

## مطالعه استهلاك انرژی در لوله‌های جدار نازک آکاردئونی تحت نیروی محوری رفت و برگشتی

مه‌رتاش معتمدی\*، فریبرز ناطقی الهی\*\*، منصور ضیایی فر\*\*\* و محمد کریمی\*\*\*\*  
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران  
پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

(دریافت مقاله: ۸۳/۸/۱ - دریافت نسخه نهایی: ۸۵/۲/۵)

**چکیده** - استفاده از سیستم‌های جاذب انرژی از جمله میراگرهای فلزی برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها در برابر زلزله در چند دهه گذشته توسعه فراوانی یافته است. مطالعات بسیاری نیز بر روی جذب انرژی لوله‌های جدار نازک در برابر ضربه صورت گرفته است. لوله‌های جدار نازک ظرفیت تغییر شکل پذیری محوری زیادی دارند و در صورت بروز مد مناسبی برای کمانش غیرالاستیک، برای جذب انرژی زلزله مناسب‌اند. در این مقاله استهلاك انرژی در لوله‌های فلزی جدار نازک آکاردئونی و رفتار آنها در برابر نیروی محوری رفت و برگشتی به منظور استفاده به عنوان میراگر فلزی جاری شونده مطالعه می‌شود. بدین منظور از مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی استفاده شده است. مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های مشابه موجود در بازار و با استفاده از دستگاه کشش و فشار دینامیکی انجام گرفته است. مطالعات تحلیلی نیز بر اساس مدل‌های اجزای محدود و تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی صورت گرفته است. در این مطالعات تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی این لوله‌ها از قبیل هندسه شکل، ضخامت ورق، قطر و طول لوله و همچنین نوع مصالح بر میزان استهلاك انرژی و سختی محوری بررسی شده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهند لوله‌های جدار نازک آکاردئونی از نظر جذب انرژی رفتار مطلوبی دارند و با انتخاب پارامترهای هندسی و مکانیکی مناسب می‌توان به طرح بهینه میراگر فلزی آکاردئونی برای نیاز سازه دست یافت.

**واژگان کلیدی:** میراگر فلزی جاری شونده، لوله جدار نازک آکاردئونی، اتلاف انرژی، مقاوم سازی لرزه ای

## Study of Energy Dissipation in Accordion Thin-Walled Tubes under Axial Cyclic Loads

M. Motamedi, F. Nateghi-Elahi, M. Ziaefar, and M. Karimi

Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Tehran Science and Research Division  
Department of Structural Engineering, International Institute of Earthquake Engineering & Seismology

\*\*\*\* - دانشجوی کارشناسی ارشد

\*\*\* - استادیار

\*\* - استاد

\* - دانشجوی دکترا

**Abstract:** Energy absorber systems like metallic dampers for controlling the structural vibrations due to earthquake have witnessed considerable development in the past few decades. Also there are some studies on the energy absorption of thin-walled tubes due to impact load. Thin-walled tubes have a large deformation capacity and are suitable energy absorbers in the structure during an earthquake provided that a suitable inelastic buckling mode obtains. This paper deals with the study of energy dissipation in accordion thin-walled tubes and their behavior due to axial cyclic loads. For this purpose, experimental and analytical studies have been performed. Experimental studies were conducted on specimens available in the market by dynamic tension and compression actuator. Analytical studies are based on finite element methods and nonlinear inelastic dynamic analysis. These studies are focused on the effects of mechanical and geometrical parameters of these tubes like shape, thickness, diameter, length and material type of tube on the amount of energy dissipation and axial stiffness. The results show that accordion thin-walled tubes exhibit satisfactory energy absorption behavior and that proper selection of the parameters yields the optimum design of this metallic damper.

**Keywords:** Hysteretic metallic damper, Accordion thin-walled tube, Energy dissipation, Seismic retrofitting

## ۱- مقدمه

زلزله کاهش می‌دهد [۱].

در چند دهه گذشته میراگرهای فلزی بسیاری ابداع شده است. اولین میراگرهایی که ساخته شدند به شکل تیر پیچشی، تیرخمش و نواریهای U شکل بودند. میراگر فشاری سربی، میراگر حلقوی، میراگر فنر افقی غیرخطی، میله خمیده و ورقهای منحنی شده نسل بعدی وسایل جاذب انرژی بودند که مورد مطالعه قرار گرفتند [۲]. میراگرهای ADAS و TADAS که متشکل از ورقهای خمشی X و V شکل هستند، از نوع میراگرهای با قابلیت تغییر شکل کوچک‌اند که توسط محققان بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته، توسعه فراوانی یافته و در صنعت هم استفاده شده‌اند [۳ و ۴]. مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی بسیاری در مورد انواع میراگرهای فلزی جاری شونده صورت گرفته است [۵].

استفاده از لوله‌های جدار نازک، سالهاست که به منظور جذب انرژی ضربه در سیستمهای مکانیکی و حمل و نقل رایج شده است. مطالعه رفتار و مکانیسم تغییر شکل در این سیستمها به سالها پیش برمی‌گردد. در دو دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۸۰ میلادی به اوج خود رسید و در سالهای اخیر نیز همچنان ادامه دارد. رید [۶] لوله‌های جدارنازک صاف<sup>۱</sup> را تحت بار محوری فشاری مطالعه کرد. او در مطالعات آزمایشگاهی سه مد تغییر شکلی کمانش محوری<sup>۲</sup>، وارونش<sup>۳</sup> و پارگی محوری<sup>۴</sup> را در لوله‌های فلزی بررسی کرده و یک مدل ریاضی برای هر یک ارائه داد. یامازاکی و هن [۷] تعدادی لوله جدار نازک آلومینیومی را تحت بارمحوری ضربه‌ای آزمایش کردند و سه

استفاده از روشهای سنتی مقاوم سازی لرزه‌ای سازه‌های موجود، نظیر تقویت اعضای تیر و ستون، اتصالات و اضافه کردن بادبند و دیوار برشی کم و بیش به عملکرد ساختمان و سرویس دهی آن ضمن اجرا لطمه وارد می‌کند. همچنین زمان اجرای آن طولانی است و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. در حالی که روشهای نوین کنترل ارتعاشات سازه، ضمن اقتصادی بودن، این امکان را فراهم می‌کنند که بدون خرابیهای عمده هنگام اجرا، ساختمان به سرویس دهی خود ادامه دهد. از این رو در چند دهه اخیر استفاده از سیستمهای جداسازی لرزه‌ای، قطعات اتلاف انرژی نافع و سیستمهای کنترل فعال و نیمه فعال برای مقاوم سازی یا طراحی مقاوم سازه‌ها به سرعت در حال توسعه است.

میراگرهای نافع یکی از انواع سیستمهای جاذب انرژی ارتعاشات در سازه‌ها هستند که شامل قطعات وابسته به سرعت مانند میراگر ویسکوز، میراگر ویسکوالاستیک و قطعات وابسته به تغییر مکان مانند میراگر اصطکاکی و میراگر فلزی جاری شونده و قطعات مرکب‌اند. میراگرهای فلزی دارای میرایی هیسترتیک هستند و از طریق مکانیسم تسلیم شدن در اثر تغییر شکلهای چرخه ای و وارد شدن به محدوده کرنشهای پلاستیک، انرژی اعمال شده را مستهلک می‌کنند. قسمت اعظم این انرژی به گرما تبدیل می‌شود. این امر موجب تمرکز خسارت در میراگر و اتلاف قسمت اعظم انرژی ورودی به سازه می‌شود که پاسخ دینامیکی سازه را در برابر

الگوی کمانش محوری شامل کمانش اولری<sup>۵</sup>، کمانش الماسی<sup>۶</sup> و کمانش آکاردئونی<sup>۷</sup> را به روش اجزای محدود شبیه سازی کرده و با استفاده از تکنیک پاسخ سطح تقریبی<sup>۸</sup>، یک روش تقریبی برای طراحی بهینه این قطعات پیشنهاد و تغییرات انرژی جذب شده و امکان بروز الگوهای کمانشی را برحسب شعاع و ضخامت لوله بررسی کردند. وانگ و لوو [۸] مد کمانشی قارچی شدن<sup>۹</sup> را در لوله‌های جدارنازک صاف مطالعه کردند. آنها تأثیر سرعت ضربه و نسبت‌های هندسی را در کمانش لوله‌های فولادی و آلومینیومی براساس مطالعات آزمایشگاهی و شبیه سازی رایانه‌ای به روش اجزای محدود بررسی کردند. باردی، یان و کریاکیدس [۹] در مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی بر روی لوله‌های جدارنازک صاف نشان دادند مدکمانشی محوری آکاردئونی بیشترین جذب انرژی را تحت بار محوری فشاری دارد و تبدیل الگوی کمانشی الماسی به آکاردئونی بستگی به نسبت شعاع به ضخامت لوله دارد.

قوطیهای جدارنازک چهارگوش<sup>۱۰</sup> نیز به عنوان قطعات جاذب انرژی مورد توجه قرار گرفته است. رید [۶] در آزمایشهای انجام گرفته بر روی چند نمونه، به دو الگوی کمانش الماسی فشرده<sup>۱۱</sup> و غیرفشرده<sup>۱۲</sup> در این قوطی‌ها اشاره و تأثیر مواد پرکننده را در تبدیل الگوی غیرفشرده به فشرده بررسی کرده است. کاراگیوزاوا و جونز [۱۰] نیز کمانش دینامیکی قوطیهای جدارنازک چهارگوش را تحت ضربه محوری مطالعه کردند و تأثیر سرعت ضربه را بر شکل کمانشی به دو صورت آزمایشگاهی و تحلیلی بررسی کردند. همچنین رفتار قوطیهای جدارنازک را با لوله‌های جدارنازک صاف به روش اجزای محدود مقایسه کردند.

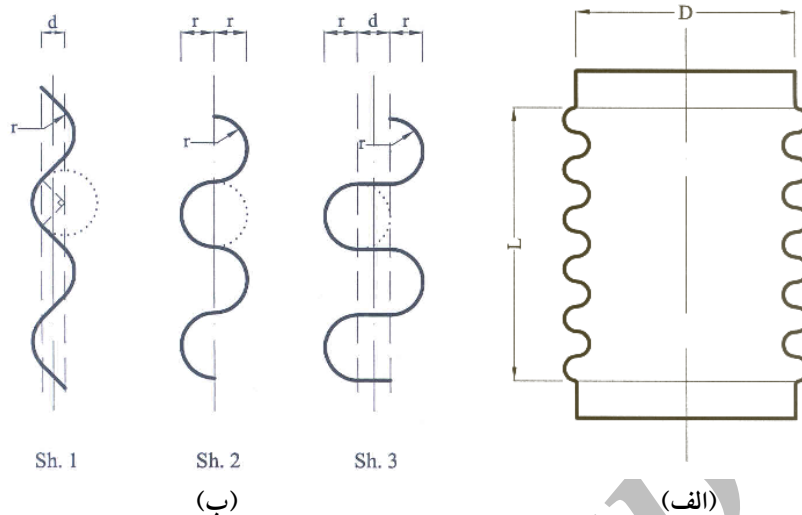
دانشی و حسینی پور [۱۱ و ۱۲] به منظور یکنواخت کردن منحنی نیرو - تغییر مکان و کنترل مد کمانشی در لوله‌های جدار نازک، شیاریهای<sup>۱۳</sup> حلقوی در داخل و خارج لوله به صورت یکی در میان ایجاد کردند. مطالعات آزمایشگاهی بر روی تعدادی از نمونه‌های ساخته شده نشان داد که مفاصل

پلاستیک در شیاریهای از قبل تعیین شده ایجاد می‌شوند و نسبت قطر به ضخامت لوله و همچنین فاصله و عمق شیاریها در تبدیل مد کمانشی الماسی به آکاردئونی تأثیر دارد. آنها یک مدل ریاضی نیز برای رفتار و جذب انرژی این لوله‌ها توسعه دادند.

انتخاب شکل اولیه آکاردئونی برای لوله‌های جدارنازک، موجب ایجاد نسبت یکنواختی پایین در منحنی نیرو - تغییر مکان می‌شود و مد کمانشی را به سمت الگوی آکاردئونی هدایت می‌کند. این امر سبب می‌شود که لنگر خمشی حداکثر ناشی از بارمحوری در رأس و قعر موجها ایجاد شود و با افزایش میزان بار، کرنش پلاستیک در سراسر پوسته لوله توسعه یابد. سینگیس و ال سوبکی [۱۳] رفتار لوله‌های جدارنازک آکاردئونی<sup>۱۴</sup> را مطالعه کردند. آنها لوله‌های جدارنازکی از جنس آلومینیوم و PVC را به شکل آکاردئونی درآوردند و تحت بار محوری فشاری آزمایش کردند. آنها تأثیر آکاردئونی بودن لوله، پرکردن لوله با فوم، اثر تنش زدایی در لوله‌های آکاردئونی، تأثیر عمق موجها و نسبت فاصله موجها به شعاع لوله را بر جذب انرژی بررسی کردند. معتمدی [۱۴] ایده به کارگیری لوله‌های جدار نازک آکاردئونی<sup>۱۵</sup> را در مقاوم سازی لرزه ای سازه‌ها مطرح و انجام آزمایشات دینامیکی رفت و برگشتی بر روی این لوله‌ها را پیشنهاد کرد. با این عقیده که پارامترهای هندسی و نوع فلز بر رفتار هیسترتیک لوله‌های جدار نازک آکاردئونی تأثیر زیادی دارد و با انتخاب نسبت‌های ویژه‌ای از پارامترهای هندسی می‌توان جذب انرژی را در آنها به حداکثر رساند. معتمدی و ناطقی الهی [۱۵] رفتار لوله‌های جدار نازک آکاردئونی را تحت بار محوری رفت و برگشتی و براساس مدل‌های اجزای محدود مطالعه کردند و نشان دادند این قطعات می‌توانند به عنوان میراگر فلزی جاری شونده<sup>۱۶</sup> انرژی زلزله را جذب کنند.

## ۲- طرح مسئله

در این مقاله رفتار دینامیکی چرخه‌ای لوله‌های جدارنازک آکاردئونی و میزان استهلاک انرژی در آنها در فرایند تغییر شکل



شکل ۱- تصویر شماتیک نمونه‌های مورد مطالعه

(الف) لوله جدار نازک آکاردئونی، (ب) شکل هندسی جداره (سینوسی، دایره ای، U شکل)

غشایی - خمشی و در هر لحظه مطابق شکل (۲) است. در این شکل،  $r_0$ ،  $r_1$  و  $r_2$  به ترتیب شعاع لوله و شعاعهای پلیسه در المان مورد نظر بوده،  $N\varphi$  و  $N\theta$  به ترتیب نیروهای غشایی نصف النهاری و محیطی،  $M\varphi$  و  $M\theta$  لنگرهای خمشی حول محورهای نشان داده شده و  $Q\varphi$  نیروی برشی است. به دلیل شرایط تقارن در لوله فقط این برایندها روی المان قرار دارند و  $N\theta$  و  $M\theta$  با  $\theta$  تغییر نمی‌کنند. در این صورت انرژی کرنشی (U) در کل لوله عبارت است از مجموع انرژی کرنشهای غشایی ( $U_m$ ) و انرژی خمشی ( $U_b$ ):

$$U = U_m + U_b \quad (1)$$

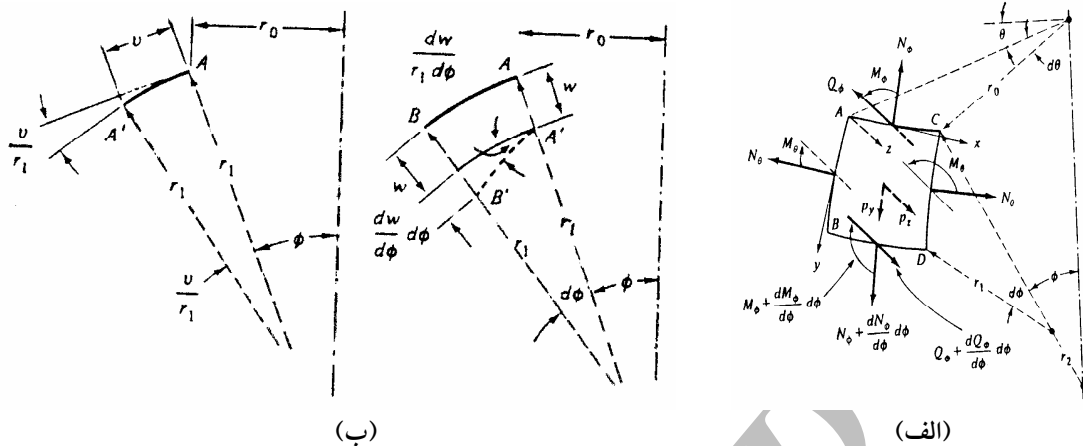
$$U_m = \frac{Et}{2[1-\nu^2]} \iint_A (N_\theta \varepsilon_\theta + N_\varphi \varepsilon_\varphi) d\varphi d\theta \quad (2)$$

$$U_b = \frac{1}{2} D \iint_A [(X_\varphi + X_\theta)^2 - 2(1-\nu)(X_\varphi X_\theta)] d\varphi d\theta \quad (3)$$

که در آن E ضریب الاستیک،  $\nu$  ضریب پواسون، A مساحت جانبی لوله و  $\varepsilon_\varphi$  و  $\varepsilon_\theta$  به ترتیب کرنشهای نصف النهاری و محیطی اند:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{1}{r} \frac{dv}{d\varphi} - \frac{w}{r_1} \quad (4)$$

محوری و در محدوده پلاستیک مصالح مطالعه می‌شود. در این مطالعات جنس لوله، فولادی در نظر گرفته شده است. شرایط اتصال انتهای لوله بدون چرخش بوده و فرض می‌شود لوله تنها در امتداد محور خود تغییر طول دهد. ابعاد نمونه‌های مورد مطالعه به گونه‌ای انتخاب شده که استفاده از آنها در سازه قابل توجیه باشد. شکل (۱-الف) تصویر شماتیک لوله‌های جدار نازک آکاردئونی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. تنوع شکل هندسی جداره نیز در شکل (۱-ب) نشان داده شده است. در این شکل، Sh تیپ شکل هندسی، t ضخامت جداره، D قطر لوله، L طول لوله، n تعداد پلیسه‌ها و r شعاع پلیسه است. انتظار می‌رود با اعمال بار محوری به لوله، در جداره لوله تنشهای سه محوری ایجاد شود. توزیع تنش در جداره بدین صورت است که بیشترین تنش در نقاط رأس و قعر پلیسه‌ها ایجاد شده، با دور شدن از این نقاط مقدار تنش کاهش یافته و در نقاط میانی به کمترین مقدار خود می‌رسد. با افزایش بار محوری تقریباً اکثر نقاط رأس و قعر همزمان به معیار تسلیم می‌رسند و متناسباً تنش در سایر نقاط نیز افزایش می‌یابد. اگر یک المان کوچک پوسته‌ای از دیواره لوله جدار نازک آکاردئونی در نظر گرفته شود، نیروهای داخلی بر اساس نظریه



شکل ۲- المان پوسته در لوله جدارنازک آکاردئونی

(الف) موقعیت هندسی و نیروهای داخلی، (ب) مولفه‌های تغییر مکانی المان

$$\sigma_\phi^2 - \sigma_\phi \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 = \sigma_y \quad (13)$$

$$\epsilon_{eq} = \frac{1}{\sqrt{(1-\nu)}} \left[ \epsilon_\theta^2 - \epsilon_\phi \epsilon_\theta + \epsilon_\phi^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

که در آن تنش حد تسلیم و کرنش معادل این معیار است و در این حالت لنگر خمشی بر حسب لنگر پلاستیک خواهد شد:

$$M_\phi = M_p \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_\phi}{\sigma_y} \right)^2 \right] \quad (15)$$

$$M_\theta = M_p \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_\theta}{\sigma_y} \right)^2 \right] \quad (16)$$

$$M_p = \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_y \right) \frac{t^2}{4} \quad (17)$$

حل این معادلات و محاسبه ظرفیت باربری و انرژی تلف شده در بارگذاری رفت و برگشتی، در محدوده غیر خطی مصالحی و تغییرشکل‌های بزرگ برای نمونه‌های مورد مطالعه، به روش اجزای محدود و تحلیل‌های رایانه‌ای صورت می‌گیرد. برای حصول اطمینان از صحت مدل‌سازی تحلیل رایانه‌ای نیز از مطالعه آزمایشگاهی استفاده شده که به آن پرداخته می‌شود.

$$\epsilon_\theta = \frac{\nu}{r_2} \cot \phi - \frac{w}{r_2} \quad (5)$$

$$N_\phi = \frac{Et}{1-\nu^2} \left[ \frac{1}{r_1} \left( \frac{dv}{d\phi} - w \right) + \frac{\nu}{r_2} (\nu \cot \phi - w) \right] \quad (6)$$

$$N_\theta = \frac{Et}{1-\nu^2} \left[ \frac{1}{r_2} (\nu \cot \phi - w) + \frac{\nu}{r_1} \left( \frac{dv}{d\phi} - w \right) \right] \quad (7)$$

$$M_\phi = -D \left[ \frac{1}{r_1} \frac{d}{d\phi} \left( \frac{\nu}{r_1} + \frac{dw}{r_1 d\phi} \right) + \frac{\nu}{r_2} \left( \frac{\nu}{r_1} + \frac{dw}{r_1 d\phi} \right) \cot \phi \right] \quad (8)$$

$$M_\theta = -D \left[ \left( \frac{\nu}{r_1} + \frac{dw}{r_1 d\phi} \right) \frac{\cot \phi}{r_2} + \frac{\nu}{r_1} \frac{d}{d\phi} \left( \frac{\nu}{r_1} + \frac{dw}{r_1 d\phi} \right) \right] \quad (9)$$

که در آن D سختی خمشی پوسته و  $X_\phi$  و  $X_\theta$  تغییرات انحنا هستند:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (10)$$

$$X_\phi = \frac{1}{r_1} \frac{d}{d\phi} \left( \frac{\nu}{r_1} + \frac{dw}{r_1 d\phi} \right) \quad (11)$$

$$X_\theta = \left( \frac{\nu}{r_1} + \frac{dw}{r_1 d\phi} \right) \frac{\cot \phi}{r_2} \quad (12)$$

با قرار دادن معادلات (6) الی (9) در معادلات کلی تعادل المان مولفه‌های تغییر مکان  $w$  و  $v$  در هر لحظه به دست می‌آیند. اثرات غیرخطی مصالح هنگامی که لوله در آستانه کماتش غیر الاستیک قرار می‌گیرد با در نظر گرفتن معیار تسلیم ون میسز<sup>۱۷</sup> لحاظ می‌شود [۱۶]:



(الف) (ب) (ج)

شکل ۳- نمونه‌های مورد آزمایش: الف) ST-1-1، ب) ST-1-2، ج) ST-1-3

جدول ۱- مشخصات هندسی و نوع مصالح در نمونه‌های مورد آزمایش

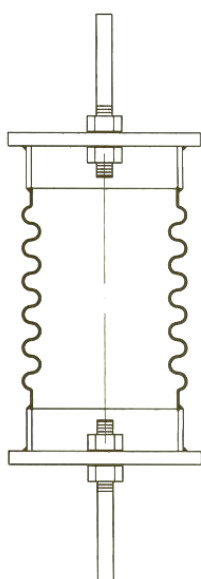
| n  | d (mm) | r (mm) | t (mm) | L (mm) | D (mm) | Sh. | شماره نمونه | نوع فولاد |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|-----|-------------|-----------|
| ۱۰ | ۸      | ۴      | ۰/۵    | ۱۵۲    | ۱۳۶    | ۳   | ST-1-1      | A 304     |
| ۱۰ | ۸      | ۴      | ۰/۶    | ۱۵۲    | ۱۵۸    | ۳   | ST-1-2      | A 304     |
| ۱۰ | ۸      | ۵      | ۰/۶    | ۱۹۰    | ۲۱۷    | ۳   | ST-1-3      | A 304     |

هیدرولیکی کشش و فشار دینامیکی رول امسلر<sup>۱۹</sup> مستقر در آزمایشگاه دینامیک سازه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله انجام گرفته است. این دستگاه در امتداد محور قائم خود، قابلیت اعمال نیروی رفت و برگشتی به ظرفیت ۷۰ تن را دار است. شکل (۴) دستگاه کشش و فشار دینامیکی، آرایش آزمایش و چگونگی قرارگیری نمونه‌های مورد آزمایش در دستگاه را نشان می‌دهد. برای نصب لوله‌های جدارنازک در میان فکهای دستگاه، از دو اتصال بدون چرخش در دو انتهای لوله استفاده شده است که شکل (۵) جزئیات و نحوه اتصال آن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود صفحات به پیرامون لوله جوش شده و اتصال پیچ و مهره میله به مرکز صفحه امکان هرگونه چرخش را از لوله سلب کرده است و دو انتهای لوله تنها قادر است در امتداد محور خود که منطبق بر محور دستگاه است جا به جا شود. بارگذاری مورد استفاده در

### ۳- مطالعات آزمایشگاهی

به منظور بررسی رفتار دینامیکی لوله‌های جدار نازک آکاردئونی از مطالعات آزمایشگاهی استفاده شده است. لوله‌های مورد آزمایش از نمونه‌های مشابه و موجود در بازار که برای استفاده در اتصالات لوله‌های صنعتی ساخته شده بودند، انتخاب شده است. مشخصات هندسی و مصالحی نمونه‌های مورد آزمایش در جدول (۱) آورده شده است. جنس این لوله‌ها از فولاد زنگ نزن A304<sup>۱۸</sup> با تنش حد جاری شدن ۲۱۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، تنش حد نهایی ۵۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و کرنش حد گسیختگی ۶۰٪ است که به روش شکل دهی دورانی تولید شده اند. شکل (۳) لوله‌های جدار نازک ST-1-1، ST-1-2 و ST-1-3 تهیه شده برای آزمایش را نشان می‌دهد.

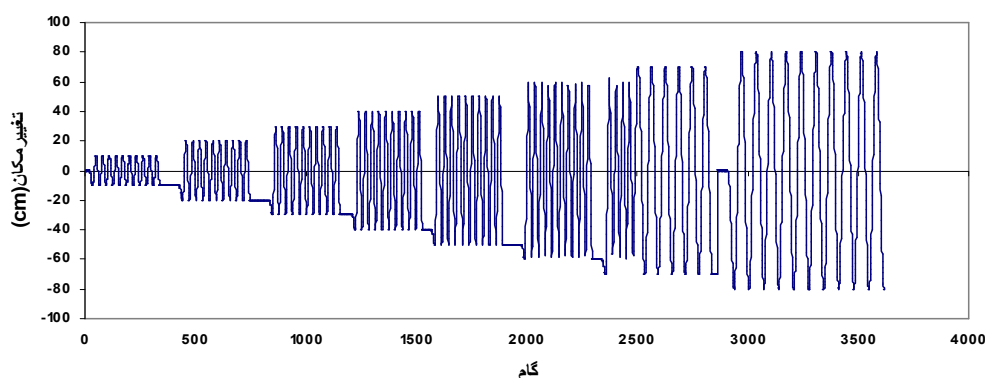
آزمایشات دینامیکی بر روی نمونه‌های مذکور با دستگاه



شکل ۵- نحوه اتصال بدون چرخش در دو انتهای لوله جدار نازک آکاردئونی برای نصب در دستگاه آزمایش



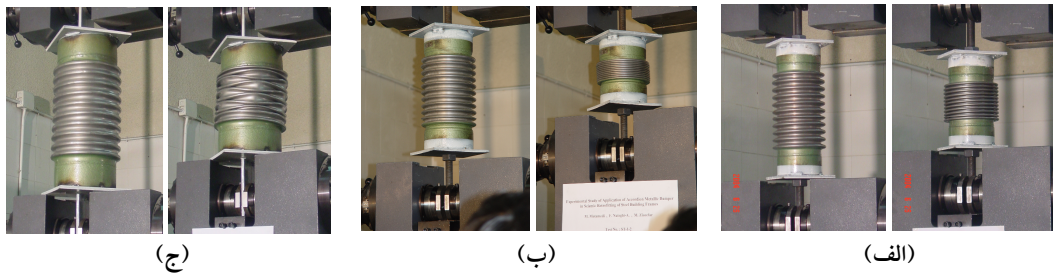
شکل ۴- آرایش آزمایش و دستگاه هیدرولیکی کشش و فشار دینامیکی



شکل ۶- الگوی بارگذاری محوری در آزمایش دینامیکی لوله‌های جدار نازک آکاردئونی

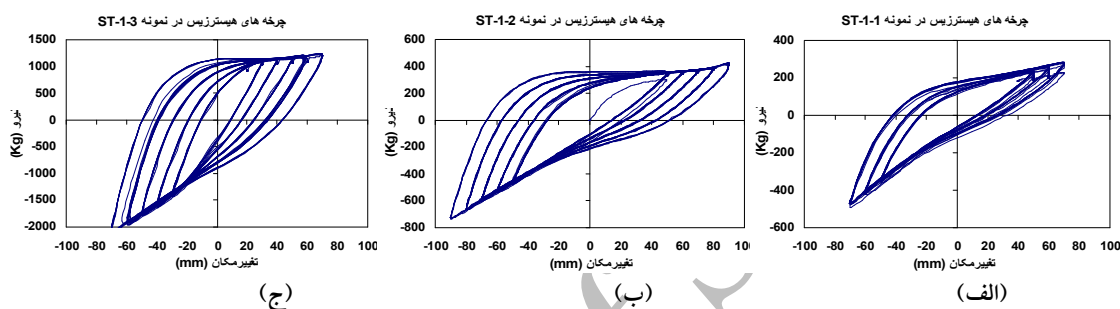
دادند. شکل (۷) تغییر شکل محوری نمونه‌های مورد آزمایش را در حالت کشش و فشار نشان می‌دهد. در حین انجام آزمایش بدنه لوله‌های جدار نازک اندکی گرم شدند. شکل (۸) رفتار هیسترتیک لوله‌های جدار نازک آکاردئونی تحت آزمایش را نشان می‌دهد. سطح زیر منحنی نیرو - تغییر مکان، انرژی تلف شده در لوله را در هر سیکل نشان می‌دهد. در نمونه‌های مورد مطالعه ظرفیت باربری و رفتار لوله‌ها در کشش و فشار یکسان نیست. به نظر می‌رسد تحت نیروی کششی، رفتار غیرخطی

این آزمایشات به صورت کنترل تغییر مکان محوری رفت و برگشتی با دامنه افزایشده است که شکل (۶) نمودار آن را برحسب گامهای بارگذاری یکسان نشان می‌دهد. دامنه آن از  $\pm 10$  میلیمتر آغاز شده و تا  $\pm 80$  میلیمتر افزایش یافته است. سرعت بارگذاری  $0.5$  سیکل در ثانیه است. بارگذاری تعیین شده بر هر سه نمونه اعمال شد. تمام نمونه‌ها تغییر مکانی حدود  $70$  میلیمتر را تا  $70$  سیکل در مود کمانشی آکاردئونی تحمل کردند و بدون پارگی رفتار پایداری را از خود نشان



شکل ۷- تغییر شکل فشاری و کششی محوری در آزمایش دینامیکی لوله‌های جدار نازک آکاردئونی

(الف) ST-1-1، (ب) ST-1-2، (ج) ST-1-3



شکل ۸- رفتار هیسترتیک در لوله‌های جدار نازک آکاردئونی تحت آزمایش

(الف) ST-1-1، (ب) ST-1-2، (ج) ST-1-3

بر سختی الاستیک، ظرفیت باربری و اتلاف انرژی و همچنین تعیین بهترین شکل آکاردئونی برای لوله به منظور بیشترین اتلاف انرژی، از مطالعات تحلیلی استفاده شده است. از این رو برای هر یک از پارامترهای هندسی لوله دامنه تغییراتی در نظر گرفته شده است. جدول (۲) حدود تغییرات هر یک از پارامترهای هندسی و نوع مصالح را برای لوله جدار نازک آکاردئونی نشان می‌دهد. همچنین برای بررسی تأثیر نوع مصالح بر رفتار این لوله‌ها از سه نوع فولاد استفاده شده است که مشخصات مکانیکی آنها در جدول (۳) آورده شده است.

مطالعات تحلیلی براساس روش اجزای محدود و به کمک نرم افزار Ansys 5.4 صورت گرفته است. مدلسازی نمونه‌های مورد تحلیل با المان چهار گرهی Shell 181 انجام گرفته و گزینه تغییر شکلهای بزرگ و تحلیل غیرخطی مصالحی به منظور لحاظ کردن کرنش غیرخطی در مفاصل پلاستیک فعال شده است. نوع مصالح برای نمونه‌های مورد تحلیل، ایزوتروپ

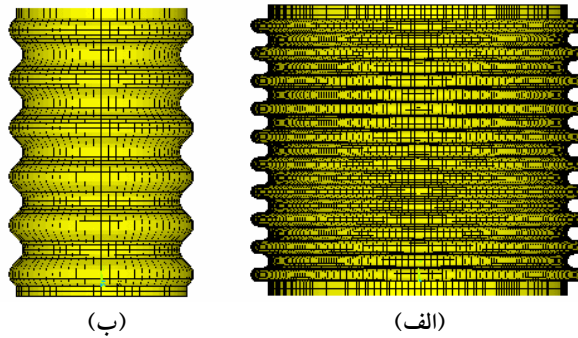
هندسی لوله‌ها حاکم بوده است. با افزایش اندازه لوله‌ها ظرفیت باربری و سطح زیرمنحنی نیرو - تغییر مکان افزایش یافته و رفتار بهتری بروز کرده است. به هر حال انطباق سیکلها در هر دامنه، نشان دهنده عدم وجود زوال<sup>۲۰</sup>، افت سختی<sup>۲۱</sup> و کاهش مقاومت<sup>۲۲</sup> است که وجود چنین شرایطی برای یک قطعه جذب کننده انرژی یا به اصطلاح میراگر فلزی ایدئال است.

از نتایج این آزمایشات برای کالیبراسیون مدل‌های تحلیلی نمونه‌های واقعی که دارای ظرفیت باربری بیشتر، سختی بیشتر و همچنین جذب انرژی بیشتر در هر سیکل‌اند و به منظور کاربرد در قابهای ساختمانی مناسب‌اند، استفاده شده است.

#### ۴- مطالعات تحلیلی

به منظور مطالعه بیشتر رفتار لوله‌های جدار نازک آکاردئونی، وضعیت تنش در جداره آنها، مقایسه شکلهای هندسی مختلف برای این لوله‌ها، تأثیر پارامترهای مختلف هندسی و مصالحی





شکل ۹- مدلسازی رایانه‌ای به روش اجزای محدود و مش بندی با المان Shell  
 الف) نمونه مورد مطالعه آزمایشگاهی (ST-1-3) ، ب) نمونه مورد مطالعه پارامتری

جدول ۲- حدود تغییرات پارامترهای هندسی و نوع مصالح در مطالعات تحلیلی لوله‌های جدار نازک آکاردئونی

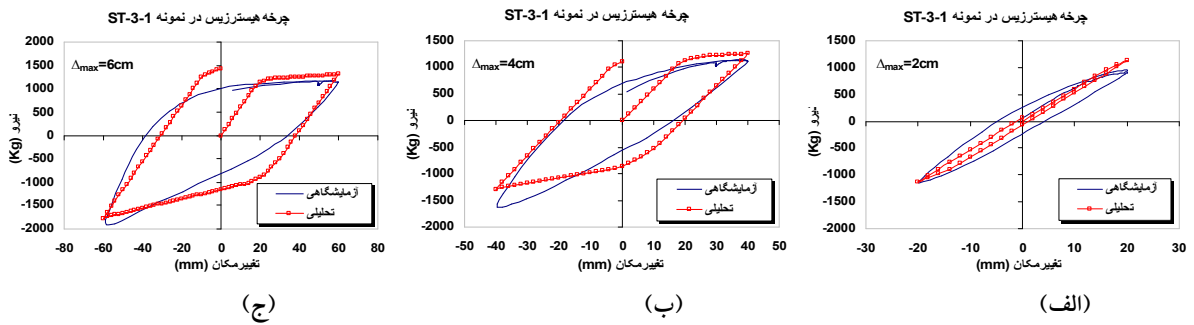
| شعاع پلیسه‌ها (mm) | تعداد پلیسه‌ها | قطر لوله (mm) | ضخامت جداره (mm) | تیپ مصالح | تیپ شکل هندسی |
|--------------------|----------------|---------------|------------------|-----------|---------------|
| ۷/۵                | ۲              | ۱۵۰           | ۲                | ۱         | Sh.1          |
| ۱۰/۰               | ۴              |               | ۳                |           |               |
|                    | ۸              |               | ۴                |           |               |
| ۱۲/۵               | ۱۰             | ۱۷۵           | ۵                | ۲         | Sh.2          |
|                    | ۱۱             |               | ۶                |           |               |
| ۱۵/۰               | ۱۳             | ۲۰۰           | ۶                | ۳         | Sh.3          |
|                    | ۱۵             |               |                  |           |               |

جدول ۳- خواص مکانیکی فولاد در نظر گرفته شده در مطالعات تحلیلی لوله‌های جدار نازک آکاردئونی

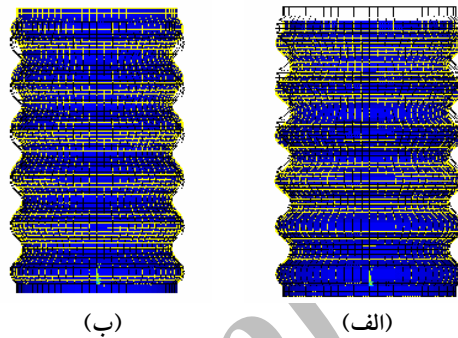
| تیپ مصالح | نام تجاری | ضریب الاستیسیته (kg/cm <sup>2</sup> ) | تنش حد جاری شدن (kg/cm <sup>2</sup> ) | تنش حد نهایی (kg/cm <sup>2</sup> ) | کرنش در ابتدای سخت شدگی (%) | کرنش نظیر حد نهایی (%) | کرنش گسیختگی (%) |
|-----------|-----------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------|
| ۱         | A 36      | $2/1 \times 10^6$                     | ۲۴۰۰                                  | ۴۰۰۰                               | ۲/۳                         | ۲۰                     | ۳۰               |
| ۲         | A 304     | $2/1 \times 10^6$                     | ۲۱۰۰                                  | ۵۰۰۰                               | ۲/۰                         | ۳۰                     | ۶۰               |
| ۳         | A 440     | $2/1 \times 10^6$                     | ۳۸۰۰                                  | ۴۸۰۰                               | ۳/۶                         | ۳۰                     | ۶۰               |

نسبی مورد انتظار در یکی از کاربردهایی است که در بخش آخر به آن اشاره خواهد شد. مش بندی و مدل رایانه‌ای نمونه‌های مورد تحلیل به روش اجزای محدود در شکل (۹) مشاهده می‌شود. مدل شکل (۹-الف) نمونه آزمایشگاهی ST-1-3 بوده که به منظور مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی

با منحنی تنش - کرنش سه خطی متناسب با فولاد مورد نظر مطابق جدول (۳) در نظر گرفته شده است. مدل بارگذاری به صورت یک سیکل رفت و برگشت و با کنترل تغییر مکانی و با حداکثر دامنه  $\pm 30$  میلیمتر و به شکل افزاینده مثلثی تعریف شده است. دامنه حداکثر با توجه به نیاز قاب در تغییر مکان



شکل ۱۰- مقایسه رفتار هیسترتیک در مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی در نمونه ST-3-1 در یک چرخه کامل بارگذاری  
 الف) دامنه تغییر مکان ۲ سانتیمتر ، ب) دامنه تغییر مکان ۴ سانتیمتر، ج) دامنه تغییر مکان ۶ سانتیمتر



شکل ۱۱- تغییر شکل محوری در تحلیل اجزای محدود لوله جدار نازک آکاردئونی الف) فشار محوری ، ب) کشش محوری

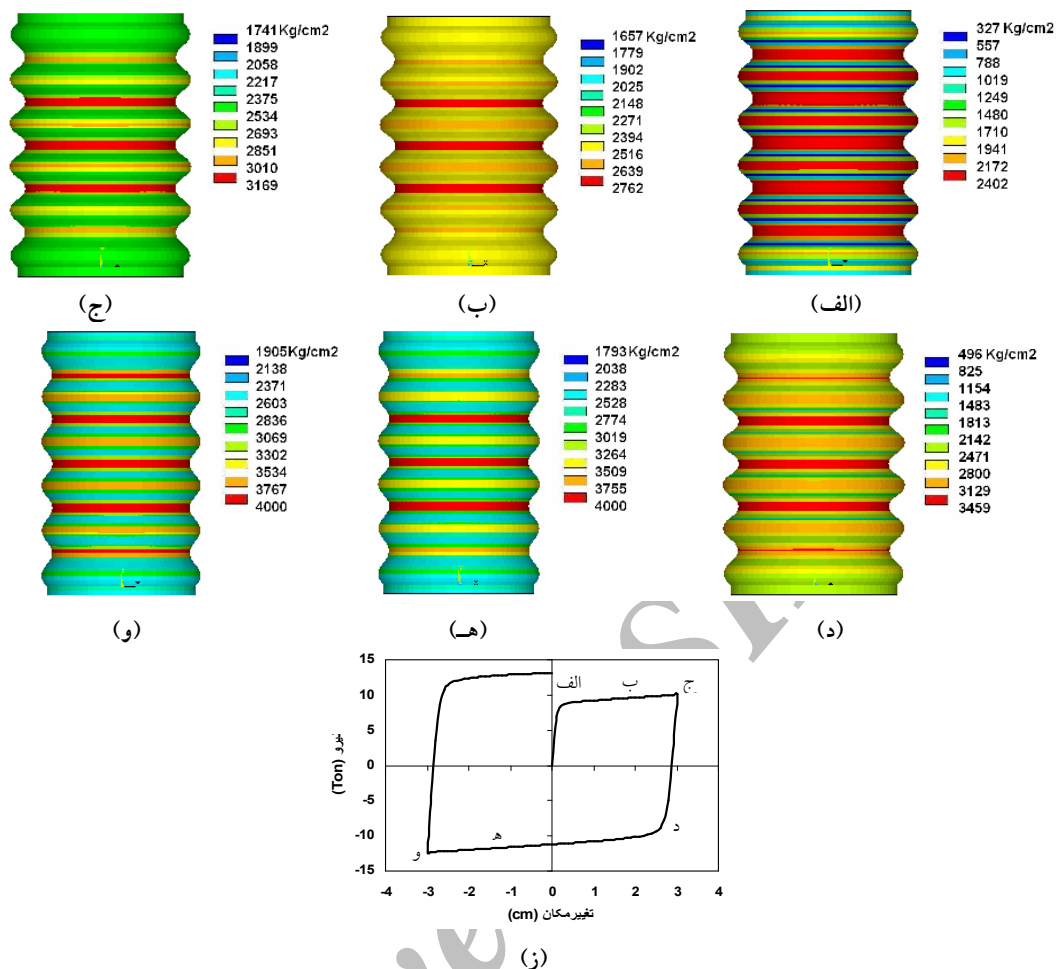
جدول ۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیل رایانه‌ای در نمونه ST-1-3

| سختی الاستیک<br>(Ton/cm) | ظرفیت باربری در فشار (Ton) |      |      | انرژی تلف شده (Ton-cm) |      |      | دامنه حداکثر (cm) |
|--------------------------|----------------------------|------|------|------------------------|------|------|-------------------|
|                          | ۶                          | ۴    | ۲    | ۶                      | ۴    | ۲    |                   |
| ۰/۷۷۵                    | ۱/۱۳                       | ۱/۱۱ | ۰/۹۵ | ۱۵/۰۳                  | ۶/۵۹ | ۱/۲۶ | مدل آزمایشگاهی    |
| ۰/۶۰۵                    | ۱/۳                        | ۱/۲۷ | ۱/۱۳ | ۱۶/۴                   | ۷/۳۹ | ۰/۳۶ | مدل تحلیلی        |
| ۲۲                       | ۱۳                         | ۱۳   | ۱۶   | ۹                      | ۱۲   | ۷۱   | اختلاف (%)        |

زود هنگام نمونه آزمایشی نسبت به مدل تحلیلی شده است. جدول (۴) پاسخ ظرفیت باربری، سختی و انرژی تلف شده مربوط به این نمونه را حاصل از نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی نشان می‌دهد. این مقایسه نشان می‌دهد نتایج تحلیل رایانه‌ای قابل اعتماد بوده و می‌توان از آن برای مطالعات پارامتری استفاده کرد.

شکل (۱۱) تغییر شکل محوری یک لوله جدار نازک آکاردئونی دیگر را در دو مکانیسم کششی و فشاری نشان

و کنترل صحت مدلسازی رایانه‌ای تهیه شده است. شکل (۱۰) رفتار هیسترتیک این نمونه را در دامنه‌های تغییر مکان مختلف حاصل از آزمایش و تحلیل رایانه‌ای در یک رفت و برگشت کامل نشان می‌دهد. همان گونه که نتایج نشان می‌دهد در دامنه‌های بزرگتر و به ازای جاری شدن کاملتر جداره، انطباق مدل رایانه‌ای با نتایج آزمایشگاهی بیشتر می‌شود. اختلاف رفتار در دامنه کم (۲ سانتیمتر) احتمالاً ناشی از نقصهای اولیه در هندسه لوله است که موجب جاری شدن

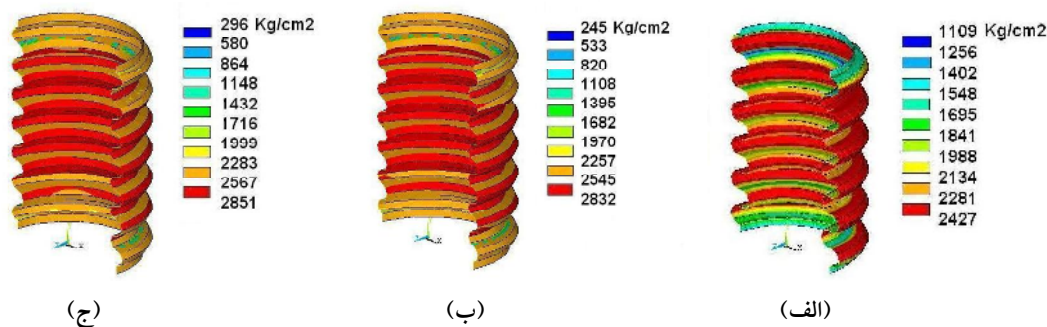


شکل ۱۲- روند توسعه تنش در جداره لوله جدار نازک با جداره سینوسی شکل در یک سیکل رفت و برگشت

می‌دهد. روند توسعه تنش در جداره لوله آکاردئونی با جداره سینوسی شکل (Sh.1) در یک سیکل رفت و برگشت در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در این نمونه ضخامت جداره ۳ میلیمتر، قطر لوله ۱۷۵ میلیمتر و شعاع پلیسه‌ها ۱۰ میلیمتر است. شکلهای شش گانه توزیع تنش، مربوط به گامهای مختلف تغییر شکل لوله است که به ترتیب موقعیت نشان داده شده در شکل (۱۲-ز) آمده‌اند. همان گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش تغییر شکل محوری لوله، نواحی تسلیم از نقاط رأس و قعر پلیسه‌ها به سایر نقاط پیشروی کرده و تقریباً تمامی طول لوله به معیار تسلیم رسیده است. به نظر می‌رسد شکل هندسی جداره بر یکنواختی توزیع تنش تأثیر مهمی دارد.

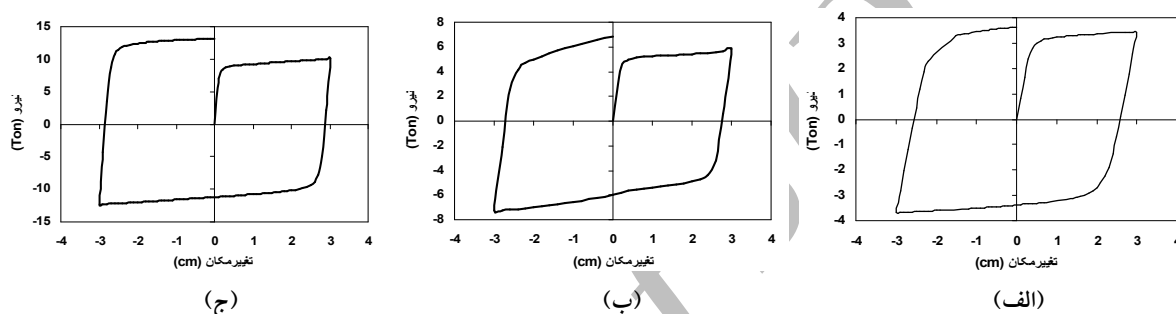
شکل (۱۳) وضعیت تنش در جداره لوله‌های آکاردئونی با شکلهای هندسی مختلف را نشان می‌دهد. این لوله‌ها از نظر ضخامت جداره، طول و قطر لوله و شعاع پلیسه‌ها شرایط یکسانی دارند و تنها تیپ شکل هندسی جداره در آنها تغییر کرده است. شکل (۱۴) رفتار هیسترتیک این سه لوله را، با جداره U شکل (Sh.3)، با جداره دایره‌ای شکل (Sh.2) و با جداره سینوسی شکل (Sh.1)، در یک سیکل و در تحلیل اجزای محدود نشان می‌دهد. سطح محصور بین هر حلقه هیسترتیک بیانگر اتلاف انرژی لوله در آن سیکل است. توزیع یکنواخت تنش در طول لوله موجب اتلاف انرژی بیشتر در آن می‌شود. در این مطالعه با تغییر شکل هندسی جداره، سختی اولیه، ظرفیت باربری و اتلاف انرژی لوله تغییر کرده است. لوله با شکل هندسی سینوسی شکل بیشترین و لوله با شکل هندسی

شکل (۱۳) وضعیت تنش در جداره لوله‌های آکاردئونی با شکلهای هندسی مختلف را نشان می‌دهد. این لوله‌ها از نظر ضخامت جداره، طول و قطر لوله و شعاع پلیسه‌ها شرایط یکسانی دارند و تنها تیپ شکل هندسی جداره در آنها تغییر کرده است. شکل (۱۴) رفتار هیسترتیک این سه لوله را، با جداره U شکل (Sh.3)، با جداره دایره‌ای شکل (Sh.2) و با جداره سینوسی شکل (Sh.1)، در یک سیکل و در تحلیل اجزای محدود نشان می‌دهد. سطح محصور بین هر حلقه هیسترتیک بیانگر اتلاف انرژی لوله در آن سیکل است. توزیع یکنواخت تنش در طول لوله موجب اتلاف انرژی بیشتر در آن می‌شود. در این مطالعه با تغییر شکل هندسی جداره، سختی اولیه، ظرفیت باربری و اتلاف انرژی لوله تغییر کرده است. لوله با شکل هندسی سینوسی شکل بیشترین و لوله با شکل هندسی



شکل ۱۳- وضعیت تنش در جداره لوله‌های جدار نازک آکاردئونی براساس معیار ون میسس

(الف) جداره U شکل، (ب) جداره دایره‌ای شکل، (ج) جداره سینوسی شکل



شکل ۱۴- رفتار هیسترتیک در تحلیل اجزای محدود لوله‌های جدار نازک آکاردئونی

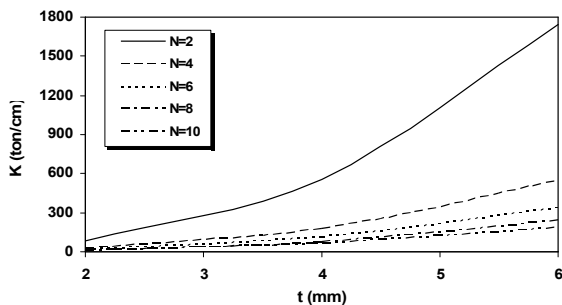
(الف) جداره U شکل، (ب) جداره دایره‌ای شکل، (ج) جداره سینوسی شکل

جدول ۵- مقایسه پاسخهای رفتاری در لوله‌های جدار نازک آکاردئونی با اشکال هندسی مختلف

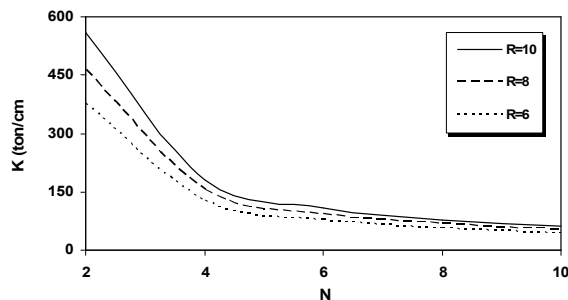
| سختی الاستیک<br>(Ton/cm) | ظرفیت باربری<br>(Ton) | حداکثر کرنش فشاری<br>(%) | انرژی تلف شده<br>(Ton-cm) | تپ شکل هندسی<br>جداره |
|--------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|
| ۸                        | ۶/۳                   | ۴/۲                      | ۳۳                        | U شکل (Sh.1)          |
| ۲۳                       | ۶/۸                   | ۹/۵                      | ۶۰                        | دایره‌ای شکل (Sh..2)  |
| ۷۱                       | ۱۳/۲                  | ۱۵/۳                     | ۱۲۵                       | سینوسی شکل (Sh.3)     |

جنس آن از مصالح نوع ۱ (فولاد A 36) بوده است. سختی قطعه میراگر پارامتر مهمی در رفتار دینامیکی قاب مقاوم شده در برابر زلزله است. از این رو مقدار سختی یکی از پارامترهایی است که در روشهای طراحی میراگر نقش دارد [۴]. رفتار لوله‌های جدار نازک آکاردئونی به ازای تغییر شکلهای کوچک، خطی و در محدوده الاستیک است و با زیاد شدن نیروی محوری یا تغییر شکل محوری، به تدریج وارد محدوده غیرخطی و پلاستیک می‌شود. سختی الاستیک سه نمونه تحلیل شده در جدول (۵) قابل مشاهده است. لوله با جداره سینوسی

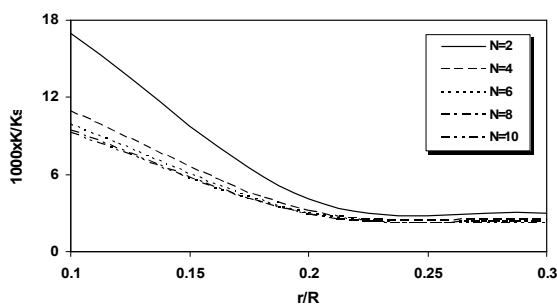
U شکل کمترین ظرفیت باربری و اتلاف انرژی را در میان نمونه‌ها داشته است. در جدول (۵) مقادیر پاسخهای رفتاری برای لوله‌های جدار نازک آکاردئونی با شکلهای هندسی مختلف جداره آمده است و انرژی تلف شده در هر سیکل، کرنش حداکثر فشاری براساس معیار ون میسس، ظرفیت باربری و سختی الاستیک اولیه در سه حالت شکل هندسی جداره با یکدیگر مقایسه شده است. در این لوله‌ها ضخامت جداره ۳ میلی‌متر، قطر لوله ۱۷۵ میلی‌متر، طول لوله ۳۰۰ میلی‌متر، شعاع خم پلیسه‌ها ۱۰ میلی‌متر و



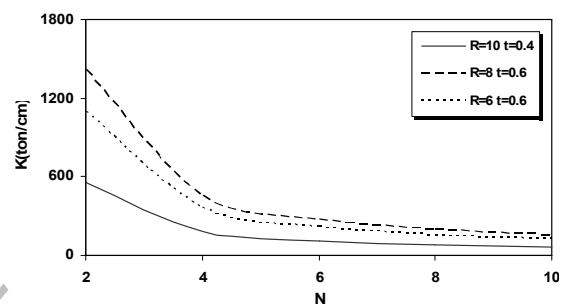
شکل ۱۶- تأثیر تعداد پلیسه‌ها و شعاع لوله بر سختی الاستیک لوله جدار نازک آکاردئونی با جداره دایره ای شکل



شکل ۱۵- تأثیر ضخامت و تعداد پلیسه‌ها در سختی الاستیک لوله جدار نازک با جداره دایره‌ای شکل



شکل ۱۸- مقایسه میزان تأثیر شعاع و ضخامت در سختی محوری لوله جدار نازک آکاردئونی با جداره دایره‌ای شکل

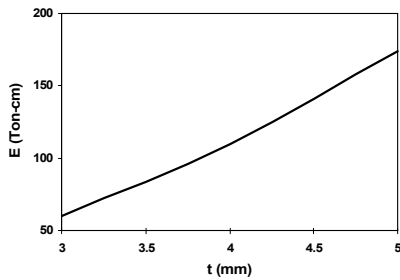


شکل ۱۷- تأثیر نسبت  $\frac{r}{R}$  لوله جدار نازک آکاردئونی با جداره دایره‌ای شکل بر نسبت سختی

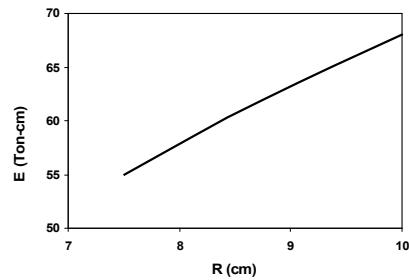
نسبت بی بعد  $\frac{r}{R}$  (نسبت شعاع پلیسه به شعاع لوله) بر نسبت بی بعد  $\frac{K}{K_s}$  (نسبت سختی لوله آکاردئونی به سختی لوله صاف) نشان داده شده است. به نظر می‌رسد با زیاد شدن تعداد پلیسه‌ها و نسبت  $\frac{r}{R}$ ، نسبت سختی تغییرات چندانی نداشته باشد. در نمودار شکل (۱۸) که بیانگر تأثیر شعاع لوله، ضخامت جداره و تعداد پلیسه‌ها بر سختی لوله آکاردئونی است، به خوبی اثر غالب ضخامت بر سایر پارامترها ملاحظه می‌شود. منحنی خط پر با وجود اینکه شعاع بزرگتری نسبت به سایرین دارد ولی به دلیل ضخامت کمتر، دارای سختی کمتری است. این مطالعات همگی بر روی لوله جدار نازک آکاردئونی با شکل جداره دایره‌ای و با مصالح تپ ۱ صورت گرفته است.

مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف هندسی و نوع مصالح بر میزان اتلاف انرژی در لوله‌های جدارنازک آکاردئونی مقدمه‌ای برای تعیین روش طراحی و ارایه مدل ریاضی

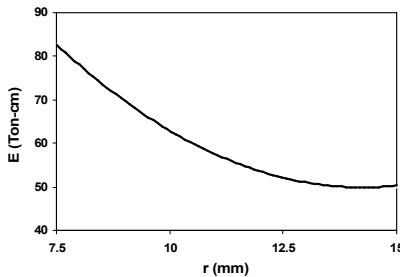
شکل دارای بیشترین مقدار سختی نسبت به سایر نمونه‌ها بوده است. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف هندسی بر سختی الاستیک نیز مورد مطالعه قرار گرفته است که نتایج آن در شکل‌های (۱۵) الی (۱۸) نشان داده شده است. در نمودار شکل (۱۵) تأثیر ضخامت و تعداد پلیسه‌ها در سختی اولیه لوله‌های آکاردئونی مشاهده می‌شود. در این مطالعه قطر لوله و شعاع پلیسه‌ها ثابت و به ترتیب ۲۰۰ و ۱۰ میلی‌متر بوده است. افزایش ضخامت باعث زیاد شدن سختی و افزایش تعداد پلیسه‌ها یا طول کلی لوله، باعث کم شدن سختی لوله آکاردئونی شده است. نمودار شکل (۱۶) تأثیر تعداد پلیسه‌ها و شعاع لوله را بر سختی نشان داده است. در این مطالعه که براساس ضخامت ثابت برای جداره از قرار ۴ میلی‌متر و شعاع پلیسه ۱۰ میلی‌متر صورت گرفته، با افزایش شعاع لوله، سختی افزایش یافته است. ولی تأثیر آن خصوصاً در تعداد پلیسه‌های زیاد چندان قابل توجه نیست. در نمودار شکل (۱۷) تأثیر



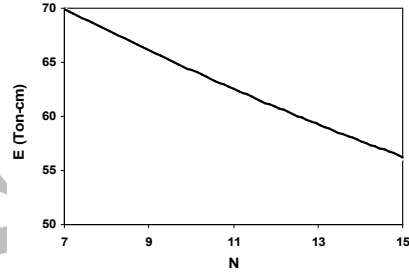
شکل ۲۰- تأثیر شعاع لوله بر اتلاف انرژی لوله آکاردئونی با جداره دایره‌ای شکل



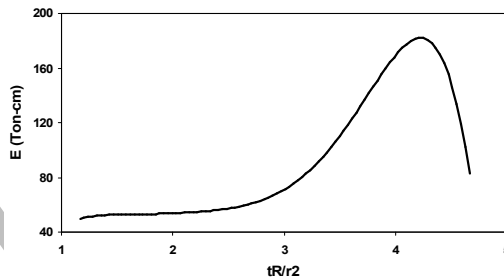
شکل ۱۹- تأثیر ضخامت جداره بر اتلاف انرژی لوله آکاردئونی با جداره دایره‌ای شکل



شکل ۲۲- تأثیر شعاع پلیسه‌ها در اتلاف انرژی لوله آکاردئونی با جداره دایره‌ای شکل



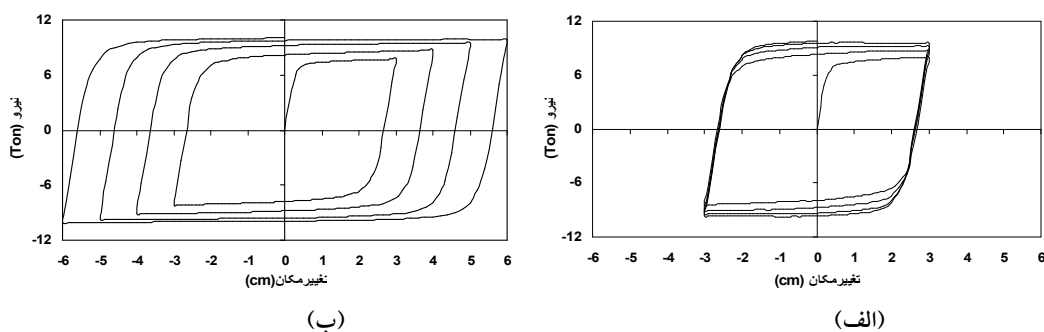
شکل ۲۱- تأثیر تعداد پلیسه‌ها بر اتلاف انرژی لوله آکاردئونی با جداره دایره‌ای شکل



شکل ۲۳- تأثیر توأم ضخامت، شعاع لوله و شعاع پلیسه‌ها در اتلاف انرژی لوله آکاردئونی با جداره دایره‌ای شکل در یک سیکل

و شعاع لوله چنین نتیجه می‌شود که به ازای حجم واحد مصالح تأثیر ضخامت بر اتلاف انرژی حدوداً ۱۰ برابر تأثیر شعاع لوله است. تأثیر توأم پارامترهای هندسی بر اتلاف انرژی در لوله نیز مورد مطالعه قرار گرفته است که شکل (۲۳) نمونه‌ای از آن را نشان می‌دهد. در این نمودار نسبت بی بعد  $\frac{tR}{r^2}$  در مقابل انرژی تلف شده برای لوله آکاردئونی با جداره دایره‌ای شکل، مصالح تیپ ۱ و تعداد پلیسه ۱۱ نمایش داده شده است. در شرایط قید شده انتخاب عدد  $\frac{4}{25}$  برای

آن‌هاست. از این رو در لوله‌های با جداره دایره‌ای شکل به عنوان نمونه و با در نظر گرفتن مصالح تیپ ۱ برای آنها مطالعه پارامتریک صورت گرفته و تأثیر پارامترهای ضخامت جداره، شعاع لوله، تعداد و شعاع پلیسه‌ها بر میزان اتلاف انرژی در یک سیکل بررسی شده است که در شکل‌های (۱۹) الی (۲۲) مشاهده می‌شود. افزایش ضخامت و شعاع لوله باعث افزایش انرژی تلف شده، و افزایش تعداد و شعاع پلیسه‌ها باعث کاهش اتلاف انرژی در لوله می‌گردد. در مقایسه تأثیر ضخامت جداره



شکل ۲۴- رفتار چند سیکلی لوله جدار نازک آکاردئونی در دو حالت

(الف) دامنه تغییر مکانی ثابت، (ب) دامنه تغییر مکانی متغیر

جدول ۶- تأثیر نوع مصالح فولادی بر رفتار لوله‌های جدار نازک آکاردئونی

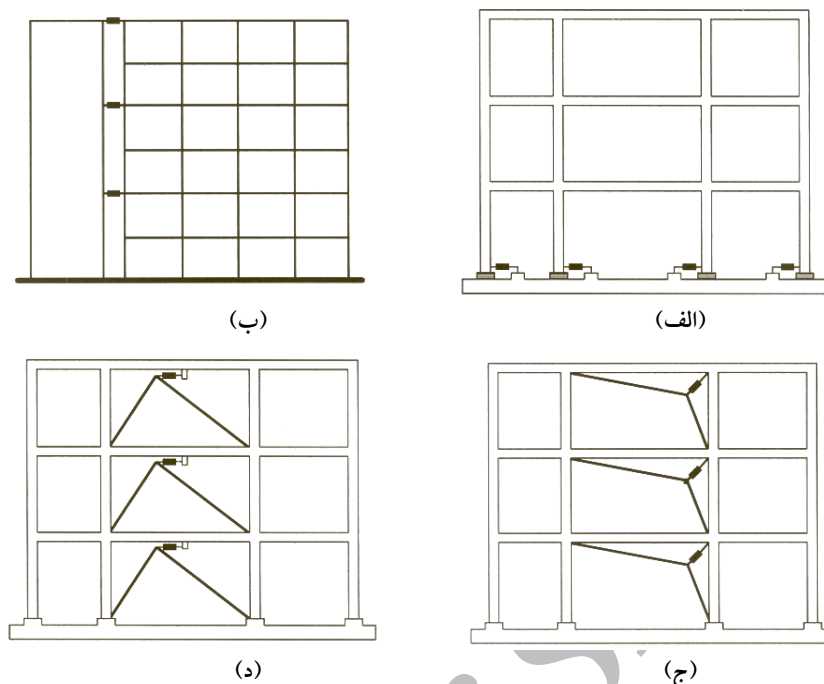
| تیپ مصالح | نوع فولاد | انرژی تلف شده (Ton-cm) | حداکثر کرنش فشاری (%) | ظرفیت باربری (Ton) | سختی الاستیک (Ton/cm) |
|-----------|-----------|------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| ۱         | A 36      | ۶۰                     | ۹/۴۷                  | ۶/۸                | ۲۳                    |
| ۲         | A 304     | ۵۷                     | ۹/۱۴                  | ۶/۴                | ۲۳                    |
| ۳         | A 440     | ۷۸                     | ۱۳/۰۹                 | ۸/۲                | ۲۳                    |

نسبت  $\frac{tR}{r_2}$ ، حداکثر اتلاف انرژی را در لوله ارایه می‌دهد. یامازاکی و هن در مطالعات پارامتری مشابهی تأثیر شعاع و ضخامت جداره لوله را در ظرفیت باربری و انرژی تلف شده لوله‌های جدارنازک صاف بررسی کرده و نشان دادند با افزایش شعاع و ضخامت جداره، ظرفیت باربری و انرژی تلف شده در اثر ضربه افزایش می‌یابد [۷]. سینگیس و السوبکی نیز با آزمایش لوله‌های موجدار تحت ضربه نشان دادند با افزایش عمق پلیسه‌ها ظرفیت باربری کمتر ولی یکنواختی رفتار پلاستیک بیشتر می‌شود. [۱۳].

ظرفیت اتلاف انرژی لوله را نیز افزایش می‌دهد. استفاده از مصالح تیپ ۲ و ۳ به دلیل توانایی تحمل طول کشیدگی زیاد یا دارا بودن کرنش حد گسیختگی بالا در به تعویق انداختن مکانیسم پارگی لوله کمک می‌کند. ضمن اینکه این دو تیپ به خاطر شکل پذیری زیاد برای شکل دهی لوله و آکاردئونی کردن آن نیز مناسب‌ترند [۱۳].

به منظور بررسی رفتار سیکلیک لوله‌های جدار نازک آکاردئونی و اثرات زوال نظیر افت سختی و کاهش مقاومت، از تحلیل یک نمونه با جداره دایره‌ای شکل و مصالح تیپ ۳ استفاده شده است. تحلیل با بارگذاری سیکلیک و در دو حالت با دامنه تغییر مکانی ثابت و متغیر صورت گرفته است. منحنیهای هیستریزس حاصله در شکل (۲۴) مشاهده می‌شود. در حالت دامنه ثابت انطباق چرخه‌ها بر یکدیگر پایداری دینامیکی لوله‌ها را نشان می‌دهد. همچنین در حالت دامنه متغیر هیچ گونه افت سختی در سیستم مشاهده نمی‌شود و در سیکلهای بالاتر مقاومت اندکی نیز افزایش یافته است.

تأثیر نوع فولاد بر رفتار لوله‌های جدارنازک آکاردئونی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این مطالعه برای یک لوله آکاردئونی با جداره دایره‌ای شکل، ضخامت جداره ۳ میلیمتر، قطر ۱۷۵ میلیمتر، با ۱۱ عدد پلیسه و شعاع پلیسه ۱۰ میلیمتر و در تغییر شکل (۳) سانتیمتر در جدول (۶) آورده شده است. این مطالعه نشان می‌دهد استفاده از مصالح تیپ ۳ علاوه بر اینکه ظرفیت باربری بیشتری را موجب می‌شود



شکل ۲۵- کاربرد میراگر فلزی آکاردئونی در مقاوم سازی لرزه‌ای قابها و موقعیت قرارگیری آنها  
 الف) استفاده در جداسازی لرزه‌ای، ب) استفاده در کنترل تغییر مکانهای مطلق طبقات،  
 ج) استفاده در بادبندهای با مکانیسم تغییر شکل بزرگ، د) استفاده در بادبندهای شورن و کنترل تغییر مکان نسبی طبقات

## ۵- کاربرد

استفاده از میراگرهای جذب انرژی در کنترل ارتعاشات ساختمان در حین زلزله، سالهاست مورد توجه قرار گرفته است. میراگرهای فلزی جاری شونده با تمرکز خسارت در خود، سایر اجزای سازه‌ای را در محدوده الاستیک نگاه داشته و پاسخهای دینامیکی سازه را کاهش می‌دهند [۱۷]. همچنین به منظور مقاوم سازی لرزه‌ای ساختمانها نیز وسایل مناسبی اند و با هزینه اندک و سرعت اجرای بالا، رفتار لرزه‌ای سازه‌های موجود را بهبود می‌بخشند [۱۸].

با مطالعات انجام گرفته چنین به نظر می‌رسد که از لوله‌های جدار نازک آکاردئونی می‌توان به عنوان میراگر فلزی جاری شونده با عملکرد محوری استفاده کرد. در اینجا به چند نمونه از کاربردهای این میراگر در مقاوم سازی لرزه‌ای قابهای ساختمانی اشاره شده و جانمایی این قطعات در هندسه قابها تشریح می‌شود. در شکل (۲۵-الف) توانایی استفاده از این

قطعات در جداسازی لرزه‌ای در پایه<sup>۲۳</sup> ساختمانها نشان داده شده است. میراگر فلزی آکاردئونی به عنوان یک دمپر و به صورت سری با ایزولاتور لاستیکی می‌تواند عمل کند. در شکل (۲۵-ب) امکان استفاده از این میراگر در کنترل تغییر مکانهای مطلق طبقات ساختمان و از طریق اتکا به یک سیستم سخت خارجی ملاحظه می‌شود. این روش افزاینده سختی و میرایی برای ساختمانهایی است که امکان مقاوم سازی از داخل و بر روی قابهای آنها امکانپذیر نیست. مشابه این کاربرد را می‌توان در حد فاصل بین دو ساختمان مجاور هم و به منظور کاهش اثرات تنه زدگی<sup>۲۴</sup> ناشی از زلزله استفاده کرد. در شکل (۲۵-ج) میراگر به عنوان یک قطعه در مکانیسم تغییر شکل بزرگ کار می‌کند و با تحمل تغییر شکلهای بزرگ، تغییر مکانهای کوچک طبقات را محدود می‌سازد. شکل (۲۵-د) نحوه کارکرد این قطعه را در کنترل تغییر مکان نسبی طبقه و از طریق اتصال به بادبند شورن نشان می‌دهد. در این وضعیت



میراگر تنها تحت بارمحوری قرار می‌گیرد و به شرط کنترل حرکت خارج از صفحه آن می‌تواند پاسخهای طبقات را محدود سازد. لازمه کاهش پاسخهای دینامیکی قابها با میراگرهای فلزی آکاردئونی، سازگاری رفتار قاب و میراگر است که تحلیل و طراحی همزمان آنها را با توجه به اندرکنش نیرویی و سختی بین آنها طلب می‌کند. در این زمینه مباحث بسیاری مطرح شده ولی مطالعات مفصلتری باید انجام گیرد [۱۴].

## ۶- نتیجه گیری

- مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های کوچک لوله‌های جدار نازک آکاردئونی نشان داده است این قطعات اتلاف انرژی خوبی در مکانیسم تغییر شکل محوری رفت و برگشتی دارند. تغییر مکانی حدود ۷ سانتیمتر را تا حدود ۷۰ سیکل در وضعیتی پایدار تحمل کرده و دچار پارگی و گسیختگی نشدند. انطباق چرخه‌های هیستریزس روی یکدیگر نشان می‌دهد در مکانیسم تغییر شکل این قطعات زوال وجود ندارد.
- مطالعات تحلیلی بر روی نمونه‌های بزرگتر نشان داده است توزیع تنش ون میسس در جداره لوله‌های جدار نازک آکاردئونی در اثر تغییر شکل محوری نسبتاً یکنواخت است. منحنیهای هیستریزس در آنها چاق بوده و از نظر اتلاف انرژی رفتاری شبیه به میراگرهای متداول ADAS و TADAS دارند.
- با تغییر هندسه جداره لوله‌های آکاردئونی، سطح اتلاف انرژی، ظرفیت باربری و سختی الاستیک قابل کنترل است و با انتخاب پارامترهای هندسی مناسب برای شکل جداره می‌توان به مقادیر مطلوب در محدوده کاربرد در قابهای ساختمانی دست یافت.
- از میان شکلهای انتخاب شده برای تحلیل، لوله با جداره سینوسی شکل دارای بیشترین سختی الاستیک، بیشترین ظرفیت باربری و بیشترین اتلاف انرژی نسبت به سایر نمونه‌ها بوده است.

- براساس نتایج این تحقیق و منحنیهای سختی می‌توان با انتخاب پارامترهای هندسی به سختی مورد نیاز برای تقویت لرزه‌ای قابها دست یافت. سختی الاستیک میراگر فلزی مبنای طراحی قاب و میراگر است.
- اثر پارامترهای ضخامت جداره و قطر لوله بر اتلاف انرژی، یک تأثیر افزایشنده و طول لوله و شعاع پلیسه‌ها تأثیری کاهنده است. پارامتر ضخامت جداره مؤثرترین عامل بر آهنگ افزایش اتلاف انرژی در لوله‌های جدار نازک آکاردئونی است.
- با مطالعه اثر توأم پارامترهای هندسی می‌توان به نسبت بهینه برای بیشترین اتلاف انرژی در لوله‌های جدار نازک آکاردئونی دست یافت. این نسبت  $(\frac{tR}{I^2})$  برای لوله با جداره دایره ای شکل برابر ۴/۲۵ است.
- براساس نتایج تحلیلی، در رفتار چرخه ای لوله‌های جدار نازک آکاردئونی، زوال، کاهش مقاومت و افت سختی دیده نمی‌شود. این یک ویژگی ممتاز برای رفتار این قطعات است که می‌توان از آنها به عنوان میراگر فلزی جاری شونده استفاده کرد.
- مطالعه تأثیر مصالح نشان داده است نوع فولاد بر میزان انرژی تلف شده و ظرفیت باربری لوله‌های جدارنازک آکاردئونی مؤثر است. فولادهای A304 و A440 به دلیل دارا بودن کرنش حد نهایی بالاتر، پتانسیل اتلاف انرژی و ظرفیت باربری بیشتری را در این لوله‌ها ایجاد می‌کند.
- لوله‌های جدارنازک آکاردئونی به عنوان میراگر فلزی جاری شونده در مقاوم سازی لرزه‌ای قابها کاربرد خواهند داشت و می‌توان از آنها در جداسازی لرزه‌ای از پایه، کنترل تغییر مکانهای مطلق طبقات و کنترل تغییر مکان نسبی طبقات استفاده کرد.

## تشکر و قدردانی

نمونه‌های مورد آزمایش در این تحقیق توسط شرکت ارتعاشات صنعتی ایران ساخته شده است که بدین وسیله از

سازه پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله انجام شده که از مسئولین و کارکنان آن قدردانی می شود.

زحمات و راهنماییهای مدیران و کارشناسان آن شرکت تشکر می شود. همچنین آزمایشات مربوطه نیز در آزمایشگاه مهندسی

## واژه نامه

- |   |                                 |                           |
|---|---------------------------------|---------------------------|
| 1. straight thin-walled tube                | 9. mushrooming buckling         | 18. stainless steel       |
| 2. axial buckling                           | 10. square thin-walled tube     | 19. Roell Amsler          |
| 3. inversion                                | 11. compact                     | 20. deterioration         |
| 4. splitting                                | 12. noncompact                  | 21. stiffness degradation |
| 5. Euler buckling                           | 13. groove                      | 22. strength reduction    |
| 6. diamond buckling                         | 14. corrugated thin-walled tube | 23. base isolation        |
| 7. concertina buckling                      | 15. accordion thin-walled tube  | 24. pounding              |
| 8. surface response approximation technique | 16. hysteretic metallic damper  |                           |
|   | 17. Von Mises                   |                           |

## مراجع

- Soong, T., and Dargush, G. F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, 3<sup>rd</sup> ed., p. 27, John Willey & Sons Ltd., London and New York, 1997.
- Aoyama, H., "Technological Development of Earthquake Resistant Structures," Expert Committee on Advanced Technology for Building Structures, Tokyo, Japan, 1987.
- Whittaker, A. S., Bertero, V. V., Thompson, C. L., and Alonso, L. J., "Earthquake Simulator Testing of Steel Plate Added Damping and Stiffness Elements," EERC-89/02, University of California at Berkeley, California, 1989.
- Tsai, K. C., Chen, H. W., Hong, C. P., and Su, Y. F., "Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic Resistant Construction," *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3, pp. 505-528, 1993.
- Dargush, G. F., Cho, H., and Sant, R. S., "Cyclic Elastoplastic Analysis of Metallic Dampers for Seismic Energy Dissipation," *Proceedings of the Seventh U. S. National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, USA., Paper No. 1058, 2002.
- Reid, S. R., "Plastic Deformation Mechanisms in Axially Compressed Metal Tubes Used as Impact Energy Absorbers," *International Journal of Mechanical Science*; Vol. 35, No. 12, pp. 1035-1052, 1993.
- Yamazaki, K., and Han, J., "Maximization of the Crushing Energy Absorption of cylindrical Shells," *Advances in Engineering Software*, Vol. 31, pp. 425-434, 2000.
- Wang, B., and Lu, G., "Mushrooming of Circular Tubes Under Dynamic Axial Loading," *Thin-Walled Structures*, Vol. 40, pp. 167-182, 2002.
- Bardi, F.C., Yan, H.D., and Kyriakides, S., "On the Axisymmetric Progressive Crushing of Circular Tubes Under Axial Compression," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, pp. 3137-3155, 2003.
- Karagiozova, D., and Jonse, N., "Dynamic Buckling of Elastic-Plastic Square Tubes Under Axial Impact-II: Structural Response," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 30, pp. 167-192, 2004.
- Hosseinipour, S. J., and Daneshi, G. H., "Energy Absorption and Mean Crushing Load of thin-walled Grooved Tubes Under Axial Compression," *Thin-Walled Structures*, Vol. 41, pp. 31-46, 2003.
- Daneshi, G. H., and Hosseinipour, S. J., "Grooves Effect on Crashworthiness Characteristics of thin-walled tubes Under Axial Compression," *Journal of Materials and Design*, Vol. 23, pp. 611-617, 2003.
- Singace, A. A., and El-Sobky, H., "Behaviour of Axially Crushed Corrugated Tubes," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 39, No. 3, pp. 249-268, 1997.
- معمدی، م.، "مطالعه تجربی کاربرد میراگر فلزی آکاردئونی در مقاوم سازی لرزه ای قابهای فولادی،" پیشنهاد رساله دکتری مهندسی عمران-گرایش سازه و زلزله، زیر نظر دکتر فریبرز ناطقی الهی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ۱۳۸۱.
- Motamedi, M., and Nateghi-A., F., "Using Accordion Thin-Walled Tubes As A Hysteretic Metallic Damper," *Proceedings of the Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver BC, Canada. Paper No. 2264, 2004.
- Timoshenko, S., *Theory of Elasticity*, 3<sup>rd</sup> ed., p. 314, McGraw-Hill, New York, 1970.

۱۷. معتمدی، م. و یوسف پور، ه.، "مطالعه تحلیلی اثر میراگرهای جذب انرژی در توزیع خسارت لرزه‌ای در ساختمانهای بتنی مسلح"، مجموعه مقالات اولین کنفرانس ایمن سازی و بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، جلد ۱، ص ۱۱۸-۱۲۵، ۱۳۸۱.

۱۸. معتمدی، م. و ناطقی الهی، ف. و یوسف پور، ه.، "ارزیابی رفتار لرزه‌ای ساختمانهای بتنی مسلح مقاوم شده با میراگر فلزی جاری شونده براساس تحلیل دینامیکی خطی"، مجموعه مقالات ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، جلد ۱، ص ۵۹-۶۶، ۱۳۸۲.

Archive of SID