل رو به جلو به ترتیب حدود ۲۵ گیگاپاسکال و ۲۰۰ مگاپاسکال بوده که این پارامترها نیز نسبت به فرکانس بارگذاری غیر حساس می‌باشد.

در ادامه مطالعات انجام شده، آراکی و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۲۷] عملکرد میله‌هایی از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی Cu-Al-Mn را به عنوان سیستم‌های مهاربندی در سازه‌های فولادی از طریق آزمایش میز لرزان یک قاب یک طبقه با مقیاس یک سوم مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آزمایش مذکور نشان داده است که سیستم مهاربندی معمولی تحت سطوح بالای تحریکات پایه، دریافت پسماند قابل توجهی را به جا گذاشته است که سبب ناپایداری کل سازه خواهد شد و در مقابل مهاربندی‌های شامل آلیاژ به دلیل قابلیت بازگشتی حتی تحت زلزله‌های شدید تغییر شکل پسماندی نخواهند داشت. در ادامه آزمایشات انجام شده توسط میز لرزان در مقاله مذکور آراکی و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۲۸] عدم وابستگی به نرخ را در پاسخ قاب، مورد بررسی قرار داده‌اند. همانطور که در مرجع [۲۶] نشان داده شده است خواص مکانیکی آلیاژ Cu-Al-Mn تا فرکانس ۱ هرترز در مقایسه با Ni-Ti مستقل از نرخ بارگذاری است. از آنجاییکه ارتعاش قابهای فولادی تحت زلزله عموماً فرکانس‌های بالاتر از ۱ هرترز را شامل می‌شود بررسی نرخ بارگذاری در فرکانس‌های بالاتر از ۱ هرترز اهمیت می‌یابد. از آنجاییکه اغلب ایجاد تغییر شکل‌های غیر الاستیک در این محدوده فرکانسی به دلیل محدودیت‌های دستگاهی کار دشواری است، در مقاله مذکور محدودیت مذکور با اثرات تشدید مرتفع شده است. در ادامه یک مدل هیستریزس مستقل از نرخ برای مطالعه عددی و شبیه سازی رفتار آلیاژهای حافظه دار شکلی استفاده شد و نشان داد وابستگی به نرخ در آلیاژ Cu-Al-Mn تا فرکانس‌های بارگذاری ۶ هرترز قابل چشم پوشی می‌باشد.

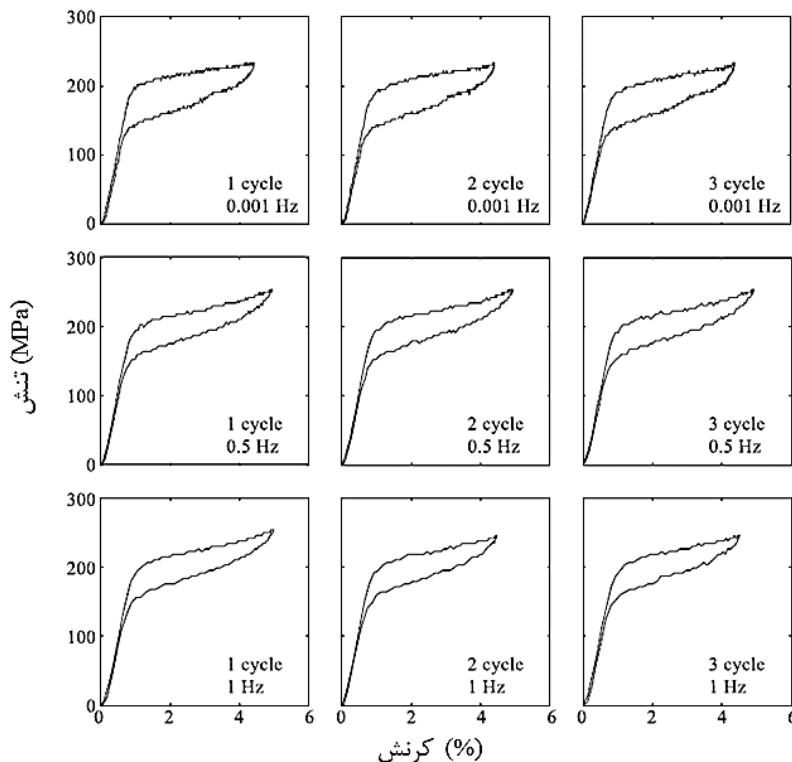
بنابراین با بررسی مطالعات پیشین می‌توان دریافت، آلیاژ Cu-Al-Mn در کنار خواصی چون سوپر الاستیسیته مطلوب و هزینه کمتر به دلیل عدم وابستگی به نرخ بارگذاری، بسیاری از دشواری‌های گذشته در مدل سازی و بررسی‌های عددی را کاهش خواهد داد. با توجه به اینکه بررسی کارایی این آلیاژ نوظهور مطالعات عددی بیشتری می‌طلبد، شناخت مدل‌های عددی قابل کاربرد جهت توصیف رفتار این آلیاژ امری ضروری می‌باشد.

در تحقیق حاضر با تکیه بر رفتار مستقل از نرخ آلیاژ Cu-Al-Mn، کارایی سه مدل مستقل از نرخ و کاربردی در نرم افزارهای تحلیلی جهت شبیه سازی رفتار آلیاژ مورد بررسی قرار گرفته است و از طریق صحت سنجی با نتایج آزمایش شبه استاتیک ارزیابی می‌گردد. برای این منظور ابتدا با استفاده از نرم افزار متلب مدل پدیده شناختی گراسر کوزارلی^۸ جهت توصیف رفتار تنش- کرنش میله ای مشخص از آلیاژ Cu-Al-Mn تحت تست کشش، کدنویسی شده و پارامترهای ثابت جهت انطباق مطلوب با استفاده از فرایند سعی و خطا محاسبه می‌گردد. در ادامه با توجه به استقبال گسترده محققین از نرم افزار اپنسیس در مطالعات عددی، از دو مدل چند خطی فاگازا^۹ و خودبازگشتی^{۱۰} جهت توصیف رفتار تنش-کرنش ماده استفاده شده و به منظور مقایسه بیشتر دو مدل اخیر، نتایج با آزمایش شبه استاتیک در یک نمونه مهاربندی بررسی شده است.

8 Graesser-Cozzarelli

9 Fugazza

10 Selfcentering



شکل ۱: منحنی تنش-کرنش ۸ میلی متری از جنس آلیاژ Cu-Al-Mn در چرخه‌ها و فرکانس‌های بارگذاری متفاوت [۲۶].

۳- ارزیابی سه مدل مستقل از نرخ برای شبیه سازی رفتار آلیاژ Cu-Al-Mn

در این قسمت کارایی سه مدل مستقل از نرخ (مدل گراسر کوزارلی، مدل فاگازا و مدل خودبازگشتی) برای شبیه سازی رفتار آلیاژ Cu-Al-Mn بررسی شده است. مدل گراسر کوزارلی از اولین مدل‌های توسعه یافته برای شبیه سازی رفتار هیستریزیس آلیاژهای حافظه دار شکلی است که در سال ۱۹۹۱ توسط گراسر و کوزارلی معرفی گردید. این مدل قابلیت توصیف هر دو ویژگی حافظه داری شکلی و سوپرلاستیسیته را داراست. رابطه تنش کرنش تک بعدی این مدل بصورت زیر بیان می‌شود.

$$\dot{\sigma} = E \cdot [\dot{\epsilon} - |\dot{\epsilon}|] \cdot \left(\frac{\sigma - \beta}{Y}\right)^n \quad (1)$$

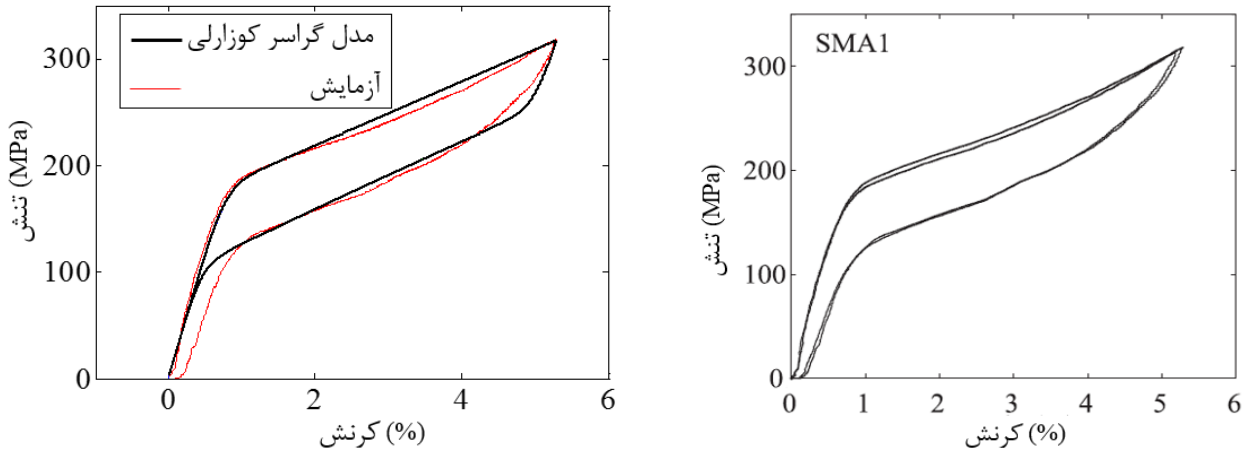
$$\beta = E \cdot \alpha \cdot \{\epsilon^{in} + f_T \cdot |\epsilon|^\lambda \cdot \text{erf}(a \cdot \epsilon) \cdot [u(-\epsilon \cdot \epsilon')]\} \quad (2)$$

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (3)$$

$$u(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

در روابط (۱ تا ۴)، تنش، σ ، کرنش، ϵ ، تنش بازگشت، β ، مدول الاستیک، E ، تنش تسلیم، Y ، شیب بعد از تسلیم، $\alpha = E_y/(E - E_y)$ و $\epsilon^{in} = \epsilon - \sigma/E$ می‌باشد. همچنین n (توان کنترل کننده تبدیل از حالت الاستیک به غیر الاستیک)، f_T ، λ و a هم ثابت ماده هستند [۲۱]. همانطور که ملاحظه می‌شود به دلیل وجود پارامترهای ثابت مجهول، استفاده از این مدل پیچیدگی‌های خاصی را به همراه داشته و نیازمند فرایند سعی و خطا می‌باشد. مقادیر پارامترهای مجهول با تغییر در خواص مکانیکی ماده تغییر خواهد کرد. به منظور بررسی کارایی این مدل در ارائه رفتار آلیاژهای Cu-Al-Mn از نتایج مربوط به آزمایش کشش بر روی یک میله ۱۴ میلی متری در مرجع [۲۹] استفاده شده است. شکل ۲ منحنی تنش کرنش میله را در آزمایش کشش نشان می‌دهد. با بهره گیری از قابلیت‌های نرم افزار متلب، مدل گراسر کوزارلی با استفاده از روابط ذکر شده در بالا کدنویسی شد، سپس با استفاده از فرایند سعی و خطا پارامترهای ثابت این مدل تا دستیابی به انطباق مطلوب محاسبه گردید. شکل ۳ قابلیت شبیه سازی رفتار آلیاژ Cu-Al-Mn را با استفاده از این مدل نشان می‌دهد. همانطور که در

شکل ۳ نشان داده شده است این مدل به دلیل استفاده از پارامتر توان n (ثابت کنترل کننده تبدیل از نقاط الاستیک به پلاستیک) در نقاط شروع تبدیل انطباق مطلوبی ایجاد کرده است. جدول ۲ پارامترهای محاسبه شده به منظور برقراری این شبیه سازی را ارائه می دهد.



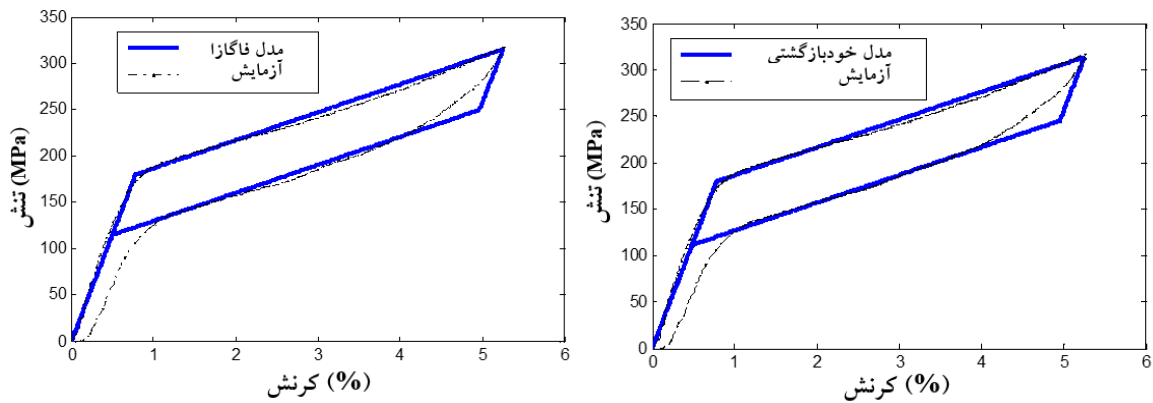
شکل ۲: منحنی تنش-کرنش میله از جنس آلیاژ Cu-Al-Mn [۲۹].

شکل ۳: مقایسه نتایج منحنی تنش-کرنش شبیه سازی عددی مقاله حاضر با نتایج آزمایشگاهی میله از جنس آلیاژ Cu-Al-Mn.

جدول ۲: پارامترهای محاسبه شده روش گراسرکوزارلی در تحقیق حاضر، به منظور شبیه سازی رفتار آزمایشگاهی میله ۱۴ میلی متری از جنس Cu-Al-Mn.

E (GPa)	γ (MPa)	α	n	a	λ	f_T
۲۳	۱۸۷	۰/۱۵	۶	۲۵۰	۰/۰۲	۰/۰۹۳

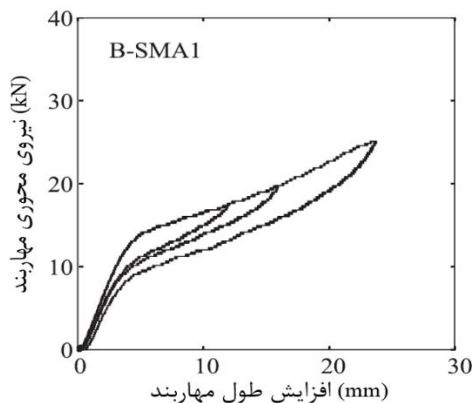
مدل مستقل از نرخ فاگازا نیز مدل دیگری است که بطور گسترده مورد استفاده محققین قرار گرفته شده است. جزئیات روابط مربوط به تنش کرنش ماده در این مدل در مرجع [۱۹] آورده شده است. مدل سومی که در این تحقیق بررسی شده است مدل خودبازگشتی می باشد این مدل برای ارائه رفتار موادی با رابطه تنش کرنش پرجمی شکل و قابلیت خودبازگشتی استفاده می شود. جزئیات کاربرد این مدل در تحقیقات اروکو در سال ۲۰۱۳ [۳۰] ارائه شده است. با توجه به پیچیدگی رفتار آلیاژهای حافظه دارو نیاز به کدنویسی جداگانه در اغلب نرم افزارهای کاربردی، عموماً استفاده از مدل های رفتاری موجود در کتابخانه نرم افزارهای شناخته شده رایج تر می باشد، علت انتخاب دو مدل اخیر نیز همین امر می باشد. در واقع نرم افزار کد بازپنسیس با دارا بودن کتابخانه گسترده ای از مواد و قدرت و دقت کافی در مدلسازی، جایگاه ویژه ای یافته است. دو مدل اخیر جزو مدل های رفتاری موجود در نرم افزار اپنسیس هستند که برخلاف مدل گراسرکوزارلی به پارامترهای محدودی جهت شبیه سازی نیازمندند و به سادگی از روی منحنی تنش کرنش و با تکیه بر مقادیر تنش های تبدیل، مدول الاستیک و کرنش بازگشت قابل استفاده خواهند بود. در ادامه قابلیت هر یک از این مدل ها از طریق صحت سنجی با رفتار آزمایشگاهی میله Cu-Al-Mn تحت کشش بررسی خواهد شد. برای این منظور از مدلسازی یک فنر بدون طول در اپنسیس استفاده شده است سپس فنر مورد نظر تا ماکزیمم کرنش موجود در منحنی شکل ۲ کشیده و سپس به کرنش صفر رسیده است. شکل های ۴ و ۵ به ترتیب بیانگر انطباق مدل فاگازا و خودبازگشتی با نتیجه تست کشش میله در شکل ۲ می باشد. مطابق شکل مدل های چند خطی اخیر نسبت به مدل گراسرکوزارلی با تقریب بیشتری بویژه در نقاط شروع تبدیل، همراه خواهند بود. اگرچه دو مدل فاگازا و خودبازگشتی کرنش پسماند محدود در آلیاژ را شبیه سازی نمی کنند ولیکن مقایسه با نتایج آزمایش کشش در هر دو مدل قابل قبول می باشد.



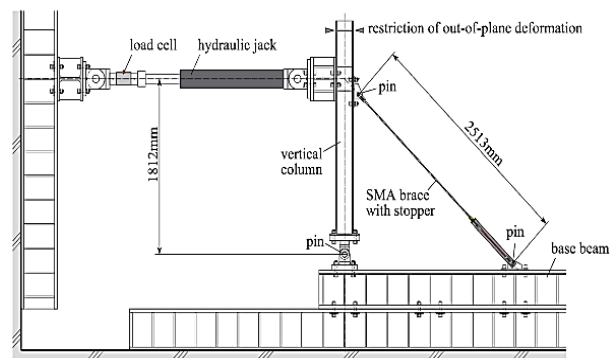
شکل ۴: مقایسه نتایج منحنی تنش-کرنش شبیه سازی عددی مقاله حاضر شکل ۵: مقایسه نتایج منحنی تنش-کرنش شبیه سازی عددی مقاله حاضر
با نتایج آزمایشگاهی میله در تست کشش (مدل خودبازگشتی).
با نتایج آزمایشگاهی میله در تست کشش (مدل فاگازا).

۴- ارزیابی دو مدل فاگازا و خودبازگشتی جهت شبیه سازی با تست شبه استاتیک

به منظور بررسی بیشتر، کارایی دو مدل موجود در نرم افزار اپنسیس توسط نتایج تست شبه استاتیک آراکی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۲۹] مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شکل ۶ جزئیات آزمایش انجام شده را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶ دستگاه از یک ستون و یک مهاربند شامل دو قسمت (بخش فولادی و بخش انتهایی شامل میله ای از جنس آلیاژ Cu-Al-Mn) تشکیل شده است. انتهای بالایی مهاربند به ستون قائم و انتهای دیگر به تیر پایه مفصل شده است. ستون قائم نیز در انتها به تیر پایه و در نقطه بالایی به جک هیدرو لیکی مفصل شده است. سپس جابه جایی افقی در سه سیکل کششی به مجموعه وارد شده است. ماکزیمم جابه جایی اعمالی در سه سیکل معادل دریافت زاویه ای ۰/۰۱، ۰/۰۱۳ و ۰/۰۲ رادیان بوده است. جزئیات بیشتر آزمایش مذکور در مرجع [۲۹] ارائه شده است. شکل ۷ نتایج تست را تحت بار اعمال شده بر روی میله با رفتار تنش کرنش قسمت قبل نشان می‌دهد. در این شکل محور قائم نیروی محوری و محور افقی افزایش طول مهاربند را نشان می‌دهد.



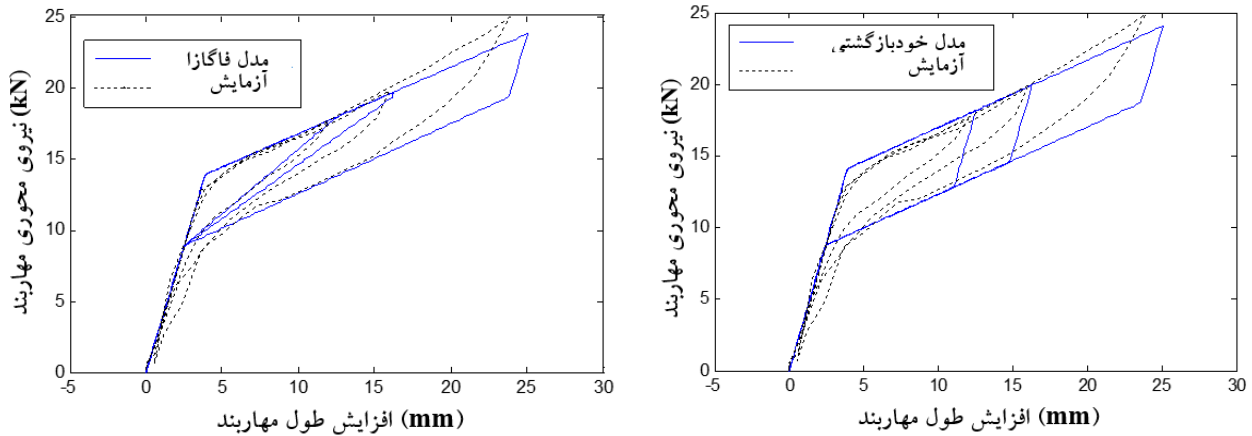
شکل ۷: نمودار نیروی محوری مهاربند در برابر افزایش طول [۲۹].



شکل ۶: دستگاه آزمایش برای تست شبه استاتیک [۲۹].

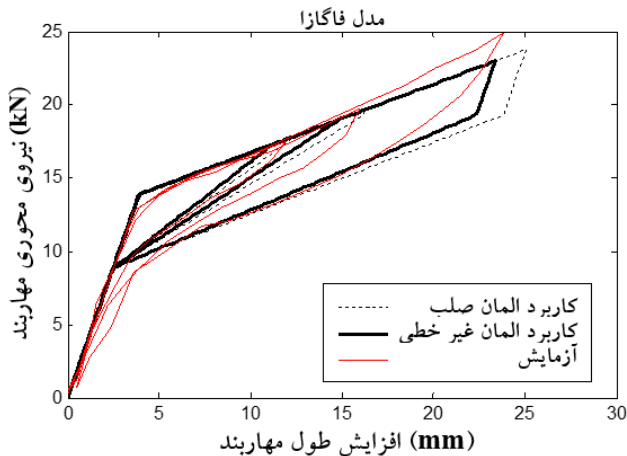
در مطالعه حاضر مدلسازی عددی در نرم افزار اپنسیس مطابق شرایط آزمایش انجام شده است. برای ستون و بخشی از مهاربند از جنس آلیاژ حافظه دار از المان‌های تیر ستون غیر خطی استفاده شده است و به منظور مدلسازی بخش فولادی مهاربند المان صلب به کار رفته است. ستون‌ها از ماده Steel01 (موجود در نرم افزار اپنسیس) با رفتار دو خطی و با سخت شوندگی ۰/۰۲ و برای مدلسازی رفتار میله مهاربند از جنس آلیاژ حافظه دار نیز یکبار از مدل فاگازا و بار دیگر از مدل خودبازگشتی استفاده شده است. شکل ۸ و ۹ به ترتیب مقایسه ی نتایج مدل عددی مقاله حاضر و نتایج آزمایشگاهی را در دو حالت نشان می‌دهد. مطابق شکل مدل فاگازا حلقه‌های درونی را با دقت بیشتری

توصیف نموده است و مدل خودبازگشتی به دلیل چارچوب چند خطی‌های موازی در مسیر باربرداری و تبدیل معکوس، تقریب بیشتری خواهد داشت. در هر دو مدل افزایش سختی در انتهای حلقه سوم قابل توصیف نمی‌باشد. اختلاف اندکی در میزان تغییر شکل عضو مهاربندی مشاهده می‌شود که ماکزیمم مقدار آن ۵/۲ درصد و در حلقه انتهایی بوده است. این اختلاف با توجه به تفاوت احتمالی موجود در فرضیات مدل و شرایط آزمایشگاهی قابل توجیه خواهد بود.

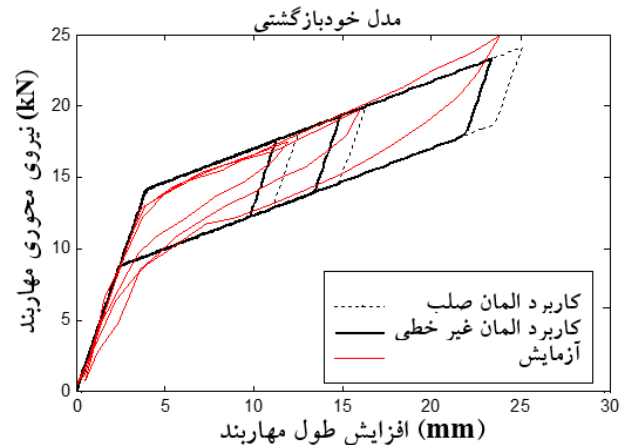


شکل ۸: مقایسه نتایج نیروی محوری مهاربند- افزایش طول در شبیه سازی شکل ۹: مقایسه نتایج نیروی محوری مهاربند- افزایش طول در شبیه سازی عددی مقاله حاضر با نتایج آزمایشگاهی (مدل فاگازا).
شکل ۸: مقایسه نتایج نیروی محوری مهاربند- افزایش طول در شبیه سازی عددی مقاله حاضر با نتایج آزمایشگاهی (مدل خودبازگشتی).

در ادامه تاثیر کاربرد نوع المان برای مدل‌سازی قسمت فولادی مهاربند نیز بررسی شده است. همانطور که اشاره شد، عضو مهاربندی موجود در آزمایش شبه استاتیک مرجع [۲۹] از دو قسمت تشکیل شده است که بخش فولادی میله ای به قطر ۱۲/۵ میلی متر و بخش انتهایی شامل میله از جنس Cu-Al-Mn به قطر ۱۴ میلی متر و طول ۵۰۰ میلی متری باشد. اکثر تحقیقات موجود بر روی سیستم‌های مهاربندی شامل آلیاژ حافظه دار با فرض المان صلب برای قسمت فولادی مهاربند انجام شده اند [۳۱-۳۴]. شکل ۸ و ۹ نیز نتایج مدل‌سازی مقاله حاضر را در حالت استفاده از المان صلب برای بخش فولادی مهاربند نشان داد. به منظور بررسی تاثیر نوع المان مورد استفاده، مدل‌سازی در دو حالت تکرار شد که حالت اول استفاده از المان صلب برای بخش فولادی مهاربند و حالت دوم مدل‌سازی بخش فولادی با المان غیر خطی با رفتار فولادی دو خطی و با سخت شوندهگی ۰/۰۲ (مطابق شرایط آزمایش) می‌باشد. نتایج مربوط به این بررسی در شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. مطابق شکل میزان سختی اولیه و نیروی محوری مهاربند در هر دو حالت مشابه بوده است. اما در حالت استفاده از المان صلب به دلیل افزایش سختی و ثابت بودن جابه جایی چرخه ای اعمال شده به سازه، تغییر شکل محوری مهاربند بیشتر ارزیابی می‌شود. ماکزیمم این تغییرات حدود ۶ درصد می‌باشد که قابل اغماض است. البته بحث بر روی تاثیر مدل‌سازی بخش مهاربندی با استفاده از المان صلب در این مقاله، تنها به صحت سنجی با نتایج یک آزمایش شبه استاتیک محدود شده است. لذا تقریب ناشی از این نوع مدل‌سازی نیاز به بررسی‌های بیشتر خواهد داشت.



شکل ۱۱: مقایسه نتایج نیروی محوری مهاربند - افزایش طول در شبیه سازی عددی مقاله حاضر با نتایج آزمایشگاهی (مدل فاگازا).



شکل ۱۰: مقایسه نتایج نیروی محوری مهاربند - افزایش طول در شبیه سازی عددی مقاله حاضر با نتایج آزمایشگاهی (مدل خودبازگشتی).

۵- نتیجه گیری

آلیاژهای حافظه دار شکلی به دلیل خاصیت خودبازگشتی در کاربردهای لرزه ای مورد توجه می باشد. در کنار مطالعات آزمایشگاهی متعدد، بسیاری از محققین عملکرد سیستم های شامل آلیاژهای حافظه دار را بصورت عددی بررسی نموده اند. در مقاله حاضر ابتدا خواص آلیاژ نونینی بر پایه مس (Cu-Al-Mn) را بررسی نموده، سپس با بهره گیری از خاصیت رفتاری مستقل از نرخ این آلیاژ نونین، کارایی سه مدل رفتاری (مستقل از نرخ کرنش) به منظور شبیه سازی عددی این آلیاژ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج کلی تحقیق به شرح زیر می باشد:

۱- مدل گراسر کوزارلی با توجه به فرمول بندی دقیق و دارا بودن پارامترهای کنترل کننده ای چون n (توان کنترل کننده تبدیل از حالت الاستیک به غیر الاستیک) در شبیه سازی رفتار آلیاژ Cu-Al-Mn تحت آزمایش کشش (به ویژه در نقاط شروع تبدیل دو فاز) انطباق بیشتری داشت. همچنین به دلیل تعدد پارامترهای مجهول در این مدل، شبیه سازی از طریق آن نیازمند فرایند سعی و خطای اولیه جهت یافتن پارامترهای ثابت n ، a ، λ و fT می باشد. در این تحقیق مقدار پارامترهای مذکور جهت شبیه سازی رفتار میله ای ۱۴ میلی متری از جنس آلیاژ نونین Cu-Al-Mn ارائه گردید.

۲- همچنین در تحقیق حاضر دو مدل فاگازا و خودبازگشتی به منظور توصیف رفتار تنش کرنش ماده تحت تست کشش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد هر دو مدل انطباق مطلوبی با منحنی تنش کرنش آزمایشگاهی داشته اند. با این حال به دلیل ماهیت چند خطی، رفتار ماده به ویژه در نقاط تبدیل دو فاز نسبت به مدل گراسر کوزارلی با تقریب بیشتری همراه بود. از سوی دیگر شبیه سازی از طریق مدل فاگازا و خودبازگشتی تنها به پارامترهای تحلیل نیاز دارد که به راحتی از روی نمودار تنش-کرنش تست کشش ساده قابل استخراج خواهد بود. همچنین استفاده از دو مدل اخیر در نرم افزار اپنسیس کد نویسی مجدد و پیچیده ای نمی طلبد، بنابراین با وجود سادگی کاربرد، تقریب موجود قابل اغماض خواهد بود.

۳- نتایج مقایسه دو مدل فاگازا و خودبازگشتی در شبیه سازی عددی تست شبه استاتیک نشان داد هر دو مدل با تقریب قابل قبولی رفتار عضو مهاربند را شبیه سازی کرده اند. با این حال در هر دو روش اندک افزایش سختی در سیکل انتهایی شبیه سازی نشده است. همچنین مدل خودبازگشتی به دلیل چارچوب چند خطی های موازی، حلقه های درونی را با تقریب بیشتری نسبت به مدل فاگازا توصیف می کند.

۴- نتایج مدل سازی مهاربند فولادی شامل آلیاژ حافظه دار شکلی در دو حالت (مدلسازی بخش فولادی یکبار با استفاده از المان فولادی و بار دیگر توسط المان صلب) نشان داد، در هر دو روش سختی اولیه و نیروی محوری تقریباً ثابت بوده و تفاوت ناچیزی در میزان

تغییر طول مهاربند در دو حالت مشاهده شده است. با این حال میزان اثر بخشی نوع مدلسازی نیاز به ارزیابی بیشتری در آنالیزهای لرزه ای خواهد داشت.

مراجع

- [1] Boroschek, R.L. Farias, G. Moroni, O. and Sarrazin, M. (2007). Effect of SMA Braces in a Steel Frame Building. *Journal of Earthquake Engineering*, 11 (3), 326-342.
- [2] Dolce, M. and Cardone, D. (2001). Mechanical Behavior of Shape Memory Alloys for Seismic Applications 2. Austenite NiTi Bars Subjected to Tension. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43 (11), 2657-2677.
- [3] Wolons, D. Gandhi, F. and Malovrah, B. (1998). Experimental investigation of the pseudoelastic hysteresis damping characteristics of hape memory alloy wires. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 9 (2), 116-126.
- [4] DesRoches, R. McCormick, C. and Delemont, M. (2004). Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars. *Journal of Structural Engineering*, 130 (1), 38-46.
- [5] Ren, W. Li H. and Song, G. (2007). A One-Dimensional Strain-Rate -Dependent Constitutive Model for Superelastic Shape Memory Alloys. *Smart Materials and Structures*, 16 (1), 191-197.
- [6] Tobushi, H. Shimeno, Y. Hachisuka, T. and Tanaka, K. (1998). Influence of Strain Rate on Superelastic Properties of TiNi Shape Memory Alloy. *Mechanics of Materials*, 30 (2), 141-150.
- [7] Dayananda, G.N. and Rao, M.S. (2008). Effect of Strain Rate on Properties of Superelastic NiTi Thin Wires. *Materials Science and Engineering*, 486 (1), 96-103.
- [8] Soul, H. Isalgue, A. Yawny, A. Torra, V. and Lovey, F.C. (2010). Pseudoelastic Fatigue of NiTi Wires: Frequency and Size Effects on Damping Capacity. *Smart Materials and Structures*, 19 (8), 85006-85012.
- [9] Ozbulut, O.E. and Hurlebaus, S. (2010). Neuro-Fuzzy Modeling of Temperature- and Strain-Rate-Dependent Behavior of NiTi Shape Memory Alloys for Seismic Applications. *Journal of Intelligent Materials and Structures*, 21 (8), 837-849.
- [10] Ozbulut, O. E. Hurlebaus, S. and Desroches, R. (2011). Seismic Response Control Using Shape Memory Alloys: A Review. *Structures Journal of Intelligent Material Systems*, 22 (14), 1531-1549.
- [11] Tanaka, K. (1986). A thermomechanical sketch of shape memory effect: onedimensional tensile behavior. *Res. Mechanica*, 18 (3), 251-263.
- [12] Liang, C. and Rogers, C. A. (1990). One-dimensional thermo mechanical constitutive relations for shape memory material. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1 (2), 207-234.
- [13] Tobushi, H. Yamada, S. Hachisuka, T. Ikai, A. and Tanaka, K. (1996). Thermomechanical properties due to martensitic and R-phase transformations of TiNi shape memory alloy subjected to cyclic loadings. *Journal of Smart Materials and Structures*, 16 (3), 788-795.
- [14] Graesser, E. J. and Cozzarelli, F. A. (1991). Shape-memory alloys as new materials for a seismic isolation. *Journal of Engineering Mechanics*, 117 (11), 2590-2608.
- [15] Thomson, P. Balas, G. J. and Leo, P. H. (1995). The use of shape memory alloys for passive structural damping. *Smart Materials and Structures*, 4 (1), 36-42.
- [16] Saadat, S. Noori, M. Davoodi, H. Hou, Z. Suzuki, Y. and Masuda, A. (2001). Using NiTi SMA tendons for vibration control of coastal structures. *Smart Materials and Structures*, 10 (4), 695-704.
- [17] Masuda, A. and Noori, M. (2002). Optimization of hysteretic characteristics of damping devices based on pseudoelastic shape memory alloys. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 37 (8), 1375-1386.
- [18] Andrawes, B. and DesRoches, R. (2005). Unseating prevention for multiple frame bridges using superelastic devices. *Smart Materials and Structures*, 14 (3), 60-67.
- [19] Fugazza, D. (2003). Shape-memory alloy devices in earthquake engineering: mechanical properties, constitutive modelling and numerical simulations. Master degree of earthquake engineering. European ROSE School.
- [20] Auricchio, F. and Sacco, E. (1997). A one-dimensional model for superelastic shapememory alloys with different elastic properties between austenite and martensite. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 32 (6), 1101-1114.
- [21] Ozbulut, O. E. (2010). Seismic protection of bridge structures using shape memory alloy-based isolation systems against near-field earthquakes. Doctor of Philosophy. Texas A&M University.
- [22] Van, de Lindt, J.W. and Potts, A. (2008). Shake Table Testing of a Superelastic Shape Memory Alloy Response Modification Device in a Wood Shearwall. *Journal of Structural Engineering*, 134 (8), 1343-1352.
- [23] Araki, Y. Endo, T. Omori, T. Sutou, Y. Koetaka, Y. Kainuma, R. and Ishida, K. (2011). Potential of superelastic Cu-Al-Mn alloy bars for seismic applications. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40 (1), 107-115.
- [24] Sutou, Y. Omori, T. Kainuma, R. and Ishida, K. (2003). Effect of grain size and texture on superelasticity of Cu-Al-Mn-based shape memory alloys. *Journal of Physics*, 112, 511-514

- [25] Sutou, Y. Omori, T. Yamauchi, K. Ono, N. Kainuma, R. and Ishida, K. (2005). Effect of grain size and texture on pseudoelasticity in Cu-Al-Mn-based shape memory wire. *Acta Materialia*, 53 (15) 4121-4133.
- [26] Araki, Y. Maekawa, N. Omori, T. Sutou, Y. Koetaka, Y. Kainuma, R. and Ishida, K. (2012). Rate-dependent response of superelastic Cu-Al-Mn alloy rods to tensile cyclic loads. *Smart Materials and Structures*, 21 (3) 032002- 032009.
- [27] Araki, Y. Shrestha, K.C. Maekawa, N. Koetaka, Y. Yoshida, N. Omori, T. Sutou, Y. Kainuma, R. Ishida, K. (2012). Cu-Al-Mn Super-elastic Alloy Bars as Dissipative Brace System in Structural Steel Frame. In: *The 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon.
- [28] Araki, Y. Maekawa, N. Shrestha, K.C. Yamakawa, M. Koetaka, Y. Omori, T. Kainuma, R. (2014). Feasibility of tension braces using Cu-Al-Mn superelastic alloy bars. *Structural Control and Health Monitoring*, 21 (10), 1304-1315.
- [29] Araki, Y. Maekawa, N. Shrestha, K.C. Yamakawa, M. Koetaka, Y. Omori, T. Kainuma, R. (2015). Shaking table tests of steel frame with superelastic Cu-Al-Mn SMA tension braces. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45 (2), 297-314.
- [30] Erochko, J A. (2013). Improvements to the design and use of post-tensioned self-centering energy-dissipative (SCED) braces. Doctor of Philosophy. University of Toronto.
- [31] Moradi, S. Alam, S. Asgarian, B. (2014). Incremental dynamic analysis of steel frames equipped with NiTi shape memory alloy braces. *The journal of Tall and Special Building*, 23 (18), 1406-1425.
- [32] Asgarian, B. Moradi, S. (2011). Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces. *Journal of Constructional Steel Research*, 67 (1), 65-74.
- [33] McCormick, J. DesRoches, R. Fugazza, D. and Auricchio, F. (2006). Seismic vibration control using superelastic shape memory alloys. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 128 (3) 294-301.
- [34] McCormick, J. DesRoches, R. Fugazza, D. and Auricchio, F. (2007). Seismic Assessment of Concentrically-Braced Steel Frames Using Shape Memory Alloy Braces. *Journal of Structural Engineering*, 133 (6), 863-870.