

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

میلاذ مسعودی<sup>۱</sup>، احمد گنجعلی<sup>۲\*</sup>، حمیدرضا ایرانی<sup>۲</sup>، ابوذر میرزاخانی<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله:	در پژوهش حاضر، یک میراگر فلزی جاری شونده جدید از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی
پذیرش مقاله:	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 تغییرشکل 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 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 $2/39$ 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.
واژگان کلیدی:	
میراگر جاری شونده آگزتیک، آلیاژ حافظه‌دار شکلی، استهلاک انرژی، شکل‌پذیری، المان محدود غیرخطی.	

## ۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای کاهش نیروهای وارد بر سازه گسترش یافته است [۱]. روش‌های مختلف کنترل لرزه‌ای سازه‌ها عموماً با افزودن اعضای جدید به سازه به منظور اتلاف انرژی ورودی به سازه در اثر زلزله و یا بارگذاری‌های دینامیکی همراه هستند. از جمله این اعضا می‌توان به میراگرهای فلزی اشاره نمود که اتلاف انرژی در آنها به صورت تغییر شکل‌های پلاستیک انجام می‌شود. با 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 لرزه‌ای سازه‌های مختلف استفاده می‌شوند [۵-۷]. در بین میراگرهای کنترل غیرفعال که برای کنترل و کاهش 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

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ahmad.ganjali@iau-shahrood.ac.ir

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

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

افزایش استهلاک انرژی ورودی می‌شود. علاوه بر این، این میراگرها باعث افزایش سختی نیز می‌شوند. چان و آلبرمانی [۱۱] عملکرد لرزه‌ای میراگرهای شیاردار فولادی<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> به صورت سری را ارائه کردند. ملکی و محبوب [۱۴] با استفاده دو لوله جوش داده شده میراگر جدیدی را به منظور بهبود جذب انرژی ارائه دادند. گیو و همکاران [۱۵] با استفاده نوارهای فولادی<sup>۳</sup> 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<sup>۴</sup> 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 شده‌اند [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

<sup>1</sup> Steel Slit Dampers

<sup>2</sup> Slotted Bolted Connection

<sup>3</sup> Strips

<sup>4</sup> Auxetic

در مدل برینسون، درصد حجمی مارتنزیت که وابسته به مارتنزیت حاصل از تنش ( $\xi_s$ ) و مارتنزیت حاصل از دما ( $\xi_T$ ) 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.  $C_A$  و  $C_M$  نشان دهنده ثوابت ماده وابسته به تنش تغییرات فاز می‌باشند.  $\sigma_f^{cr}$  و  $\sigma_s^{cr}$  تنش‌های شروع و اتمام فاز مارتنزیت هستند. بر اساس مدل برینسون، روابط حاکم بر تبدیلات فازی به صورت زیر می‌باشند [۳۱]:

#### (الف) آستنیت به مارتنزیت

$$T > M_s,$$

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

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

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

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

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

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

#### (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

روی مشخصه‌های جذب انرژی آنها را به صورت تجربی و المان محدود مطالعه کرد. نتایج مطالعه آنها نشان داد که استفاده از ساختار با ضریب پواسون منفی با اندازه سلول‌های کوچک پایداری محوری بیشتری دارند.

بررسی تحقیقات انجام شده 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 اگزتیک 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 اگزتیک جدیدی ارائه شده است که به راحتی قابل ساخت با استفاده از ورق‌های فلزی می‌باشد. در ادامه تأثیر پارامترهای 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 [۳۰]. بر اساس مدل برینسون، معادلات ساختاری با استفاده از روابط زیر به دست می‌آیند:

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

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

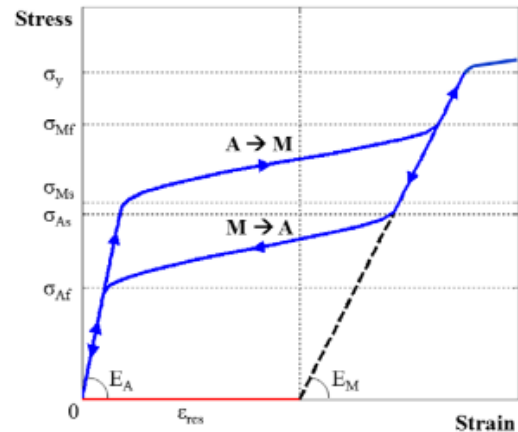
$$\Omega = -\varepsilon_L D \quad (3)$$

که در آن  $\sigma$  تانسور تنش،  $\varepsilon$  تانسور کرنش،  $\xi_c$  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.  $\Omega$  تانسور انتقال و  $\varepsilon_L$  حداکثر کرنش بازیابی آلیاژ می‌باشد. با انتگرال‌گیری از رابطه (۱) از حالت‌های ابتدایی تا انتهای، رابطه زیر به دست می‌آید [۳۱]:

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

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

به حل معادلات تعادل و محاسبه تغییر شکل‌های سازه می‌کند.



شکل ۱ منحنی تنش-کرنش ماده SMA [۳۲]

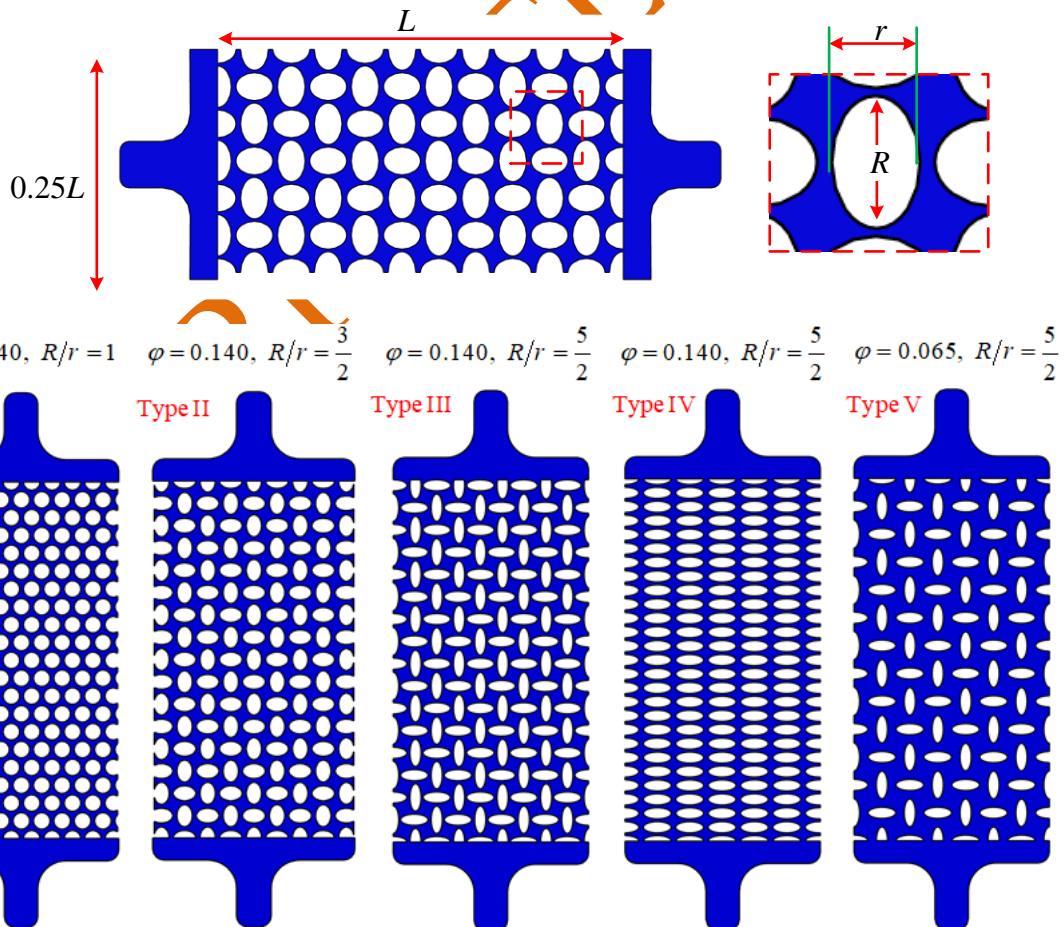
### ۳- میراگر فلزی جاری شونده اگزتیک

مطابق شکل ۲ میراگر فلزی جاری شونده اگزتیک ارائه شده از سه بخش اصلی تشکیل شده است که عبارت‌اند از: ورق پایه از جنس آلایزهای حافظه‌دار شکلی، سوراخ‌های بیضوی شکل و اتصال دهنده‌های کناری. مطابق شکل ورق

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- مدل‌سازی المان محدود غیرخطی

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.



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

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 [۳۳]

مشخصات مکانیکی	مقدار
$E_m$	۶۷ GPa
$E_a$	۲۶/۳ GPa
$\sigma_{scr}$	۱۷۰ MPa
$\sigma_{fcr}$	۱۰۰ MPa
$\varepsilon_L$	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

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  $A = \pi rR$  مساحت سوراخ‌های بیضوی شکل می‌باشد. بنابراین، چگالی معادل میراگر با ساختار اگزتیک را می‌توان به صورت زیر نوشت:

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

که در آن  $\rho^*$  چگالی معادل ساختار اگزتیک بوده و  $\rho_s$  چگالی ورق فولادی می‌باشد.

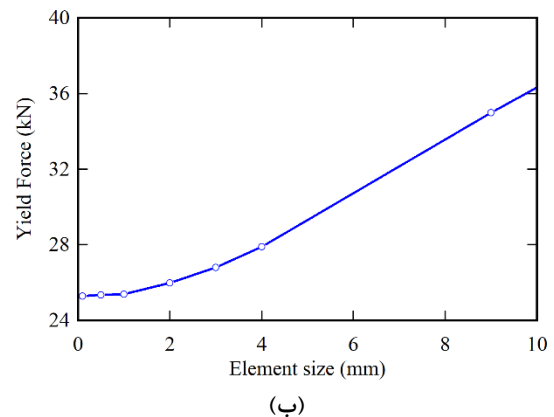
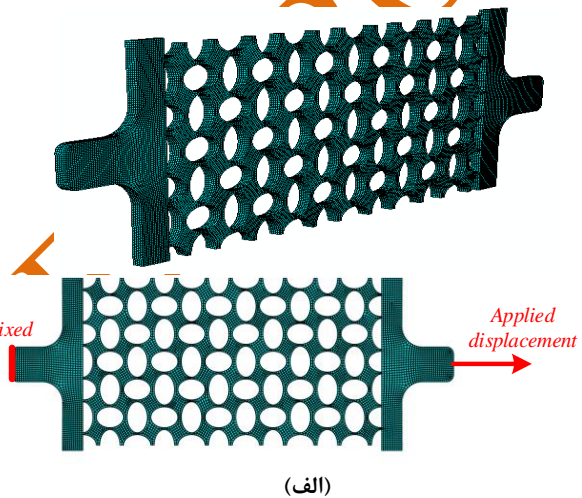
انرژی کل جذب شده ( $E$ ) مجموع انرژی جذب شده توسط سازه در حین تغییر شکل تا حالت نهایی تغییر شکل می‌باشد که می‌توان از انتگرال‌گیری منحنی نیرو-جابجایی به دست آورد:

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

که در آن  $\delta$  جابجایی سازه می‌باشد.

در این تحقیق، به منظور مقایسه راندمان جذب انرژی سازه‌ها با چگالی‌های مختلف از مفهوم انرژی جذب شده ویژه<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. انرژی جذب شده ویژه (SEA) به صورت انرژی جذب شده توسط جرم واحد سازه تعریف

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 ۰/۱ سانتی‌متر می‌باشد که معادل حدود ۸۶۵۰۰ المان می‌باشد. در شکل ۳ ب نتایج استقلال از شبکه شامل منحنی نیروی تسلیم برحسب تعداد المان برای نمونه Type I آورده شده است.



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 Contact" و رفتار مماسی "Penalty" با ضریب اصطکاک ۰/۱ برای تعریف اندرکنش بین سطوح مختلف میراگر استفاده شده است. رفتار سوپراستیک آلیاژهای

<sup>1</sup> Specific Energy Absorption

می‌شود که نسبت انرژی جذب شده کل به جرم سازه،  $W$ ، می‌باشد، یعنی:

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

## ۵- بررسی نتایج

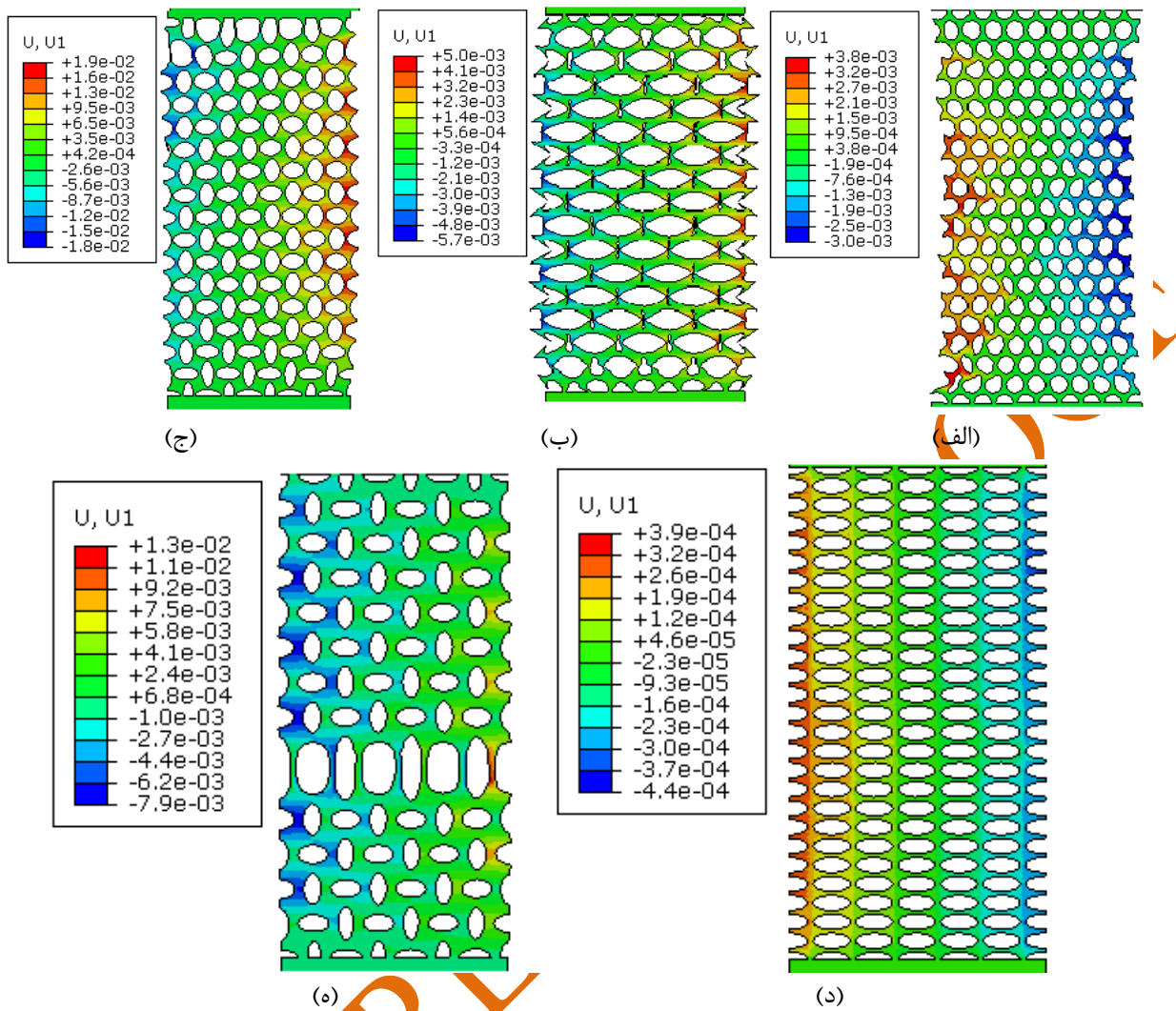
در این قسمت به بررسی نتایج تحلیل‌های المان محدود انجام پذیرفته بر روی میراگر جاری شونده آگزتیک پیشنهادی پرداخته می‌شود. بدین منظور، در ابتدا به مطالعه تأثیر پارامترهای هندسی مختلف شامل نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک سوراخ‌های بیضوی شکل،  $R/r$ ، کسر حجمی سوراخ‌ها،  $\phi$ ، و طول میراگر،  $L$ ، بر عملکرد میراگر پیشنهادی پرداخته می‌شود. سختی اولیه ( $K_0$ )، جابجایی تسلیم ( $\Delta_y$ )، 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 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 ۵/۳ درصد و ۰/۸۷ درصد به دست می‌آید. همچنین، افزایش طول ناحیه مرکزی برای نمونه‌های II، III و V که رفتار آگزتیک دارند به ترتیب برابر ۳/۴ درصد، ۴/۱ درصد و ۱/۴ 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

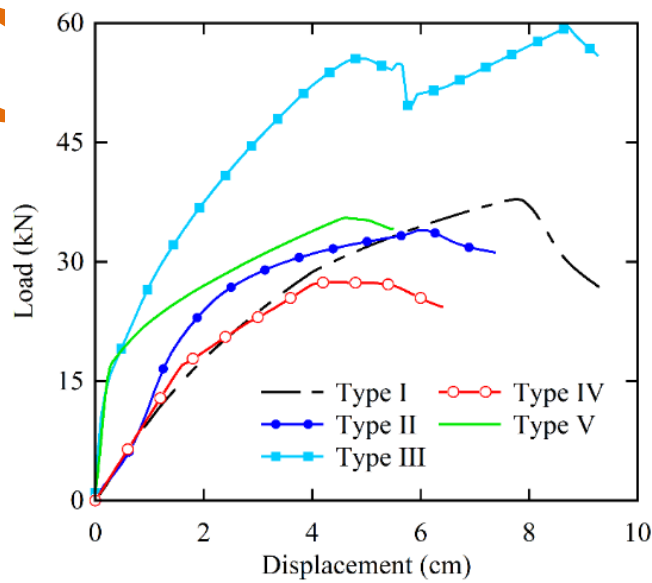
نحوه توزیع حفره‌ها می‌تواند رفتار سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ساختار III که در آن حفره‌های بیضوی شکل به صورت افقی و عمودی در صفحه فولادی قرار گرفته‌اند دارای رفتار آگزتیک بوده و نسبت به ساختار IV که رفتار پواسون مثبت دارد تغییر شکل‌های زیاد و در نتیجه جذب انرژی بالایی خواهد داشت.

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 سوپراستیک و سخت‌شوندگی 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 15.2 kN، 18.1 kN، 24.6 kN، 17.6 kN و 17.1 kN به دست می‌آید. بنابراین، می‌توان بیان نمود که در بین نمونه‌های مختلف تحت بررسی، نمونه آگزتیک III دارای بیشترین نیروی تسلیم بوده و قابلیت مناسبی جهت استفاده به عنوان میراگر خواهد داشت.

همچنین، 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 آگزتیک III توانایی بالایی را در استهلاک انرژی دارد. این منحنی به وضوح نشان می‌دهد که سازه‌های دارای ساختار آگزتیک قابلیت بالایی در اتلاف انرژی دارند. علاوه بر این، برای این نمونه همانطور که مشاهده می‌شود به ازای جابجایی‌های بیشتر از 1.5 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 آگزتیک است.

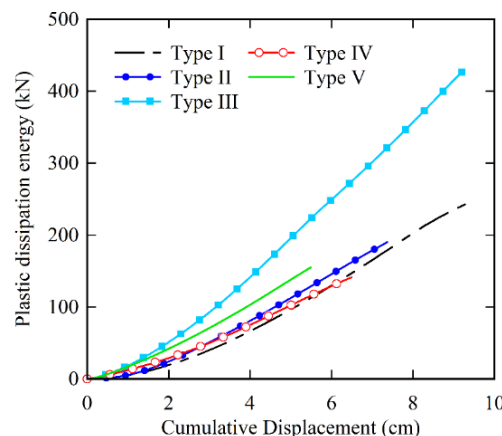


شکل ۴ مکانیزم تغییر شکل (m) تعدادی از نمونه‌های مختلف میراگر فلزی ارائه شده  
 (الف) Type I، (ب) Type II، (ج) Type III، (د) Type IV و (ه) Type V



شکل ۵ منحنی نیرو-جابجایی برای 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 و پهنای منحنی 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  $\Phi$  برابر ۱۵ درصد، پارامتر جذب انرژی ویژه در نمونه‌های میراگر I و III به ترتیب برابر  $10/3 \text{ J/kg}$  و  $39/2 \text{ J/kg}$  به دست می‌آید. بر این اساس، به ازای کسر حجمی یکسان حفره‌ها، ساختار آگزتیک می‌تواند باعث بهبود ۱۱۶ درصدی قابلیت انرژی ویژه این نوع میراگرها می‌شود.



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

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 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  $19/3 \text{ J/kg}$  و ۴۴ به دست می‌آید. بنابراین، این عضو می‌تواند با رفتار شکل‌پذیر خود مقدار زیادی از انرژی ورودی زلزله را مستهلک نماید.

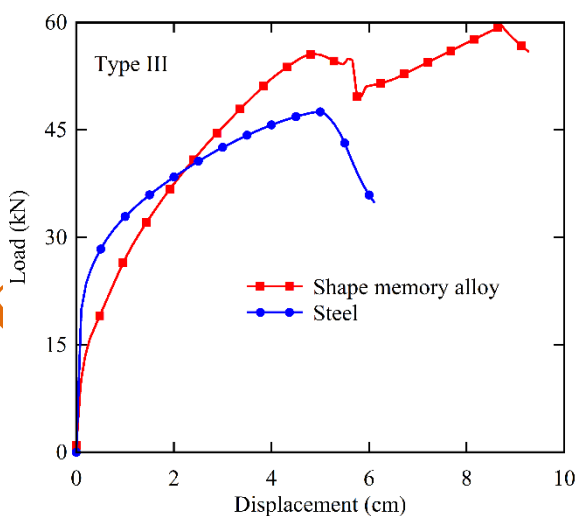
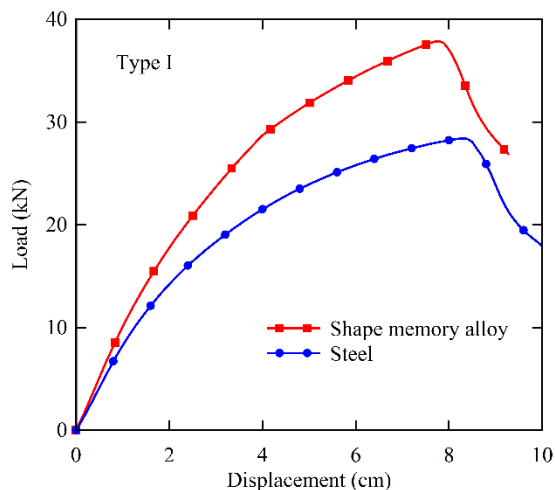
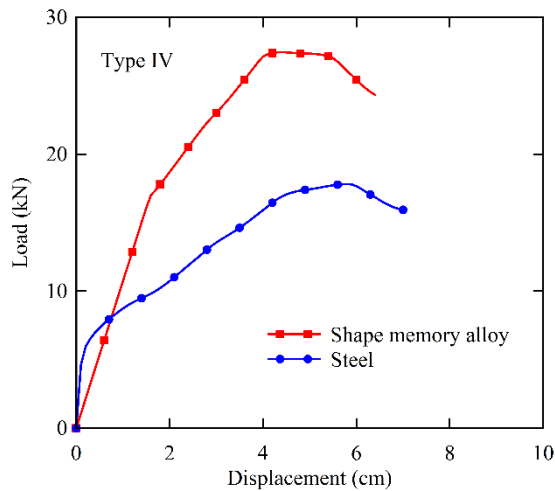
جدول ۲ پارامترهای سختی اولیه، جابجایی تسلیم، نیروی تسلیم، حداکثر شکل‌پذیری، حداکثر ظرفیت و انرژی استهلاک شده نمونه‌های

میراگر تحت بررسی

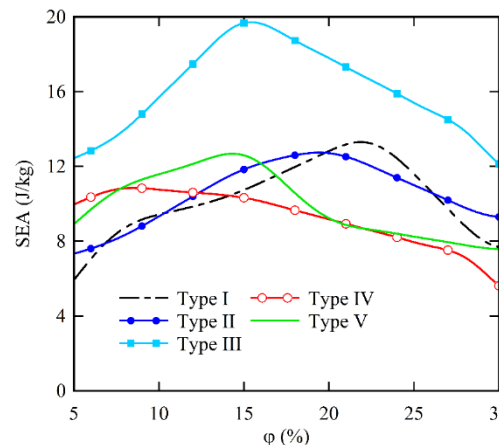
	Mass (kg)	$K_0$ (kN/cm)	$P_y$ (kN)	$\Delta_y$ (mm)	$P_u$ (kN)	$\Delta_{max}$ (cm)	$\mu$	SEA (J/kg)
Type I	۹/۳۹	۹/۴۱	۲۴/۶	۳/۳	۳۷/۸	۷/۸	۲/۳۶	۱۰/۳
Type II	۹/۳۵	۱۰/۱۲	۱۸/۱	۱/۶	۳۳/۲	۶/۱	۴/۳۵	۱۲/۱
Type III	۱۰/۱۵	۹۹/۶۷	۱۵/۲	۰/۲	۵۶/۵	۸/۸	۴۴/۰	۳۹/۲
Type IV	۹/۴۶	۹۹/۳۸	۱۷/۶	۱/۲	۲۷/۷	۴/۳	۲/۶۵	۱۰/۷
Type V	۱۲/۷۹	۵۹/۳۰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



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

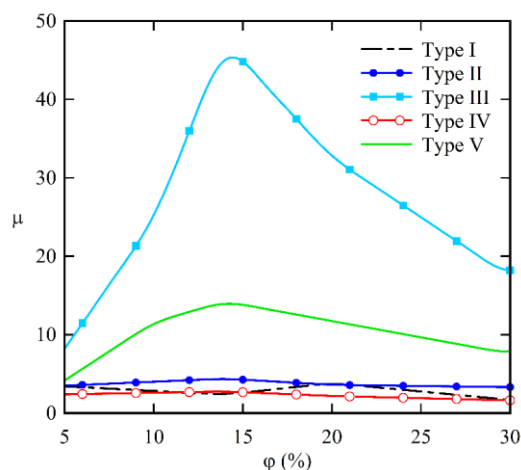


شکل ۹ مقایسه منحنی نیرو-جابجایی سه نمونه میراگر I، III و IV از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی و فولاد



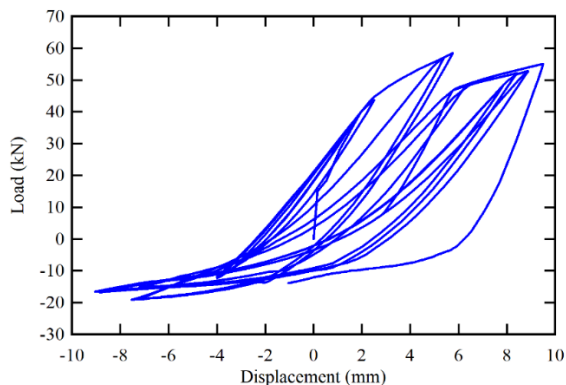
شکل ۷ تأثیر کسر حجمی حفره‌ها بر انرژی جذب شده ویژه پنج نمونه میراگر مختلف تحت بررسی

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  $\phi$  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

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



شکل ۱۰ منحنی هیستریزس نیرو-جابجایی این نمونه به ازای جابجایی چرخه‌ای اعمالی مطابق با پروتکل ECCS [۳۴]

در جدول ۲ برخی از مشخصه‌های مکانیکی میراگر آگزتیک نمونه III مانند حداکثر جابجایی، شکل پذیری، انرژی کل جذب شده، جرم میراگر با مشخصه‌های تعدادی از میراگرهای فلزی ارائه شده در تحقیقات پیشین مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میراگر آگزتیک ارائه شده در حالت کلی مشخصه‌های عملکردی بسیار مناسبی نسبت به بسیاری از میراگرهای فلزی جاری شونده موجود دارد. یکی دیگر از مزیت‌های میراگر جدید ارائه شده شکل پذیری بالای آن می‌باشد که در حدود ۴۵ بوده و از شکل پذیری بسیاری از میراگرهای فلزی بیشتر می‌باشد. همچنین، میراگر مورد مطالعه از جذب انرژی بالایی برخوردار است و می‌تواند به راحتی جایگزین سایر میراگرهای فلزی جاری شونده از جمله ADAS و TADAS شود.

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 از خود نشان می‌دهد.

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

Parameter	Metal yield damper type						
	Auxetic damper (Type III)	DPD <sup>1</sup> [34]	TADAS <sup>2</sup> [35]	SD <sup>3</sup> [11]	SPD <sup>4</sup> [36]	ShPD <sup>5</sup> [37]	SDRDs <sup>6</sup> [16]
Construction cost	Low	Very low	High	Low	Very low	Low	high
Ductility	۴۴/۵	Up to ۳۶	۲۹	۱۲	N/A	۱۴-۲۰	۶/۷-۱۳/۳
Total dissipated energy (kJ)	۴۳۳	۲۲/۷-۴۹/۲	N/A*	۶/۹-۱۰/۳	N/A	۵/۸-۶/۵	۲۸-۱۵۸
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

\*N/A: Not Available,

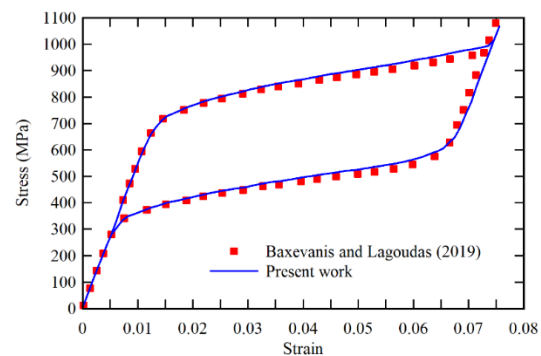
<sup>1</sup>Dual-pipe damper, <sup>2</sup>Triangular-plate added damping and stiffness,

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

منظور صحت‌سنجی نتایج مدل المان محدود و کد UMAT ارائه شده، از نتایج مرجع [۳۹] استفاده می‌شود. در این

با توجه به اینکه تاکنون رفتار میراگر از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی مورد بررسی قرار نگرفته است، بنابراین به

مرجع تغییر شکل مکانیکی یک تیر با سطح مقطع مربعی به طول 100 mm و عرض 10 mm از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی و با تکیه‌گاه‌های 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 مدل‌سازی تحقیق حاضر و نتایج مذکور در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده تطابق نتایج می‌باشد و 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

## ۶- 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 مختلف بر رفتار این نوع میراگرها پرداخته شد. خلاصه‌ای از نتایج تحقیق حاضر عبارت است از:

## مراجع

- 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 ۴۴ به دست 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 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.

- [1] Jafari, A., Dashti, H., Fiouz, A., (2022) The effect of the friction pendulum isolation system on the seismic response of structures located on different types of soils. *Journal of Modeling in Engineering*, 20(68): 1-14.
- [2] Ghalehnavi, M., Karimipour, A., Azad darmian, J. (2019). Study of the effect of friction rotational damper, viscoelastic and TADAS on the structures seismic behaviour. *Journal of Modeling in Engineering*, 17(59), 87-107.
- [3] kordi, F., Alamatian, J. (2017). the TMD design based on complex stiffness theory. *Journal of Modeling in Engineering*, 15(51), 171-180.
- [4] Mohebbi, M., Shabani, H. (2017). Optimal Design of Active Multiple Tuned Mass Dampers (AMTMDs) For Nonlinear Hysteretic Structures. *Journal of Modeling in Engineering*, 15(48), 151-163.

- [5] Downey, A., Theisen, C., Murphy, H., Anastasi, N., Laflamme, S., (2019). Cam-based passive variable friction device for structural control. *Engineering Structures*. 188, 430-439.
- [6] Rezaee, M., Arab Maleki, V., (2019). Passive vibration control of fluid conveying pipes using dynamic vibration absorber. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 51 (3), 111-120.
- [7] Nasrabadi, M., Sevbitov, A. V., Maleki, V. A., Akbar, N., Javanshir, I., (2022). Passive fluid-induced vibration control of viscoelastic cylinder using nonlinear energy sink. *Marine Structures*. 81, 34-49.
- [8] Chen, Y., Yu, W., Zhang, M., Li, Y., (2022). A novel energy dissipation damper for multi-level earthquakes. *Journal of Constructional Steel Research*. 192, 107214.
- [9] Wang, J., Guo, L., Wang, W., (2022). Experimental and theoretical analysis of novel shear-Flexural combined metallic damper. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 157, 107249.
- [10] Jia, Y.-Q., Wang, C., Li, L.-Z., Zhang, R.-F., Lu, Z.-D., (2022). Residual Seismic Performance of Fire-Damaged Reinforced Concrete Frame Structure with Metallic Yielding Dampers. *Journal of Structural Engineering*. 148 (4), 45-60.
- [11] Chan, R. W., Albermani, F., (2008). Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Engineering Structures*. 30 (4), 1058-1066.
- [12] Mohammadi, R. K., Nasri, A., Ghaffary, A., (2017). TADAS dampers in very large deformations. *International Journal of Steel Structures*. 17 (2), 515-524.
- [13] Balendra, T., Yu, C. H., Lee, F. L., (2001). An economical structural system for wind and earthquake loads. *Engineering Structures*. 23 (5), 491-501.
- [14] Maleki, S., Mahjoubi, S., (2014). Infilled-pipe damper. *Journal of Constructional Steel Research*. 98 45-58.
- [15] Guo, W., Ma, C., Yu, Y., Bu, D., Zeng, C., (2020). Performance and optimum design of replaceable steel strips in an innovative metallic damper. *Engineering Structures*. 205, 11-23.
- [16] Azandariani, M. G., Azandariani, A. G., Abdolmaleki, H. (2022). Cyclic behavior of an energy dissipation system with steel dual-ring dampers (SDRDs). *Journal of Constructional Steel Research*. 172, 106-125.
- [17] Jiang, W., Ren, X., Wang, S. L., Zhang, X. G., Zhang, X. Y., Luo, C., Xie, Y. M., Scarpa, F., Alderson, A., Evans, K. E., (2022). Manufacturing, characteristics and applications of auxetic foams: a state-of-the-art review. *Composites Part B: Engineering*. 124(3), 109-133.
- [18] Behravanrad, A., Jafari, M., (2020). 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 (16), 3036-3057.
- [19] Altas, E., Khosravi, F., Gokkaya, H., Maleki, V. A., Akinay, Y., Ozdemir, O., Bayraktar, O., Kandas, H., (2022). 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 (2), 025031.
- [20] Gao, Q., Ding, Z., Liao, W.-H., (2022). Effective elastic properties of irregular auxetic structures. *Composite Structures*. 287, 115-129.
- [21] Zhang, Y., Sun, L., Ren, X., Zhang, X. Y., Tao, Z., Xie, Y. M., (2022). Design and analysis of an auxetic metamaterial with tuneable stiffness. *Composite Structures*. 281, 114-127.
- [22] Lakes, R., (1987). Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*. 235, 1038-1041.
- [23] Shukla, S., Behera, B., (2022). Auxetic Fibrous Structures and their Composites: A Review. *Composite Structures*. 123, 115-130.
- [24] Ren, X., Shen, J., Ghaedizadeh, A., Tian, H., Xie, Y. M., (2016). A simple auxetic tubular structure with tuneable mechanical properties. *Smart Materials and Structures*. 25 (6), 65-82.
- [25] Zhang, J., Lu, G., You, Z., (2020). Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: A review. *Composites Part B: Engineering*. 123, 34-45.
- [26] Meena, K., Singamneni, S., (2019). A new auxetic structure with significantly reduced stress concentration effects. *Materials & Design*. 173, 107-119.
- [27] Guo, Y., Zhang, J., Chen, L., Du, B., Liu, H., Chen, L., Li, W., Liu, Y., (2020). Deformation behaviors and energy absorption of auxetic lattice cylindrical structures under axial crushing load. *Aerospace Science and Technology*. 98, 105-122.
- [28] Hassanin, H., Abena, A., Elsayed, M. A., Essa, K., (2020). 4D printing of NiTi auxetic structure with improved ballistic performance. *Micromachines*. 11 (8), 745-763.
- [29] Jafari Nedoushan, R., (2020). Improvement of energy absorption of expanded metal tubular structures under compressive loads. *Thin-Walled Structures*. 157, 107-118.
- [30] Brinson, L., Lammering, R., (1993). Finite element analysis of the behavior of shape memory alloys and their applications. *International Journal of Solids and Structures*. 30 (23), 3261-3280.
- [31] Brinson, L. C., (1993). 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 (2), 229-242.

- [32] Barbarino, S., Flores, E. S., Ajaj, R. M., Dayyani, I., Friswell, M. I., (2014). A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft. *Smart materials and structures*. 23 (6), 63-79.
- [33] Mehrabi, R., Dorri, M., Elahinia, M., (2017). Finite element simulation of NiTi umbrella-shaped implant used on femoral head under different loadings. *Bioengineering*. 4 (1), 23-39.
- [34] Maleki, S., Mahjoubi, S., (2013). Dual-pipe damper. *Journal of Constructional Steel Research*. 85 81-91.
- [35] Tsai, K.-C., Chen, H.-W., Hong, C.-P., Su, Y.-F. (1993). Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. *Earthquake spectra*. 9 (3), 505-528.
- [36] Maleki, S., Bagheri, S., (2010). Pipe damper, Part I: Experimental and analytical study. *Journal of Constructional Steel Research*. 66 (8-9), 1088-1095.
- [37] Li, Z., Albermani, F., Chan, R. W., Kitipornchai, S., (2011). Pinching hysteretic response of yielding shear panel device. *Engineering structures*. 33 (3), 993-1000.
- [38] ECCS (1986). Recommended Testing Procedure for Assessing the Behaviour of Structural Steel Elements under Cyclic Loads; European Convention for Constructional Steelwork: Brussels, Belgium, 1986.
- [39] Xu, L., Baxevanis, T., Lagoudas, D. C. (2019). A three-dimensional constitutive model for the martensitic transformation in polycrystalline shape memory alloys under large deformation. *Smart Materials and Structures*, 28(7), 074004.

UNCORRECTED PROOF

# Energy absorption of auxetic metallic yield damper made of shape memory alloys

Milad Masoudi<sup>1</sup>, Ahmad Ganjali<sup>2\*</sup>, Hamidreza Irani<sup>2</sup>, Aboozar Mirzakhani<sup>2</sup>

1- PhD Student, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University Shahrood Branch, Shahrood, Iran.

2- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University Shahrood Branch, Shahrood, Iran

---

## 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.*

---

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

---

\*Corresponding author: Ahmad Ganjali.  
Email address: ahmad.ganjali@iau-shahrood.ac.ir

## ARTICLE INFO

Received: --/--/----

Accepted: --/--/----

---

### Keywords:

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