



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Energy Absorption of Auxetic Metallic Yield Damper Made of Shape Memory Alloys

Milad Masoodi^a, Ahmad Ganjali^{b*}, Hamid Reza Irani^b, Aboozar Mirzakhani^b

^a PhD Student, Department of Civil Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

^b Assistant professor, Department of Civil Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 28 November 2022

Revised: 04 November 2023

Accepted: 12 November 2023

Keywords:

Auxetic metallic yielding damper,
Shape memory alloy,
Energy dissipation,
Ductility,
Nonlinear finite element.

ABSTRACT

In the present study, we present a novel shape memory alloy metallic yielding dampers for energy dissipation and damage control in the steel structural members, composed of an auxetic main member and a negative Poisson member that absorbs energy by plastic deformation mechanism. Using the ABAQUS software, a set of quasi-static nonlinear analyses were performed on the metallic yielding damper with different geometric parameters in order to predict its energy absorption capacity under direct traction loading. The superelastic behavior of the shape memory alloys is defined by using the Brinson's structural relationships with the UMAT subroutine. It has been verified through a finite element analysis that the proposed element is both highly ductile and capable of dissipating high amounts of energy. In the optimal state, the specific absorbed energy and the ductility of the proposed asbestos damper made of memory alloy are 39.2 J/kg and 44, respectively, which are about 114% and 81% higher than the corresponding steel dampers. Thus, this new damper is capable of consuming quite a lot of input energy with its unique ductile behavior, while at the same time being able to replace quite a few existing metal dampers due to its simplicity and high performance.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.29100.2366>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: Ahmad.Ganjali@iau-shahrood.ac.ir

How to cite this article:

Masodi, M., Ganjali, A., Irani, H., & Mirzakhani, A. (2024). Finite element investigation of energy dissipation of auxetic yield damper made of shape memory alloys. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(77), 79-93. doi: 10.22075/jme.2023.29100.2366

بررسی المان محدود استهلاک انرژی میراگر جاری شونده آگزتیک ساخته شده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

میلاذ مسعودی^۱، احمد گنجعلی^{۲*}، حمیدرضا ایرانی^۲، ابوذر میرزاخانی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۰۷	در پژوهش حاضر، یک میراگر فلزی جاری شونده جدید از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به منظور استهلاک انرژی و کنترل خسارت در اعضاء اصلی سازه‌های فلزی ارائه شده است، که از یک قسمت اصلی با هندسه آگزتیک و ساختار ضریب پواسون منفی تشکیل شده است، که از طریق تغییر شکل پلاستیک انرژی را جذب می‌کند. به منظور بررسی قابلیت جذب انرژی میراگر ارائه شده، مجموعه‌ای از تحلیل‌های غیرخطی شبه استاتیکی تحت بارگذاری کشش مستقیم و به کمک نرم‌افزار ABAQUS بر روی میراگر با پارامترهای هندسی مختلف شامل نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک سوراخ‌های بیضی شکل، کسر حجمی سوراخ‌ها و طول میراگر انجام پذیرفته است. رفتار سوپرالاستیک آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با استفاده از روابط ساختاری برینسون و به کمک زیربرنامه UMAT تعریف شده است. نتایج بررسی‌های المان محدود، نشان دهنده میزان شکل‌پذیری قابل قبول المان پیشنهادی و قابلیت بالای استهلاک انرژی می‌باشد. همچنین، مشاهده می‌شود که در حالت بهینه انرژی جذب شده ویژه و شکل‌پذیری میراگر آگزتیک پیشنهادی از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی به ترتیب برابر $39/2 \text{ J/kg}$ و 44 به دست می‌آید که به ترتیب در حدود 114% و 81% بیشتر از میراگر فولادی متناظر می‌باشد. بنابراین، میراگر جدید ارائه شده می‌تواند با رفتار شکل‌پذیر خود مقدار زیادی از انرژی ورودی را مستهلک نماید و به علت سادگی و عملکرد بالا جایگزین بسیاری از میراگرهای فلزی موجود شود.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۳	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱	
واژگان کلیدی: میراگر جاری شونده آگزتیک، آلیاژ حافظه‌دار شکلی، استهلاک انرژی، شکل‌پذیری، المان محدود غیرخطی.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.29100.2366>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

توجه به این امر انواع مختلفی از میراگرها توسط محققین مختلف پیشنهاد و مورد آزمایش قرار گرفته است. میراگرهای پیشنهادی بسیار متنوع بوده و هر یک از آنها به نوبه خود از مزایا و معایب خاصی برخوردارند و ارائه سیستم کارآمد همواره مورد توجه بوده است [۲-۴]. میراگرهای غیرفعال، به طور گسترده‌ای در کنترل لرزه‌های سازه‌های مختلف استفاده می‌شوند [۵-۷]. در بین میراگرهای کنترل غیرفعال که برای کنترل و کاهش

در دهه‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای کاهش نیروهای وارد بر سازه گسترش یافته است [۱]. روش‌های مختلف کنترل لرزه‌های سازه‌ها عموماً با افزودن اعضاء جدید به سازه به منظور اتلاف انرژی ورودی به سازه در اثر زلزله و یا بارگذاری‌های دینامیکی همراه هستند. از جمله این اعضاء می‌توان به میراگرهای فلزی اشاره نمود که اتلاف انرژی در آنها به صورت تغییر شکل‌های پلاستیک انجام می‌شود. با

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Ahmad.Ganjali@iau-shahrood.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، گروه فنی مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران.

۲. استادیار، گروه فنی مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران.

استناد به این مقاله:

مسعودی، میلاذ، گنجعلی، احمد، ایرانی، حمیدرضا، و میرزاخانی، ابوذر. (۱۴۰۳). بررسی المان محدود استهلاک انرژی میراگر جاری شونده آگزتیک ساخته شده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی. مدل سازی در مهندسی، ۲۲(۷۷)، ۷۹-۹۳. doi: 10.22075/jme.2023.29100.2366

شده‌اند [۱۷، ۲۰، ۲۱]. این مواد ویژگی‌های منحصر به فردی دارند که به جذابیت آن‌ها برای کاربردهای ویژه منجر شده است. لیکس [۲۲] برای اولین بار ساختار اسفنجی با خاصیت آگزتیک را معرفی کرد. نتایج مطالعه او نشان داد، مواد آگزتیک به صورت مصنوعی قابل تولید بوده و پس از آن دانشمندان بیشتری شروع به مطالعه درباره مواد آگزتیک کردند. رشد و توسعه مواد آگزتیک در سال‌های اخیر بسیار سریع بوده است. با وجود اینکه کاربردهای بسیاری برای این مواد پیشنهاد شده است، کاربردهای واقعی مواد آگزتیک هنوز در مراحل اولیه ارائه است، بر این اساس باید تلاش شود تا مواد آگزتیک کاربردی، بهبود یابد و توسعه پیدا کند. مواد آگزتیک، خواص ویژه‌ای در مقایسه با مواد متداول از جمله کاهش مدول یانگ، افزایش مدول برشی، افزایش مقاومت در برابر برخورد، قابلیت انحنای دوگانه، افزایش چقرمگی شکست و مقاومت در برابر ترک، افزایش قابلیت جذب انرژی و قابلیت نفوذپذیری متغیر دارند [۲۳]. رن و همکاران [۲۴] رفتار سازه‌های آگزتیک استوانه‌ای شکل را تحت بارگذاری کششی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که در صورت انتخاب مناسب پارامترهای هندسی سازه، مشخصات مکانیکی سازه آگزتیک طراحی شده می‌تواند بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا کند. ژانگ و همکاران [۲۵] در یک مطالعه مروری به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه تغییر شکل‌های بزرگ و جذب انرژی مواد آگزتیک پرداختند. منا و سینگامنی [۲۶] ساختار آگزتیک جدیدی با هندسه S شکل را پیشنهاد کرده و عملکرد سازه ارائه شده را با استفاده از روش المان محدود و همچنین تست‌های تجربی مطالعه کردند. گیو و همکاران [۲۷] رفتار مکانیکی سازه‌های استوانه‌ای آگزتیک تحت بارگذاری محوری را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که قابلیت جذب انرژی در این سازه‌ها تا حد زیادی وابسته به هندسه حفره‌ها و تراکم آنها می‌باشد و عملکرد استوانه‌های آگزتیک در برابر بارگذاری محوری نسبت به استوانه‌های معمولی بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته است. حسنی و همکاران [۲۸] به بررسی مقاومت در برابر نفوذ سازه آگزتیک از جنس مواد حافظه‌دار شکلی پرداختند. ندوشن و همکاران [۲۹] تأثیر اندازه و سطح مقطع سازه‌های استوانه‌ای شکل فلزی با ضریب پواسون منفی بر روی مشخصه‌های جذب انرژی آنها را به صورت تجربی و المان محدود مطالعه کرد. نتایج مطالعه آنها

پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها تحت زمین لرزه‌های شدید به کار می‌روند، میراگرهای جاری شونده‌ی فلزی به دلیل داشتن مزایای متعددی مانند سازوکار ساده، هزینه کمتر، عملکرد پایدار و سهولت در تنظیم مقاومت و سختی اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند [۸-۱۰]. در این نوع از میراگرها از خاصیت جاری شدن فلزات یا همان رفتار هیستریک فلزات به هنگام تغییر شکل در ناحیه‌ی خمیری استفاده می‌شود، که باعث افزایش استهلاک انرژی ورودی می‌شود. علاوه بر این، این میراگرها باعث افزایش سختی نیز می‌شوند. چان و آلبرمانی [۱۱] عملکرد لرزه‌ای میراگرهای شیاردار فولادی در قاب‌های فولادی را به صورت تجربی بررسی کردند. در مطالعه آنها، نمونه‌های ساخته شده تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای قرار گرفتند. نتایج آزمایشگاهی آنها دو خاصیت مهم میراگرهای فولادی که شامل توانایی پایدار در استهلاک انرژی و همچنین یک مدل مناسب برای رفتارهای رفت و برگشتی می‌باشد را نشان داد. محمدی و همکاران [۱۲] با استفاده از تست‌های تجربی و روش عددی به بررسی رفتار لرزه‌ای میراگرهای فلزی TADAS پرداختند و نشان دادند که منحنی نیرو-جابجایی میراگر TADAS ارائه شده به چهار ناحیه مجزا قابل تقسیم‌بندی می‌باشد. بالندرا و همکاران [۱۳] سیستم ترکیبی جدیدی متشکل از مهاربند زانویی و اتصال پیچی شیاردار به صورت سری را ارائه کردند. ملکی و محجوب [۱۴] با استفاده از لوله جوش داده شده میراگر جدیدی را به منظور بهبود جذب انرژی ارائه دادند. گیو و همکاران [۱۵] با استفاده از نوارهای فولادی میراگر فلزی جدیدی را طراحی کردند. در مدل ارائه شده توسط آنها نوارهای فولادی به عنوان عامل جذب و استهلاک انرژی عمل می‌کنند. آزندریانی و همکاران [۱۶] با استفاده از دو حلقه فولادی میراگر جدیدی را ارائه کرده و با استفاده از روش حل عددی و تحلیلی عملکرد آن را مطالعه کردند.

در سال‌های اخیر، پیشرفت علم و فناوری انگیزه‌ای در جهت یافتن مواد سازه‌ای جدید از قبیل مواد با ضریب پواسون منفی و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی ایجاد نموده است [۱۷-۱۹]. مواد با ضریب پواسون منفی یا مواد آگزتیک نوع غیر متداول از مواد هستند که برخلاف مواد متداول، دستخوش ازدیاد طول عرضی در اثر کشش محوری یا جمع شدگی عرضی در اثر نیروی فشاری می‌شوند. تا به امروز تعداد زیادی از مواد با این خاصیت کشف، ساخته یا پیشنهاد

هندسی مختلف بر قابلیت جذب انرژی در این سازه جدید ارائه شده، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل برینسون آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

یکی از مدل‌های ساختاری پرکاربرد برای شبیه‌سازی رفتار سوپرالاستیک آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، مدل برینسون می‌باشد که با استفاده از جملات نمایی توزیع دما و تنش در ماده را پیش‌بینی می‌کند [۴۳]. بر اساس مدل برینسون، معادلات ساختاری با استفاده از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$d\sigma = D(\xi)d\varepsilon + \Omega(\xi)d\xi_c \quad (1)$$

$$D = D_A + \xi(D_m - D_A) \quad (2)$$

$$\Omega = -\varepsilon_L D \quad (3)$$

که در آن σ تانسور تنش، ε تانسور کرنش، ξ_c کسر حجمی فاز مارتنزیت ماده می‌باشد. همچنین، D نشان دهنده مدول یانگ بوده به طوری که D_A مدول یانگ فاز آستنیت و D_m مدول یانگ فاز مارتنزیت می‌باشد. Ω تانسور انتقال و ε_L حداکثر کرنش بازیابی آلیاژ می‌باشد. با انتگرال‌گیری از رابطه (۱) از حالت‌های ابتدایی تا انتهایی، رابطه زیر به دست می‌آید [۴۴]:

$$\sigma - \sigma_0 = D(\xi)\varepsilon - D(\xi_0)\varepsilon_0 + \Omega(\xi)\xi_s - \Omega(\xi_0)\xi_{s0} \quad (4)$$

که در آن زیرنویس 0 نشان دهنده مقادیر در حالت اولیه می‌باشد.

در مدل برینسون، درصد حجمی مارتنزیت که وابسته به مارتنزیت حاصل از تنش (ξ_s) و مارتنزیت حاصل از دما (ξ_T) می‌باشد، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\xi = \xi_s + \xi_T \quad (5)$$

بنابراین، معادله ساختاری را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\sigma = (D_a + \xi(D_m - D_A))(\varepsilon - \varepsilon_L \xi_s) \quad (6)$$

در شکل (۱) منحنی تنش-کرنش آلیاژ حافظه‌دار شکلی برای نمونه نشان داده شده است. در این شکل M_s ، M_f ، A_s و A_f به ترتیب نشان دهنده حالت‌های شروع فاز مارتنزیت، اتمام فاز مارتنزیت، شروع فاز آستنیت و اتمام فاز آستنیت می‌باشند. C_M و C_A نشان دهنده ثوابت ماده وابسته به تنش تغییرات فاز می‌باشند. σ_s^{cr} و σ_f^{cr} تنش‌های شروع و اتمام فاز مارتنزیت هستند. بر اساس مدل برینسون، روابط حاکم بر تبدیلات فازی به صورت زیر می‌باشند [۴۴]:

نشان داد که استفاده از ساختار با ضریب پواسون منفی با اندازه سلول‌های کوچک پایداری محوری بیشتری دارند.

در سال‌های اخیر طیف گسترده‌ای از مواد آکستیک و غیر آکستیک دو بعدی مانند شش ضلعی [۳۰]، کایرال، [۳۱]، ری‌اینترنت [۳۲]، آنتی‌تتراکایرال [۳۳] و همچنین متامواد سه بعدی [۳۴] پیشنهاد شده است. توسعه تکنیک‌های تولید افزودنی، ساخت ساختارهای پیچیده‌تر را امکان‌پذیر کرد. مواد آکستیک مزایای فنی بسیاری از جمله جذب انرژی، مقاومت در برابر فرورفتگی، مقاومت برشی و مقاومت در برابر ضربه را نشان داده اند [۳۵-۳۷]. بنابراین این نوع ساختارها می‌توانند تمام این ویژگی‌ها را تأمین کنند. مروری بر پاسخ جذب انرژی و کاربردهای ساختاری سازه‌های اکستیک توسط برخی از محققان مانند فرانسیسکو و همکاران [۳۸]، یین و همکاران [۳۹] و گومز و همکاران [۴۰] ارائه شده است. لی و همکاران [۴۱] یک طرح لانه زنبوری لوزی ستاره‌ای (SRH) جدیدی را به منظور بهبود ظرفیت باربری و قابلیت جذب انرژی ساختارهای آگزتیک پیشنهاد کردند. نتایج مطالعه آنها نشان از بهبود ۸۷ درصدی ظرفیت جذب انرژی این سازه نسبت به ساختار غیرآگزتیک می‌باشد. یک نوع جدید از ساختار شبکه سه بعدی آگزتیک برای غلبه بر کاستی آنها و بهبود ظرفیت جذب انرژی توسط ژانگ و همکاران [۴۲] پیشنهاد شده است. ساختار شبکه پیشنهادی آنها از ساختارهای شش ضلعی ری‌اینترنت سه بعدی دوره‌ای و ساختارهای شش ضلعی آنتی‌تتراکایرال تشکیل شده است.

بررسی تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که تلاش‌های برای ارائه هندسه‌های جدید برای ساختارهای همچنان مورد توجه محققان می‌باشد. قابلیت جذب انرژی بالای این مواد در مقایسه با ساختارهای غیرآگزتیک باعث گستردگی کاربرد این ساختارها در سازه‌های مختلف نشان داده شده است. مروری بر ادبیات فن نشان می‌دهد که تاکنون عملکرد ساختارهای دارای ضریب پواسون منفی در میراگرهای فلزی مطالعه نشده است. بر این اساس، در تحقیق حاضر برای اولین بار قابلیت بهره‌گیری از مواد آگزتیک و از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در میراگرهای جاری شونده به صورت عددی مطالعه شده است. برای منظور، در ابتدا برای دستیابی به ساختاری با قابلیت پایداری بالا و سختی قابل تنظیم و در عین حال قابلیت جذب انرژی بالا، ساختار آگزتیک جدیدی ارائه شده است. در ادامه تأثیر پارامترهای

(الف) آستنیت به مارتنزیت

۳- میراگر فلزی جاری شونده اگزتیک

مطابق شکل (۲) میراگر فلزی جاری شونده اگزتیک ارائه شده از سه بخش اصلی تشکیل شده است که عبارت‌اند از: ورق پایه از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، سوراخ‌های پایه به صورت مستطیل شکل و با ابعاد $L \times 0.25L$ انتخاب شده است و قطر بزرگ و قطر کوچک سوراخ‌های بیضوی شکل به ترتیب برابر R و r می‌باشد. بنابراین، چهار پارامتر اصلی شامل اندازه ورق پایه L ، شعاع دایره کوچک، r ، و بزرگ، R ، و همچنین تعداد سوراخ‌های بیضوی در طراحی میراگر فلزی جاری شونده اگزتیک جدید ارائه شده مؤثر هستند. بر این اساس، قابلیت جذب انرژی توسط این میراگر به این پارامترها وابسته خواهد بود که در ادامه مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

۴- مدل سازی المان محدود غیرخطی

در سال‌های اخیر با توسعه تجهیزات کامپیوتری استفاده از روش‌های حل عددی و المان محدود در زمینه‌های مختلف مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۴۶-۵۲]. در این بخش به بیان تحلیل‌های المان محدود انجام پذیرفته بر روی میراگر حافظه‌دار شکلی جاری شونده اگزتیک پرداخته می‌شود. جهت انجام تحلیل‌ها از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS استفاده شده و تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی با در نظر گرفتن بارگذاری کششی برای میراگر فلزی جاری شونده اگزتیک انجام می‌پذیرد. شرایط مرزی و نحوه اعمال بارگذاری به همراه نمونه‌های مش‌بندی شده در شکل (۳-الف) آمده است. برای مش‌بندی تمام اجزای تحت بررسی از المان‌های سه‌بعدی بیست گرهی غیرخطی انتگرال کاهش‌یافته C3D20R استفاده شده و غیرخطی‌های هندسی و مصالح در نظر گرفته شده است. ابعاد مناسب المان‌ها بعد از آنالیز حساسیت به مش انتخاب شده و اندازه مش مورد استفاده برای میراگر در حدود 0.1 سانتی‌متر می‌باشد که معادل حدود 86500 المان می‌باشد. در شکل (۳-ب) نتایج استقلال از شبکه شامل منحنی نیروی تسلیم برحسب تعداد المان برای نمونه Type I آورده شده است.

$$T > M_s,$$

$$\sigma_s^{cr} + C_{M_s}(T - M_s) < \sigma < \sigma_f^{cr} + C_{M_f}(T - M_s):$$

$$\xi_s = \frac{1 - \xi_{s0}}{2} \cos \left[\frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr} + (C_{M_f} - C_{M_s})(T - M_s)} \times (\sigma - \sigma_f^{cr} - C_{M_f}(T - M_s)) \right] \quad (7)$$

$$\xi_T = \frac{\xi_{T0}}{1 - \xi_{s0}} (\xi_0 - \xi_{s0})$$

$$T < M_s, \sigma_s^{cr} < \sigma < \sigma_f^{cr}:$$

$$\xi_s = \frac{1 - \xi_{s0}}{2} \cos \left[\frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \times (\sigma - \sigma_f^{cr}) \right] + \frac{1 + \xi_{s0}}{2}, \quad (8)$$

$$\xi_T = (\xi_0 - \xi_{s0}) + \frac{\xi_{T0}}{1 - \xi_{s0}} (\xi_0 - \xi_{s0})$$

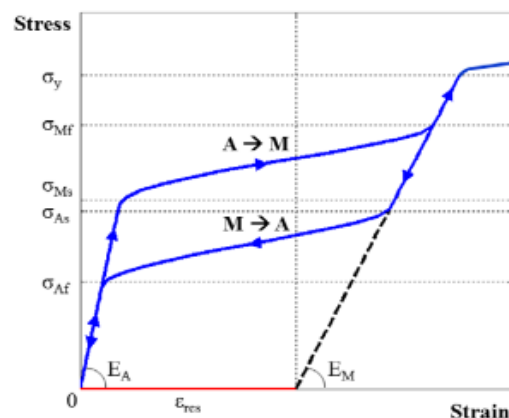
(ب) مارتنزیت به آستنیت

$$T > A_s, C_{A_f}(T - A_f) < \sigma < C_{A_s}(T - A_s):$$

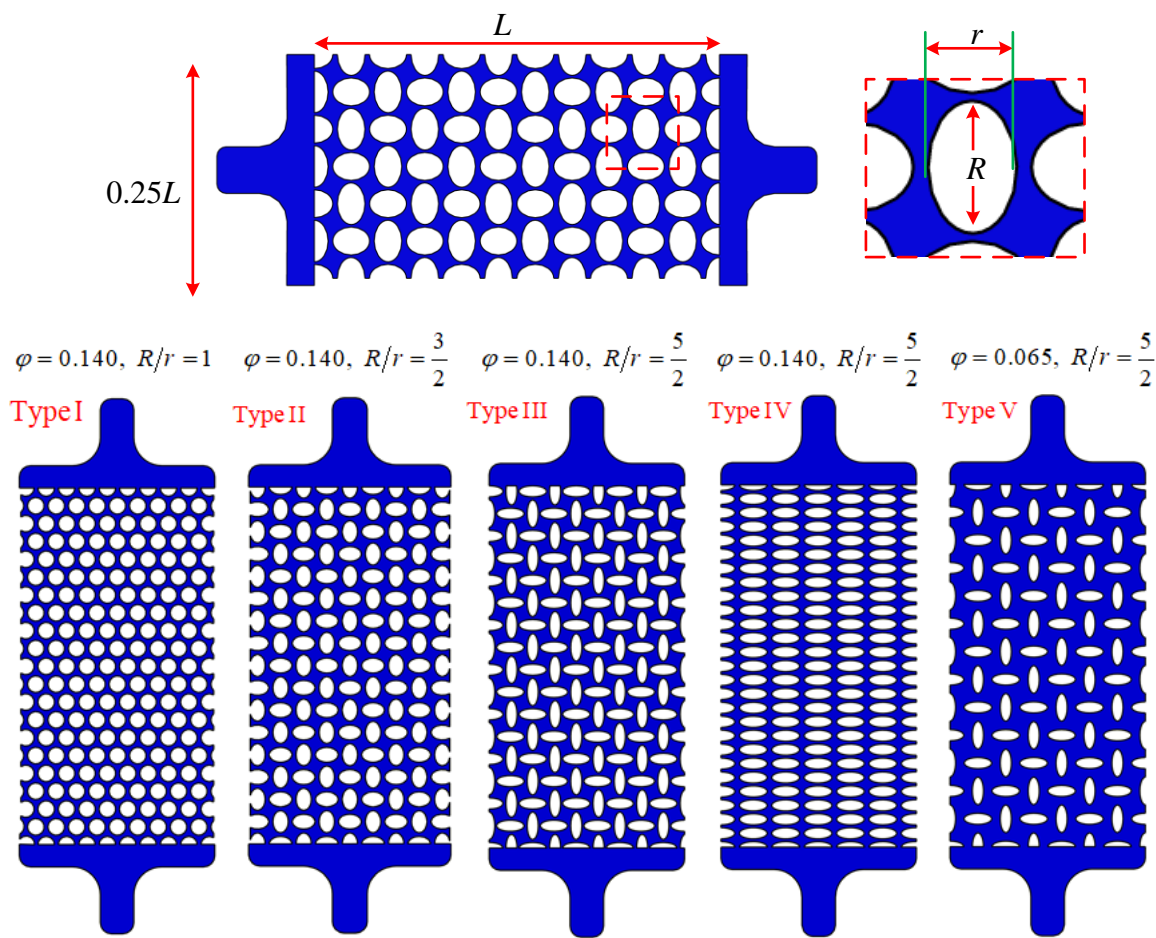
$$\xi = \frac{\xi_0}{2} \cos \left[\frac{\pi (C_{A_f}(T - A_f) - \sigma)}{C_{A_s}(T - A_s) - C_{A_f}(T - A_f)} \right], \quad (9)$$

$$\xi_s = \xi_{s0} - \frac{\xi_{s0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi), \quad \xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi)$$

در سابروتین UMAT نرم‌افزار ABAQUS، تنش در هر مرحله را می‌توان با حل معادله (۴) و با توجه به شرایط معادلات (۷)-(۹) تعیین نمود. در سابروتین UMAT لازم است که ماتریس ژاکوبین معادله تنش- کرنش تعریف و در هر مرحله برحسب مقادیر تنش و کرنش بروزرسانی شود. پس از بروزرسانی ماتریس تنش، نرم‌افزار ABAQUS اقدام به حل معادلات تعادل و محاسبه تغییر شکل‌های سازه می‌کند.



شکل ۱ منحنی تنش-کرنش ماده SMA [۴۵]

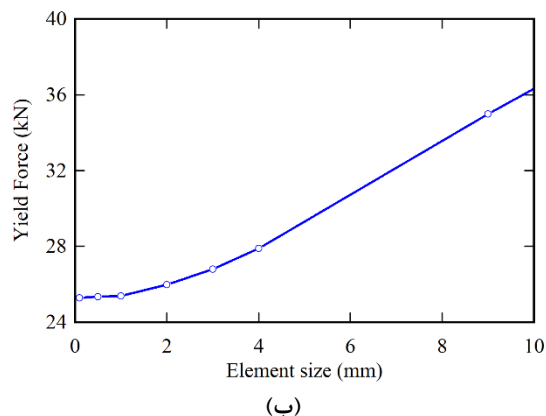
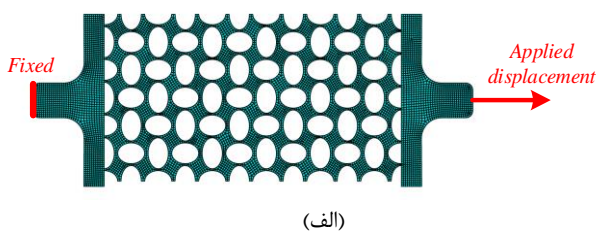


شکل ۲ میراگر فلزی جاری شونده آگزتیک جدید ارائه شده در تحقیق حاضر

”Contact و رفتار مماسی ”Penalty“ با ضریب اصطکاک ۰/۱ برای تعریف اندرکنش بین سطوح مختلف میراگر استفاده شده است. رفتار سوپرالاستیک آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با استفاده از روابط ساختاری برینسون و به کمک زیربرنامه UMAT تعریف شده است. در جدول ۱ مشخصات مکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های عددی آمده است.

جدول ۱ مشخصات مکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی [۵۳]

مشخصات مکانیکی	مقدار
E_m	۶۷ GPa
E_a	۲۶/۳ GPa
σ_{scr}	۱۷۰ MPa
σ_{fer}	۱۰۰ MPa
ϵ_L	۶/۷%
C_{Af}	۱۳/۸ MPa/°C
C_{As}	۱۶/۳۰ MPa/°C
C_{Mf}	۸/۰ MPa/°C
C_{Ms}	۵/۷۵ MPa/°C



شکل ۳ (الف) شرایط مرزی، بارگذاری و مش‌بندی میراگر پیشنهادی و (ب) نتایج استقلال از شبکه به منظور تعیین ابعاد مناسب المان‌ها
الگوریتم برخورد سطح به سطح با خاصیت عمودی ”Hard“

مختلف میراگر فلزی ارائه شده به ازای $R/r = 5/2, 3/2, 1, 1/2$ و با در نظر گرفتن مقدار ثابت $L = 650 \text{ mm}$ و $\phi = 0.140$ و به ازای مقدار مشخص جابجایی اعمالی به انتهای نمونه‌ها برابر ۲ سانتی‌متر نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که اندازه حفره‌ها و نحوه پراکندگی آنها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تغییر شکل این نوع سازه‌ها دارد و به ازای برخی از حالت‌های تحت بررسی رفتار ضریب پواسون منفی ایجاد می‌شود. رفتار نمونه‌های دارای حفره‌های منظم و یکنواخت یعنی نمونه‌های I و IV دارای پواسون مثبت و رفتار غیر آگزتیک بوده و با اعمال کشش، بخش میانی نمونه‌ها دچار کاهش طول و جمع‌شدگی می‌شوند و میزان کاهش طول ناحیه مرکزی برای این نمونه‌ها به ترتیب برابر $5/3$ درصد و $0/87$ درصد به دست می‌آید. همچنین، افزایش طول ناحیه مرکزی برای نمونه‌های II، III و V که رفتار آگزتیک دارند به ترتیب برابر $3/4$ درصد، $4/1$ درصد و $1/4$ درصد به دست می‌آید. بر اساس این نتایج می‌توان نتیجه گرفت با افزایش کسر حجمی حفره‌ها همچنین استفاده از حفره‌های بیضوی شکل با توزیع غیریکنواخت باعث افزایش خاصیت آگزتیکی سازه می‌شود و به لحاظ آگزتیکی نمونه III دارای بهترین رفتار می‌باشد. علاوه بر این، مقایسه تغییر شکل نمونه‌های III و IV که دارای کسر حجمی تخلخل یکسان و حفره‌های هم اندازه (نسبت R/r برابر) هستند، نشان می‌دهد تغییر در نحوه توزیع حفره‌ها می‌تواند رفتار سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ساختار III که در آن حفره‌های بیضوی شکل به صورت افقی و عمودی در صفحه فولادی قرار گرفته‌اند دارای رفتار آگزتیک بوده و نسبت به ساختار IV که رفتار پواسون مثبت دارد تغییر شکل‌های زیاد و در نتیجه جذب انرژی بالایی خواهد داشت.

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد میراگر جدید ارائه شده، در شکل (۵) منحنی نیرو-جابجایی برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده در شکل (۱) ارائه شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که نمونه‌های III و V دارای سختی و مقاومت اولیه بیشتری نسبت به بقیه نمونه‌ها می‌باشد، لیکن مقاومت آن‌ها بعد از حداکثر ظرفیت دچار افت قابل توجهی شده و با شیب منفی پیش می‌رود. دلیل رشد دوباره منحنی نیرو-جابجایی بعد از جابجایی 5 cm به علت رفتار سوپر الاستیک و سخت‌شوندگی

اگر تعداد سوراخ‌های موجود در ورق پایه برابر N باشد، در این صورت کسر حجمی حفره‌ها را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\phi = 4 \frac{NA}{L^2} \quad (10)$$

که در آن $A = \pi r R$ مساحت سوراخ‌های بیضوی شکل می‌باشد. بنابراین، چگالی معادل میراگر با ساختار آگزتیک را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = 1 - \phi \quad (11)$$

که در آن ρ^* چگالی معادل ساختار آگزتیک بوده و ρ_s چگالی ورق فولادی می‌باشد.

انرژی کل جذب شده (E) مجموع انرژی جذب شده توسط سازه در حین تغییر شکل تا حالت نهایی تغییر شکل می‌باشد که می‌توان از انتگرال گیری منحنی نیرو-جابجایی به دست آورد:

$$E_a(J) = U = \int_0^\delta F(\delta) d\delta \quad (12)$$

که در آن δ جابجایی سازه می‌باشد.

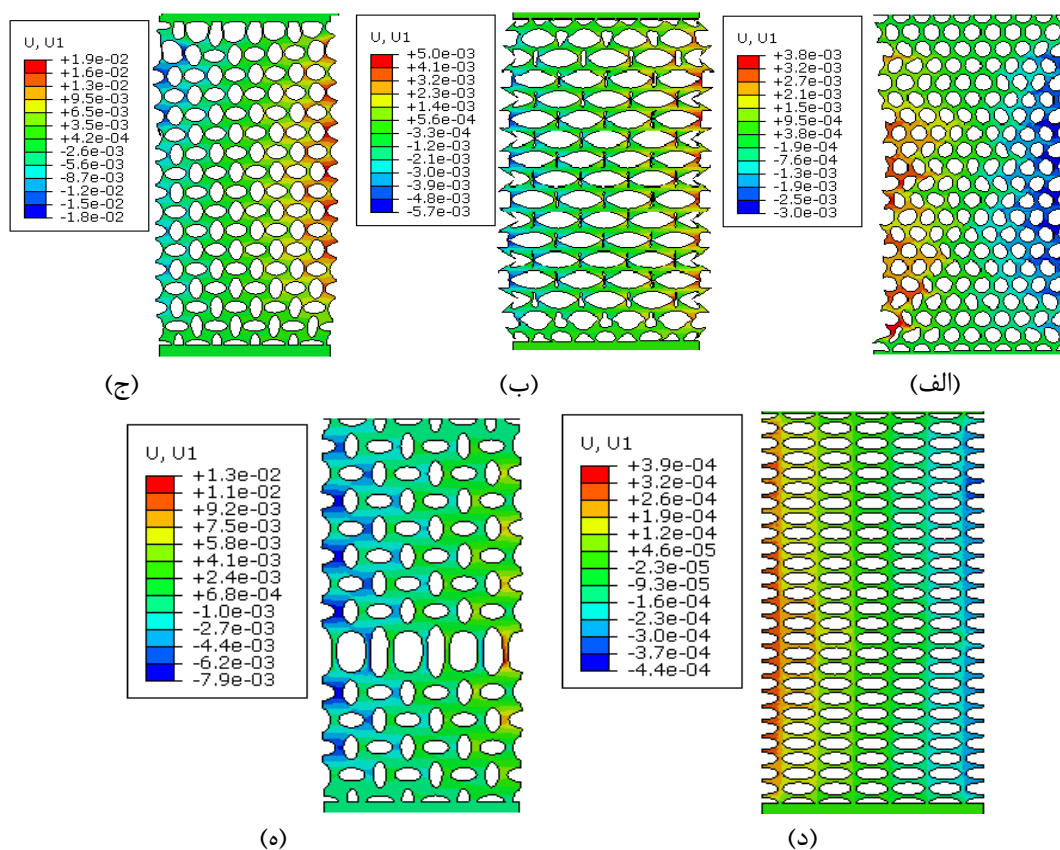
در این تحقیق، به منظور مقایسه راندمان جذب انرژی سازه‌ها با چگالی‌های مختلف از مفهوم انرژی جذب شده ویژه^۲ استفاده می‌شود. انرژی جذب شده ویژه (SEA) به صورت انرژی جذب شده توسط جرم واحد سازه تعریف می‌شود که نسبت انرژی جذب شده کل به جرم سازه، W ، می‌باشد، یعنی:

$$SEA(J/kg) = \frac{E_a}{W} \quad (13)$$

۵- بررسی نتایج

در این قسمت به بررسی نتایج تحلیل‌های المان محدود انجام پذیرفته بر روی میراگر جاری شونده آگزتیک پیشنهادی پرداخته می‌شود. بدین منظور، در ابتدا به مطالعه تأثیر پارامترهای هندسی مختلف شامل نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک سوراخ‌های بیضوی شکل، R/r ، کسر حجمی سوراخ‌ها، ϕ ، و طول میراگر، L ، بر عملکرد میراگر پیشنهادی پرداخته می‌شود. سختی اولیه (K_0)، جابجایی تسلیم (Δ_y)، نیروی تسلیم (P_y)، شکل پذیری ($\mu = \Delta_{\max} / \Delta_y$)، حداکثر ظرفیت (P_u) و انرژی استهلاک شده (SEA) به عنوان پارامترهای تحت بررسی انتخاب شده‌اند. در شکل (۴) مکانیزم تغییر شکل تعدادی از نمونه‌های

² Specific Energy Absorption



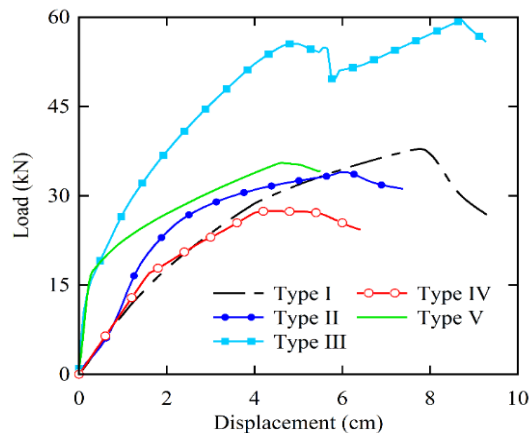
شکل ۴ مکانیزم تغییر شکل (m) تعدادی از نمونه‌های مختلف میراگر فلزی ارائه شده

(الف) Type I، (ب) Type II، (ج) Type III، (د) Type IV و (ه) Type V

در شکل (۶) انرژی تجمعی اتلاف شده توسط تغییر شکل پلاستیک میراگر برحسب جابجایی اعمالی به آن نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که انرژی اتلاف شده ناشی از جاری شدن و تغییر شکل پلاستیک برای نمونه I کمترین مقدار را داشته و نمونه آگرتیک III توانایی بالایی را در استهلاک انرژی دارد. این منحنی به وضوح نشان می‌دهد که سازه‌های دارای ساختار آگرتیک قابلیت بالایی در اتلاف انرژی دارند. علاوه بر این، برای این نمونه همانطور که مشاهده می‌شود به ازای جابجایی‌های بیشتر از ۱.۵ cm رشد مقاومت بیشتری دیده می‌شود که این پدیده علاوه بر آثار سخت‌شدگی کرنشی، به علت اعمال تغییر شکل‌های زیاد و در نتیجه افزایش تغییر شکل‌های غیرخطی بزرگ در نمونه‌های آگرتیک است.

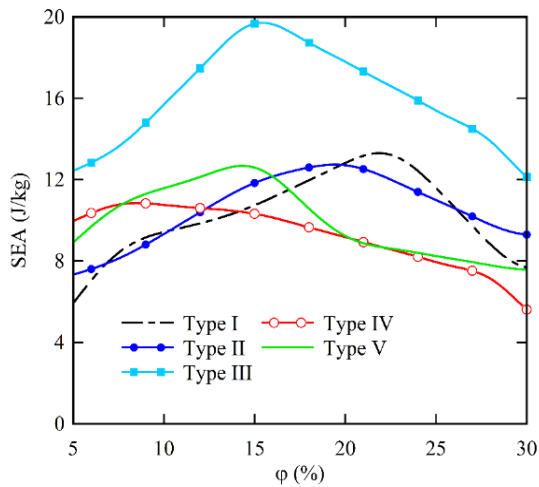
بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۵)، پارامترهای سختی اولیه، جابجایی تسلیم، نیروی تسلیم، نیروی نهایی و جابجایی متناظر با آن، شکل‌پذیری و انرژی استهلاک شده نمونه‌های تحت بررسی در جدول ۲ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر شکل الاستیک میراگر نمونه‌های I و II بیشتر بوده و احتمال جاری نشدن میراگر در سازه وجود

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در نتیجه ایجاد تبدیلات فازی از فاز آستنیت به مارتنزیت می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که نیروی تسلیم برای نمونه‌های I، II، III، IV و V به ترتیب برابر با 24.6 kN، 18.1 kN، 15.2 kN، 17.6 kN و 17.1 kN به دست می‌آید. بنابراین، می‌توان بیان نمود که در بین نمونه‌های مختلف تحت بررسی، نمونه آگرتیک III دارای بیشترین نیروی تسلیم بوده و قابلیت مناسبی جهت استفاده به عنوان میراگر خواهد داشت.



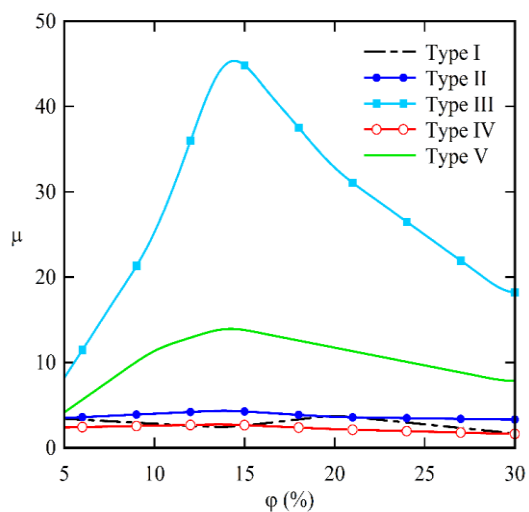
شکل ۵ منحنی نیرو-جابجایی برای نمونه‌های مختلف تحت بررسی

آگزتیک می‌تواند باعث بهبود ۱۱۶ درصدی قابلیت انرژی ویژه این نوع میراگرها می‌شود.



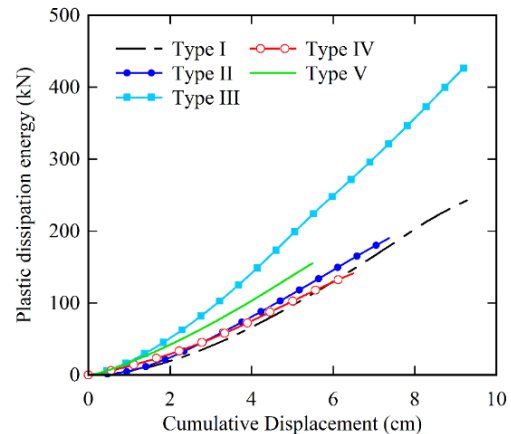
شکل ۷ تأثیر کسر حجمی حفره‌ها بر انرژی جذب شده ویژه پنج نمونه میراگر مختلف تحت بررسی

شکل (۸) تأثیر کسر حجمی حفره‌ها بر ضریب شکل‌پذیری نمونه‌های مختلف میراگرهای تحت بررسی نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که شکل‌پذیری نمونه‌های I, II و IV تقریباً در یک محدوده بوده و بیشترین شکل‌پذیری مربوط به نمونه میراگر آگزتیک نوع III می‌باشد. علاوه بر این، به ازای کسر حجمی پایین حفره‌ها، شکل‌پذیری تمام نمونه نزدیک به هم بوده و اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند ولی با افزایش میزان حفره‌ها، شکل‌پذیری نمونه‌های مختلف اختلاف زیادی پیدا کرده و بیشترین شکل‌پذیری مربوط به نمونه میراگر III و به ازای ϕ برابر ۱۴/۷ بوده و مقدار آن برابر ۴۵/۸ می‌باشد.



شکل ۸ تأثیر کسر حجمی حفره‌ها بر ضریب شکل‌پذیری نمونه‌های مختلف میراگرهای تحت بررسی

خواهد داشت. همچنین، مشاهده می‌شود که در حالت کلی نمونه III دارای مشخصه‌های عملکردی بهتری نسبت به سایر نمونه‌های تحت بررسی است و انرژی جذب شده ویژه و شکل‌پذیری آن به ترتیب برابر $19/3$ و 44 به دست می‌آید. بنابراین، این عضو می‌تواند با رفتار شکل‌پذیر خود مقدار زیادی از انرژی ورودی زلزله را مستهلک نماید.



شکل ۶ انرژی مستهلک شده ناشی از جاری شدن و تغییر شکل پلاستیک در نمونه‌های مختلف تحت بررسی

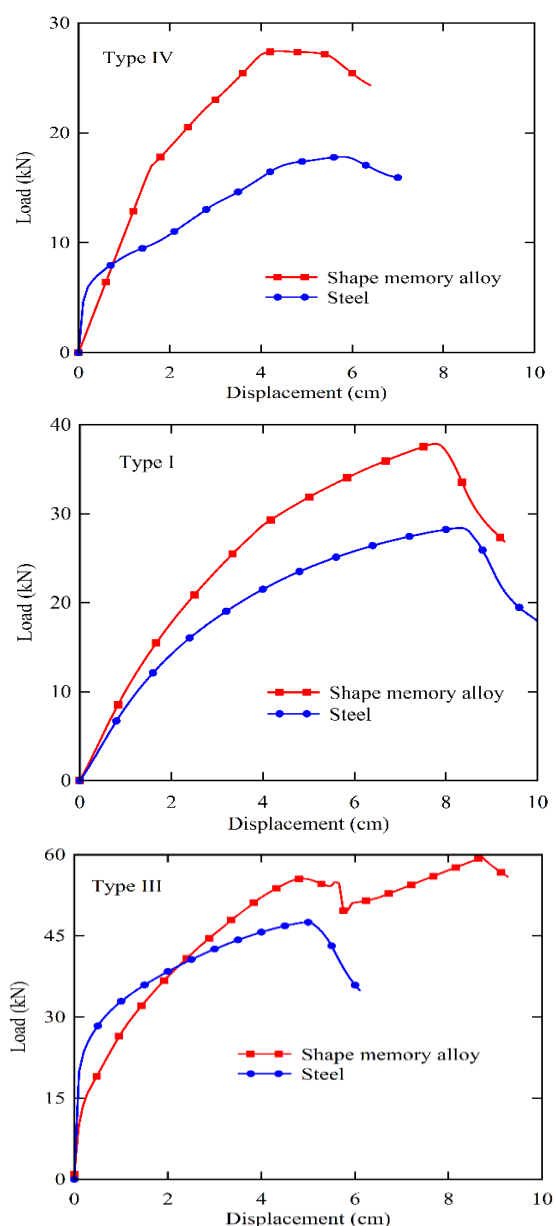
در ادامه، به مطالعه تأثیر کسر حجمی حفره‌ها بر عملکرد میراگرهای آگزتیک ارائه شده پرداخته می‌شود. بدین منظور، نحوه چیدمان و شکل هندسی حفره‌ها مطابق نمونه‌های نشان داده شده در شکل (۱) بوده و تنها کسر حجمی حفره‌ها با تغییر در تعداد حفره‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۷) تأثیر کسر حجمی حفره‌ها بر انرژی جذب شده ویژه پنج نمونه میراگر مختلف تحت بررسی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود کسر حجمی حفره‌ها تأثیر به‌سزایی در میزان انرژی جذب شده ویژه این نوع میراگرها دارند و در صورت طراحی مناسب می‌توان ظرفیت جذب انرژی ویژه را تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. میراگرهای نوع I, II, IV و V به ازای تمام کسرهای حجمی حفره‌ها انرژی ویژه کمتری نسبت به نمونه میراگر نوع III دارند که این نتیجه نشان دهنده تأثیر قابل ملاحظه و مطلوب ساختار آگزتیک بر بهبود قابلیت جذب انرژی در میراگرها می‌باشد. البته لازم به ذکر است که وجود حفره‌ها لزوماً به معنی بهبود قابلیت جذب انرژی توسط این میراگرها نمی‌باشد و به عنوان مثال به ازای ϕ برابر ۱۵ درصد، پارامتر جذب انرژی ویژه در نمونه‌های میراگر I و III به ترتیب برابر $10/3$ و $39/2$ J/kg به دست می‌آید. بر این اساس، به ازای کسر حجمی یکسان حفره‌ها، ساختار

جدول ۲ پارامترهای سختی اولیه، جابجایی تسلیم، نیروی تسلیم، حداکثر شکل‌پذیری، حداکثر ظرفیت و انرژی استهلاک شده نمونه‌های

میراگر تحت بررسی

	Mass (kg)	K_0 (kN/cm)	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_{max} (cm)	μ	SEA (J/kg)
Type I	۹/۳۹	۹/۴۱	۲۴/۶	۳/۳	۳۷/۸	۷/۸	۲/۳۶	۱۰/۳
Type II	۹/۳۵	۱۰/۱۲	۱۸/۱	۱/۶	۳۳/۲	۶/۱	۴/۳۵	۱۲/۱
Type III	۱۰/۱۵	۹۹/۶۷	۱۵/۲	۰/۲	۵۶/۵	۸/۸	۴۴/۰	۳۹/۲
Type IV	۹/۴۶	۹۹/۳۸	۱۷/۶	۱/۲	۲۷/۷	۴/۳	۲/۶۵	۱۰/۷
Type V	۱۲/۷۹	۵۹/۳۰	۱۷/۱	۰/۳	۳۵/۱	۴/۴	۱۴/۶	۱۰/۵

از خود نشان می‌دهد.

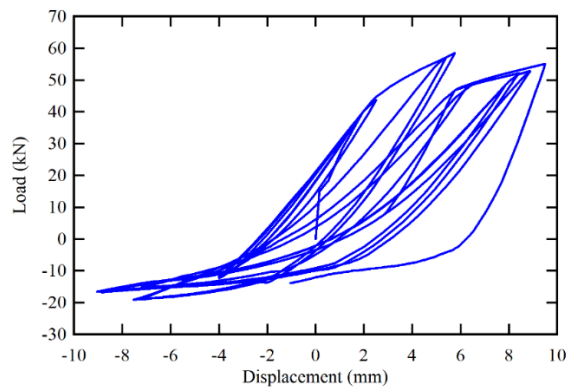


شکل ۹ مقایسه منحنی نیرو-جابجایی سه نمونه میراگر I، III و IV از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی و فولاد

به منظور بررسی قابلیت استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر عملکرد میراگرهای فلزی، در شکل (۹) منحنی نیرو-جابجایی سه نمونه میراگر I، III و IV در صورت استفاده از مصالح فولادی و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود آلیاژهای حافظه‌دار شکلی باعث بهبود قابل توجهی در عملکرد این نوع میراگرها شده و نیروی نهایی و همچنین مساحت زیر منحنی برای میراگرها از جنس آلیاژها حافظه‌دار شکلی بیشتر از میراگرهای متناظر فولادی می‌باشد. به عنوان مثال برای میراگرهای نوع I، III و IV از جنس فولادی نیروی نهایی به ترتیب برابر ۲۸/۸ kN، ۴۷/۶ kN و ۱۷/۸ kN به دست می‌آید که به ترتیب در حدود ۲۴٪، ۲۰٪ و ۳۵٪ از میراگرهای متناظر از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی کمتر می‌باشد. بر این اساس، به دلیل مشخصات مکانیکی فوق‌العاده این نوع آلیاژها در استهلاک انرژی می‌توان اذعان نمود که این نوع میراگرها به عنوان وسیله‌ی کارآمد برای کنترل غیرفعال ارتعاش سازه‌ها بسیار مناسب است.

با توجه به اینکه میراگر Type III نسبت به بقیه نمونه‌ها دارای عملکرد مناسب می‌باشد، بنابراین در ادامه رفتار این نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای مطالعه می‌شود. در شکل ۱۰ منحنی هیستریزس نیرو-جابجایی این نمونه به ازای جابجایی چرخه‌ای اعمالی مطابق با پروتکل ECCS [۳۸] نشان داده شده است. از آنجایی که سطح زیر منحنی هیستریزس، همواره نشان دهنده میزان اتلاف انرژی است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد میراگر ارائه شده در بارگذاری کششی به نسبت در بارگذاری فشاری مطلوب می‌باشد. در حالت کلی با توجه به مساحت بزرگ زیر حلقه‌های هیستریزس می‌توان نتیجه گرفت که میراگر آگزتیک ارائه شده در بارگذاری چرخه‌ای نیز رفتار مناسبی

شکل پذیری بالای آن می باشد که در حدود ۴۵ بوده و از شکل پذیری بسیاری از میراگرهای فلزی بیشتر می باشد. همچنین، میراگر مورد مطالعه از جذب انرژی بالایی برخوردار است و می تواند به راحتی جایگزین سایر میراگرهای فلزی جاری شونده از جمله ADAS و TADAS شود. با توجه به اینکه اصلی ترین هزینه میراگرها مواد آن می باشد، بنابراین انرژی استهلاک شده ویژه که نسبت انرژی اتلاف شده به وزن میراگر می باشد می تواند پارامتر مناسبی به منظور مقایسه انواع مختلف میراگرها باشد. بیشتر بودن این پارامتر به معنی اتلاف انرژی بیشتر و وزن کمتر میراگر می باشد که نشان دهنده اقتصادی بودن آن است. با توجه به جدول ۲ مشاهده می شود که بیشترین مقدار پارامتر انرژی استهلاک شده ویژه برای میراگر جدید ارائه شده می باشد که برابر $42/5 \text{ kJ/kg}$ می باشد که نسبت به میراگرهای متداول مقدار بسیار بزرگی می باشد. بر این اساس، می توان بیان نمود که میراگر جدید ارائه شده علاوه بر داشتن پارامترهای عملکردی مناسب، به لحاظ اقتصادی نیز می تواند مقرون به صرفه باشد.



شکل ۱۰ منحنی هیستریزس نیرو-جابجایی نمونه به ازای جابجایی چرخه ای اعمالی مطابق با پروتکل ECCS

در جدول ۲ برخی از مشخصه های مکانیکی میراگر آگزتیک نمونه III مانند حداکثر جابجایی، شکل پذیری، انرژی کل جذب شده، جرم میراگر با مشخصه های تعدادی از میراگرهای فلزی ارائه شده در تحقیقات پیشین مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود میراگر آگزتیک ارائه شده در حالت کلی مشخصه های عملکردی بسیار مناسبی نسبت به بسیاری از میراگرهای فلزی جاری شونده موجود دارد. یکی دیگر از مزیت های میراگر جدید ارائه شده

جدول ۲ مقایسه مشخصه های عملکردی میراگر آگزتیک ارائه شده و برخی از میراگرهای فلزی جاری شونده متداول

Parameter	Metal yield damper type						
	Auxetic damper (Type III)	DPD ¹ [54]	TADAS ² [55]	SD ³ [11]	SPD ⁴ [56]	ShPD ⁵ [57]	SDRDs ⁶ [16]
Construction cost	Low	Very low	High	Low	Very low	Low	high
Ductility	۴۴/۵	Up to ۳۶	۲۹	۱۲	N/A	۱۴-۲۰	۶/۷
Total dissipated energy (kJ)	۴۳۳	۲۲/۷-۴۹/۲	N/A*	۶/۹	N/A	۵/۸-۶/۵	۲۸
Height (mm)	۶۵۰	۱۱۰-۱۴۰	۳۰۴	۱۶۲	۱۱۴-۱۴۰	۱۰۰-۱۲۰	۸۶۰
Mass (kg)	۱۰/۲	۲/۱-۶۶	۹۵/۸	۳/۱	۰/۷-۱	۱/۶	۱۳/۹
Specific dissipated energy (kJ/kg)**	۴۲/۵	۱۰/۸	-	۲/۲	-	۳/۶	۲/۱

*N/A: Not Available, ** Dissipated energy to damper mass ratio

¹Dual-pipe damper, ²Triangular-plate added damping and stiffness,

³Slit damper, ⁴Single pipe damper, ⁵Shear-panel damper, ⁶Steel dual-ring dampers.

حافظه دار شکلی و با تکیه گاه های ساده در دو انتها که تحت تأثیر نیروی مکانیکی خارجی قرار دارد مورد مطالعه قرار گرفته است. با در نظر گرفتن خواص مکانیکی ارائه شده در مرجع [۳۹]، منحنی تنش- کرنش به دست آمده از مدل سازی تحقیق حاضر و نتایج مذکور در شکل (۱۱) نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده تطابق نتایج می باشد و

با توجه به اینکه تاکنون رفتار میراگر از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی مورد بررسی قرار نگرفته است، بنابراین به منظور صحت سنجی نتایج مدل المان محدود و کد UMAT ارائه شده، از نتایج مرجع [۳۹] استفاده می شود. در این مرجع تغییر شکل مکانیکی یک تیر با سطح مقطع مربعی به طول 100 mm و عرض 10 mm از جنس آلیاژهای

می‌آید که به ترتیب در حدود ۱۱۴٪ و ۸۱٪ بیشتر از میراگر فولادی متناظر می‌باشد.

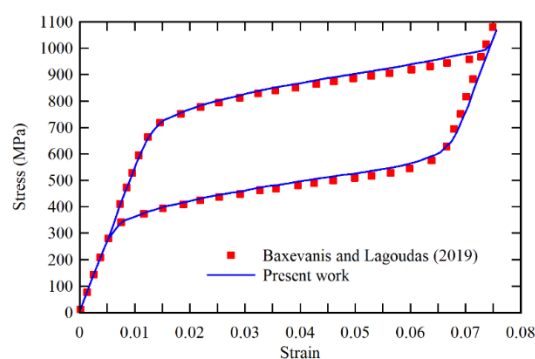
- میراگر جدید ارائه شده می‌تواند با رفتار شکل‌پذیر خود زمان کم‌انرژی مهربان را به تعویق بی‌اندازد تا میراگر بتواند بدون کم‌انرژی مقدار زیادی از انرژی ورودی زلزله را مستهلک نماید.

- انرژی اتلاف شده ناشی از جاری شدن و تغییر شکل پلاستیک توانایی بالای میراگرهای آگزتیک را در استهلاک انرژی نشان می‌دهد.

- مقایسه برخی از مشخصه‌های عملکردی میراگر ارائه شده با برخی از میراگرهای فلزی جاری شونده موجود نشان می‌دهد که میراگر آگزتیک ارائه شده در حالت کلی مشخصه‌های عملکردی بسیار مناسبی نسبت به بسیاری از میراگرهای فلزی جاری شونده موجود دارد. این نتایج بار دیگر امکان استفاده از میراگر آگزتیک پیشنهادی در سازه‌ها به عنوان مستهلک کننده انرژی را مورد تأیید قرار می‌دهند.

میراگر فلزی جاری شونده آگزتیک پیشنهادی دارای رفتاری مناسب بوده و نه تنها موجب کاهش پاسخ‌های سازه می‌گردند بلکه با جذب و استهلاک درصد بالایی از انرژی ورودی به سازه، شرایط ایمن و پایداری را نسبت به قاب‌های مشابه فراهم می‌کنند. بر این اساس، این میراگر می‌تواند به عنوان وسیله‌ای مفید برای کنترل غیرفعال سازه‌ها استفاده گردد و به علت ویژگی‌های بالای عملکردی می‌تواند جایگزین بسیاری از میراگرهای موجود گردد.

حداکثر خطای به دست آمده کمتر از ۳٪ می‌باشد.



شکل ۱۱ منحنی تنش-کرنش نقطه میانی تیر با تکیه‌گاه‌های ساده در دو انتها از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی NiTi

6- نتیجه‌گیری

به منظور افزایش ظرفیت اتلاف انرژی در ساختمان‌ها و کنترل خسارت در اعضای اصلی یک ساختمان، در تحقیق حاضر میراگر آگزتیک جدیدی معرفی شد که از ورق از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با حفره‌های بیضی شکل با توزیع مناسب و ساختار پواسون منفی ساخته می‌شود و هدف اصلی از آن افزایش عملکرد لرزه‌ای قاب، افزایش شکل‌پذیری، سختی و اتلاف انرژی بیشتر در قاب‌های فولادی می‌باشد. پس از انجام تحلیل‌های المان محدود غیرخطی، به مطالعه تأثیر پارامترهای هندسی میراگر بر رفتار مکانیکی آن پرداخته شد. خلاصه‌ای از نتایج تحقیق حاضر عبارت است از:

- در حالت بهینه انرژی جذب شده ویژه و شکل‌پذیری میراگر آگزتیک پیشنهادی از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی به ترتیب برابر $39/2$ J/kg و 44 به دست

مراجع

- [1] Mirzaei, E. and F Daneshjoo. "Introduction of a new elliptical damper for seismic energy dissipation of civil structures". Sharif Journal of Civil Engineering 37.2. no. 4.2 (2022): 39-50.
- [2] Xu, G. and J. Ou. "Seismic performance of combined rotational friction and flexural yielding metallic dampers". Journal of Building Engineering 132 (2022): 104059.
- [3] Li, H.-N., X. Fu, Y.-L. Li, and H.-J. Liu. "Mechanical model and structural control performance of a new rotation-magnified viscoelastic damper". Engineering Structures 252(2022): 113569.
- [4] Kim, Y.-C., S.J. Mortazavi, A. Farzampour, J.-W. Hu, I. Mansouri, and P.O. Awoyera. "Optimization of the Curved Metal Damper to Improve Structural Energy Dissipation Capacity". Buildings 12. no. 1 (2022): 67.
- [5] Downey, A., C. Theisen, H. Murphy, N. Anastasi, and S. Laflamme. "Cam-based passive variable friction device for structural control". Engineering Structures 188. (2019): 430-439.
- [6] Rezaee, M. and V. Arab Maleki. "Passive vibration control of fluid conveying pipes using dynamic vibration absorber". Amirkabir Journal of Mechanical Engineering 51. no. 3 (2019): 111-120.

- [7] Nasrabadi, M., A.V. Sevbitov, V.A. Maleki, N. Akbar, and I. Javanshir. "Passive fluid-induced vibration control of viscoelastic cylinder using nonlinear energy sink". *Marine Structures* 81. (2022): 103116.
- [8] Chen, Y., W. Yu, M. Zhang, and Y. Li. "A novel energy dissipation damper for multi-level earthquakes". *Journal of Constructional Steel Research* 192 (2022): 107214.
- [9] Wang, J., L. Guo, and W. Wang. "Experimental and theoretical analysis of novel shear-Flexural combined metallic damper". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 157 (2022): 107249.
- [10] Jia, Y.-Q., C. Wang, L.-Z. Li, R.-F. Zhang, and Z.-D. Lu. "Residual Seismic Performance of Fire-Damaged Reinforced Concrete Frame Structure with Metallic Yielding Dampers". *Journal of Structural Engineering* 148. no. 4 (2022): 04022003.
- [11] Chan, R.W. and F. Albermani. "Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation". *Engineering Structures* 30. no.2 (2008): 1058-1066.
- [12] Mohammadi, R.K., A. Nasri, and A. Ghaffary. "TADAS dampers in very large deformations". *International Journal of Steel Structures* 17. no. 2 (2017): 515-524.
- [13] Balendra, T., C.H. Yu, and F.L. Lee. "An economical structural system for wind and earthquake loads". *Engineering Structures* 23. no. 5 (2001): 491-501.
- [14] Maleki, S. and S. Mahjoubi. "Infilled-pipe damper". *Journal of Constructional Steel Research* 98 (2014): 45-58.
- [15] Guo, W., C. Ma, Y. Yu, D. Bu, and C. Zeng. "Performance and optimum design of replaceable steel strips in an innovative metallic damper". *Engineering Structures* 205 (2020): 110118.
- [16] Azandariani, M.G., A.G. Azandariani, and H. Abdolmaleki. "Cyclic behavior of an energy dissipation system with steel dual-ring dampers (SDRDs)". *Journal of Constructional Steel Research*, 2020. **172**: p. 106145.
- [17] Jiang, W., X. Ren, S.L. Wang, X.G. Zhang, X.Y. Zhang, C. Luo, Y.M. Xie, F. Scarpa, A. Alderson, and K.E. Evans. "Manufacturing, characteristics and applications of auxetic foams: a state-of-the-art review". *Composites Part B: Engineering*. (2022): 109733.
- [18] Behravanrad, A. and M. Jafari. "Thermoporoelasticity analysis of variable thickness and elastically restrained functionally graded auxetic metamaterial circular plate resting on an auxetic material circular plate". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 235. no. 16. (2020): 3036-3057.
- [19] Altas, E., F. Khosravi, H. Gokkaya, V.A. Maleki, Y. Akinay, O. Ozdemir, O. Bayraktar, and H. Kandas. "Finite element simulation and experimental investigation on the effect of temperature on pseudoelastic behavior of perforated Ni-Ti shape memory alloy strips". *Smart Materials and Structures* 31. no. 2 (2022): 025031.
- [20] Gao, Q., Z. Ding, and W.-H. Liao. "Effective elastic properties of irregular auxetic structures". *Composite Structures* 287 (2022): 115269.
- [21] Zhang, Y., L. Sun, X. Ren, X.Y. Zhang, Z. Tao, and Y.M. Xie. "Design and analysis of an auxetic metamaterial with tuneable stiffness". *Composite Structures* 281 (2022): 114997.
- [22] Lakes, R., *Foam structures with a negative Poisson's ratio*. *Science* 235 (1987): 1038-1041.
- [23] Shukla, S. and B. Behera. "Auxetic Fibrous Structures and their Composites: A Review". *Composite Structures*. (2022): 115530.
- [24] Ren, X., J. Shen, A. Ghaedizadeh, H. Tian, and Y.M. Xie, "A simple auxetic tubular structure with tuneable mechanical properties". *Smart Materials and Structures* 25. no. 6. (2016): 065012.
- [25] Zhang, J., G. Lu, and Z. You. "Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: A review". *Composites Part B: Engineering* 201 (2020): 108340.
- [26] Meena, K. and S. Singamneni. "A new auxetic structure with significantly reduced stress concentration effects". *Materials & Design* 173 (2019): 107779.
- [27] Guo, Y., J. Zhang, L. Chen, B. Du, H. Liu, L. Chen, W. Li, and Y. Liu, "Deformation behaviors and energy absorption of auxetic lattice cylindrical structures under axial crushing load". *Aerospace Science and Technology* 98 (2020): 105662.
- [28] Hassanin, H., A. Abena, M.A. Elsayed, and K. Essa. "4D printing of NiTi auxetic structure with improved ballistic performance". *Micromachines* 11. no. 8 (2020): 745.

- [29] Jafari Nedoushan, R. "Improvement of energy absorption of expanded metal tubular structures under compressive loads". *Thin-Walled Structures* 157 (2020): 107058.
- [30] Shahverdi Moghaddam, H., S.R. Keshavanarayana, C. Yang, and A.L. Horner. "Anisotropic hyperelastic constitutive modeling of in-plane finite deformation responses of commercial composite hexagonal honeycombs". *Journal of Sandwich Structures & Materials* 24. no.1 (2022): 5-34.
- [31] Wang, W., J. Wang, H. Hai, W. Xu, and X. Yu. "Study of in-plane mechanical properties of novel ellipse-based chiral honeycomb structure". *Applied Sciences* 12. no. 20 (2022): 10437.
- [32] Xu, H.H., H.C. Luo, X.G. Zhang, W. Jiang, X.C. Teng, W.Q. Chen, J. Yang, Y.M. Xie, and X. Ren. "Mechanical properties of aluminum foam filled re-entrant honeycomb with uniform and gradient designs". *International Journal of Mechanical Sciences* 244 (2023): 108075.
- [33] Zhang, C., Y. Zhu, F. Lu, J. Wu, and Z. Wu. "On the effective elastic constants of anti-tetra chiral tubular structure". *Engineering Structures* 278 (2023): 115507.
- [34] Namvar, N., I. Moloukzadeh, A. Zolfagharian, F. Demoly, and M. Bodaghi. "Bio-inspired design, modeling, and 3D printing of lattice-based scale model scooter decks". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 126. no. 7-8 (2023): 2887-2903.
- [35] Dong, D.T., N.T. Phuong, V.H. Nam, L.N. Ly, N.V. Tien, V.M. Duc, T.Q. Minh, V.T. Hung, and N.T.H. Giang. "An analytical approach for nonlinear buckling analysis of torsionally loaded sandwich carbon nanotube reinforced cylindrical shells with auxetic Core". *Adv. Appl. Math. Mech* 15 (2023): 468-484.
- [36] Hamrouni, A., J.-L. Rebiere, A. El Mahi, M. Beyaoui, and M. Haddar. "Experimental and finite element analyses of a 3D printed sandwich with an auxetic or non-auxetic core". *Journal of Sandwich Structures & Materials* 25. no. 4 (2023): 426-444.
- [37] Qi, C., L.-Z. Pei, A. Remennikov, S. Yang, and F. Jiang. "Numerical and theoretical analysis of crushing strength of 3D re-entrant honeycomb". *Thin-Walled Structures* 182 (2023): 110140.
- [38] Francisco, M.B., J.L.J. Pereira, G.A. Oliver, L.R. Roque da Silva, S.S. Cunha Jr, and G.F. Gomes. "A review on the energy absorption response and structural applications of auxetic structures". *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 29. no. 27 (2022): 5823-5842.
- [39] Yin, H., W. Zhang, L. Zhu, F. Meng, J. Liu, and G. Wen. "Review on lattice structures for energy absorption properties". *Composite Structures* 304 (2023): 116397.
- [40] Gomes, R.A., L.A. de Oliveira, M.B. Francisco, and G.F. Gomes. "Tubular auxetic structures: A review". *Thin-Walled Structures* 188 (2023): 110850.
- [41] Li, L., F. Yang, S. Zhang, Z. Guo, L. Wang, X. Ren, and M. Zhao. "A novel hybrid auxetic honeycomb with enhanced load-bearing and energy absorption properties". *Engineering Structures* 289 (2023): 116335.
- [42] Zhang, W., H. Yin, Y. Wu, Q. Jin, L. Wu, G. Wen, J. Liu, and X. Wu. "A Novel Auxetic 3D Lattice Structure for Enhancing Energy Absorption". *Composite Structures* (2023): 117620.
- [43] Brinson, L. and R. Lammering. "Finite element analysis of the behavior of shape memory alloys and their applications". *International Journal of solids and structures* 30 . no. 23 (1993): 3261-3280.
- [44] Brinson, L.C. "One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable". *Journal of intelligent material systems and structures* 4 . no. 2 (1993): 229-242.
- [45] Barbarino, S., E.S. Flores, R.M. Ajaj, I. Dayyani, and M.I. Friswell. "A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft". *Smart materials and structures* 23. no. 6 (2014): 063001.
- [46] Rezaee, M., H. Javadian, and V. A Maleki. "Investigation of Vibration Behavior and Crack Detection of a Cracked Short Cantilever Beam under the Axial Load". *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 47. No. 2 (2016): 1-12.
- [47] Esmaeili, J., K. Andalibi, O. Gencel, F.K. Maleki, and V.A. Maleki. "Pull-out and bond-slip performance of steel fibers with various ends shapes embedded in polymer-modified concrete". *Construction and Building Materials* 271 (2021): 121531.
- [48] Toygar, M.E., O. Sayman, U. Kemiklioglu, H. Öztürk, Z. Kırıl, and F.K. Maleki. "Vibration and buckling analysis of a curved sandwich composite beam with FEM". *Res Eng Struct Mater* 2 (2016): 49-59.

- [49] Maleki, V.A. and N. Mohammadi. "Buckling analysis of cracked functionally graded material column with piezoelectric patches". *Smart Materials and Structures* 26. no. 3 (2017): 035031.
- [50] Toygar, M.E., K.F. Tee, F.K. Maleki, and A.C. Balaban. "Experimental, analytical and numerical study of mechanical properties and fracture energy for composite sandwich beams". *Journal of Sandwich Structures & Materials* 21. no.3 (2019): 1167-1189.
- [51] Vahidi Pashaki, P., M. Pouya, and V.A. Maleki. "High-speed cryogenic machining of the carbon nanotube reinforced nanocomposites: Finite element analysis and simulation". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C :Journal of Mechanical Engineering Science* 232. no. 11 (2018): 1927-1936.
- [52] Ghaderi, M., V.A. Maleki, and K. Andalibi. "Retrofitting of unreinforced masonry walls under blast loading by FRP and spray on polyurea". *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi* 36. no.4 (2015): 462-477.
- [53] Mehrabi, R., M. Dorri, and M. Elahinia. "Finite element simulation of NiTi umbrella-shaped implant used on femoral head under different loadings". *Bioengineering* 4. no. 1 (2017): 23.
- [54] Maleki, S. and S. Mahjoubi. "Dual-pipe damper". *Journal of Constructional Steel Research* 85 (2013): 81-91.
- [55] Tsai, K.-C., H.-W. Chen, C.-P. Hong, and Y.-F. Su. "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction". *Earthquake spectra* 9. no.3 (1993): 505-528.
- [56] Maleki, S. and S. Bagheri, "Pipe damper, Part I: Experimental and analytical study". *Journal of Constructional Steel Research* 66. no.8-9 (2010): 1088-1095.
- [57] Li, Z., F. Albermani, R.W. Chan, and S. Kitipornchai. "Pinching hysteretic response of yielding shear panel device". *Engineering structures* 33. no.3 (2011): 993-100.