



مطالعه عددی رفتار لوله‌های فلزی مشبک و تأثیر اندازه سطح مقطع و چند لایه کردن لوله‌ها تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری با سرعت کم

علی قدس بین جهرمی^{۱*}، حسین حاتمی^۲

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
^۲دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۶ دی ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۶ اسفند ۱۳۹۴
پذیرش: ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۲۳ مرداد ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

لوله‌های فلزی مشبک
اجزا محدود
بارگذاری ضربه‌ای
اندازه سطح مقطع
چند لایه کردن لوله

چکیده: در این مقاله عملکرد لوله‌های فلزی مشبک تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری ارائه شده است. از ورق‌های فلزی مشبک به صورت استوانه‌ای به عنوان جاذب انرژی استفاده شده است. ورق‌های فلزی جدار نازک مشبک نسبت به وزن کمی که دارند دارای ظرفیت جذب انرژی بالایی هستند. جهت سلولی ورق‌های فلزی مشبک بر روی رفتار لوله فلزی مشبک تأثیر زیادی می‌گذارد. در این مطالعه از ورق‌های فلزی با زاویه سلولی $\alpha=0$ برای ایجاد لوله‌های فلزی مشبک به عنوان جاذب انرژی استفاده شده است. در این پژوهش، به منظور بررسی عملکرد لوله‌های فلزی مشبک در اثر فروریزش و دستیابی به جذب انرژی حداکثری، به مطالعه عددی تأثیر اندازه سطح مقطع و چند لایه کردن لوله‌های فلزی در رفتار جاذب انرژی پرداخته شده است. مطالعات عددی به وسیله نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس انجام شده است. خروجی نرم‌افزار آباکوس به صورت نمودار نیرو جابه‌جایی نمایش داده شده است. در این پژوهش، بررسی عددی نوع فروریزش، نمودارهای نیرو جابه‌جایی و پارامترهای مؤثر انجام شده است. از نتایج به دست آمده مشاهده شد که افزایش اندازه سطح مقطع و چند لایه کردن لوله‌های فلزی تأثیر قابل توجهی در نیروی لهیدگی بیشینه اولیه و ظرفیت جذب انرژی لوله‌های فلزی مشبک دارد و چند لایه کردن لوله‌های فلزی موجب بهبود بازده لهیدگی می‌شود.

کاهش سرعت ضربه یا افزایش دما کاهش می‌یابد؛ اما تأثیر ضخامت جداره در کاهش نیروی بیشینه بیشتر است.

پدیده کماتش در بارگذاری ضربه‌ای یکی از مواردی است که مورد توجه قرار می‌گیرد. اگر سازه تحت بارگذاری ضربه‌ای دچار کماتش شود سبب فروریزش نامتقارن سازه می‌شود و ظرفیت جذب انرژی کاهش می‌یابد؛ به همین دلیل مطالعه‌هایی بر روی کماتش سازه‌ها و نیروی شکست تحت بارگذاری ضربه‌ای صورت گرفته است [۸، ۹].

م.وهوانگ^۲ و همکاران [۱۰]، به مطالعه عددی ورق‌های فولادی با مقاومت بالا به صورت استوانه‌ای که در قسمتی از آن حفره بیضوی وجود دارد، تحت بارگذاری ضربه‌ای پرداخته است و تأثیر ایجاد حفره بیضوی در جداره ورق بر روی ظرفیت جذب انرژی و سازوکار فروریزش را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که محل قرار گرفتن حفره بیضوی بر روی کماتش و جذب انرژی تأثیر می‌گذارد. وجود حفره در وسط لوله باعث ایجاد کماتش کلی می‌شود و هرچه حفره به ابتدای لوله و محل اعمال نیرو نزدیک باشد، باعث چین خوردگی منظم لوله می‌شود. وجود حفره باعث کاهش نیروی بیشینه اولیه می‌شود و تأثیر قابل توجهی روی جذب انرژی لوله می‌گذارد. جی.سونگ^۳ و همکاران [۱۱]، الگوهای پنجره‌ای در جاذب‌های با

۱- مقدمه

امروزه استفاده از سازه‌های جدارنازک در برنامه‌های کاربردی جذب انرژی در حال توسعه است؛ به طور کلی مطالعه عملکرد این نوع سازه‌ها تحت شرایط بارگذاری مختلف بهبود یافته است. سازه‌های جدارنازک دارای ظرفیت جذب انرژی بالایی هستند؛ به همین دلیل در صنایع مختلف به عنوان جاذب انرژی استفاده می‌شوند. ضربه‌گیرها و جاذب‌ها، انرژی جنبشی ناشی از برخورد را به وسیله فروریزش سازه و انجام کار پلاستیک هدر می‌دهند. این نوع ضربه‌گیرها برگشت‌ناپذیر هستند و بعد از تغییر شکل دیگر قابل استفاده نمی‌باشند؛ بنابراین در طراحی این نوع جاذب‌ها مطالعه‌ها عمدتاً بر روی خواص مواد، پارامترهای هندسی و وجود و یا عدم وجود نقص در رفتار سازه به منظور دستیابی به جذب انرژی بیشتر متمرکز شده است [۶-۱]. ژئی یانگ^۱ و همکاران [۷]، به بررسی جذب انرژی لوله‌های دایره‌ای تحت بارگذاری ضربه‌ای پرداخته‌اند. نیروی میانگین لهیدگی به نرخ کرنش مواد و سختی مواد بستگی دارد. نیروی بیشینه در طول کماتش به طور قابل توجهی به نرخ کرنش مواد بستگی دارد و مشاهده شده است که در حین چین خوردگی نیروی بیشینه روند کاهشی دارد. نیروی بیشینه اولیه با

2 M.Y.Huang

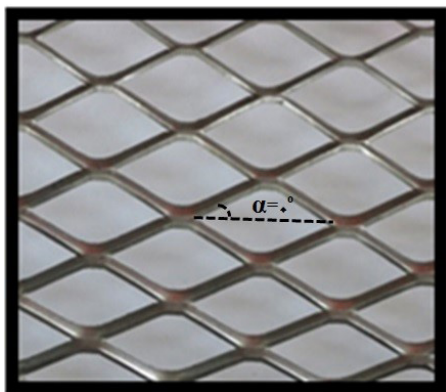
3 Jie song

1 Zye Yang

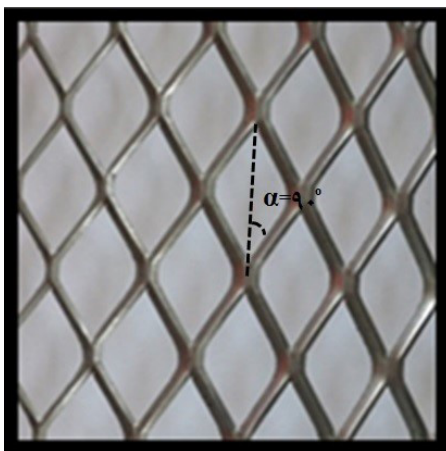
نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ali.ghodsbin.j@gmail.com

منجر به افزایش ظرفیت جذب انرژی می‌شود.

در آزمایش‌های انجام شده بر روی لوله‌های فلزی مشبک، مشخص شد که رفتار این نوع لوله‌های فلزی تحت بارگذاری ضربه‌ای به جهت سلول‌های ورق مشبک وابسته است. شکل ۱ جهت سلولی در ورق‌های فلزی مشبک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، در اثر بارگذاری ضربه‌ای، لوله‌های فلزی مشبک با زاویه سلولی $\alpha=0$ دارای سازوکار فروریزش متقارن می‌باشند و در اثر نیروی ضربه‌ای سلول‌ها بر روی یکدیگر بسته می‌شوند. بسته شدن سلول‌ها روی یکدیگر باعث منظم و یکنواخت بودن نمودار نیرو-جابجایی و جذب بهتر انرژی می‌شود. لوله‌های فلزی مشبک با زاویه $\alpha=90$ دچار کماتش کلی شده و فروریزش خوبی ندارد و کماتش ایجاد شده باعث شده است که نمودار نیرو-جابجایی یکنواخت نباشد، نمودار روند کاهشی داشته باشد و در نتیجه جذب انرژی کاهش می‌یابد. (شکل ۳) از آزمایش‌های انجام شده در مطالعه تجربی ورق‌های فلزی مشبک این نتیجه حاصل می‌شود که جاذب‌های مشبک با زاویه $\alpha=0$ در بارگذاری ضربه‌ای محوری دارای سازوکار فروریزش متقارن هستند و ظرفیت جذب انرژی بالایی دارند؛ یکی از پارامترهای مهم در بررسی



$\alpha=0$ (۱)



$\alpha=90$ (۲)

Fig. 1. Cells direction

شکل ۱: جهت سلولی ورق‌های مشبک [۱۹]

سطح مقطع مربعی را به منظور کاهش وزن سازه معرفی کرده‌اند و این نوع جاذب‌ها را تحت نیروی فشاری مورد بررسی قرار داده‌اند. با توجه به آزمایش‌های تجربی انجام شده، مشاهده می‌شود که جاذب‌های با الگوی پنجره‌ای عملکرد بهتری نسبت به جاذب‌های معمولی دارند و تا حد زیادی موجب کاهش نیروی بیشینه اولیه و افزایش مقدار انرژی جذب شده، می‌شوند. ایجاد الگوهای پنجره‌ای منجر به این می‌شود که فروریزش جاذب از محل پنجره‌ها آغاز شود و نیروی بیشینه اولیه را کاهش دهد. با این روش فروریزش و لهیدگی زودتر آغاز شده و نیروی ناشی از برخورد را کاهش می‌دهد.

مطالعه‌هایی به صورت تجربی و عددی بر روی فروریزش الماسی جاذب انرژی جدارنازک لوله‌ای دارای سرپوش تحت بار دینامیکی انجام گرفته است. از نتایج به‌دست آمده، مشاهده شد که سرپوش باعث تقویت جاذب و در نتیجه جذب انرژی بیشتر در طول لهیدگی کمتر می‌شود. همچنین این نوع جاذب‌ها دارای رفتار خطی در جذب انرژی نسبت به طول لهیدگی هستند [۱۲].

مطالعه‌های انجام شده بر روی پوسته‌های مخروطی جدارنازک تحت بار دینامیکی محوری نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌ها با مدهای الماسی و چندضلعی فروریزش می‌کنند و مطابقت خوبی بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد. همچنین تغییر ضخامت بیشترین اثرگذاری را بر روی رفتار فروریزش این نوع پوسته‌ها دارد [۱۳].

نیک‌نژاد و همکاران [۱۴]، به ارائه روابط نظری برای پیش‌بینی نیروی لهیدگی و انرژی جذب شده در اثر لهیدگی لوله‌های چهار وجهی پر شده به وسیله فوم پرداخته‌اند و مشخص شد که پیش‌بینی نظری ارتباط خوبی با نتایج تجربی دارد. همچنین مطالعاتی به صورت نظری و تجربی بر روی لهیدگی عرضی ستون‌های مربعی انجام داده‌اند و بیان کردند که افزایش طول و ضخامت باعث افزایش جذب انرژی می‌شود و ستون‌های آلومینیومی دارای جذب انرژی ویژه بالاتری هستند.

گراسیانو^۱ و همکاران [۱۵-۱۹]، نخستین بار به معرفی جاذب‌های انرژی مشبک تحت بارگذاری شبه استاتیکی پرداخته‌اند. مطالعه‌های انجام شده بر روی این نوع جاذب‌ها نشان می‌دهد که سازوکار فروریزش و ظرفیت جذب انرژی جاذب به جهت سلول‌ها بستگی دارد. گراسیانو و همکاران بعد از معرفی این نوع جاذب‌ها، مطالعاتی را به صورت تجربی و عددی به منظور بهبود ظرفیت جذب انرژی جاذب و کاهش نیروی بیشینه اولیه انجام داده‌اند. مطالعه‌های انجام شده بیشتر بر روی تعداد سلول‌های سطح مقطع و نوع سطح مقطع (دایره‌ای و مربعی)، به منظور بهبود عملکرد این نوع جاذب‌ها انجام شده است. رفتار جاذب‌های مربعی بسیار شبیه به جاذب‌های مشبک استوانه‌ای می‌باشد و ویژگی‌های جذب انرژی به طور قابل توجهی در جاذب‌های مربعی بهبود یافته است. استفاده از جاذب دایره‌ای و مربعی به صورت ترکیبی باعث می‌شود که با فروریزش جاذب و برهم‌کنش بین آنها

1 Graciano

به منظور بهبود عملکرد این نوع لوله‌های فلزی و افزایش ظرفیت جذب انرژی آنها و بهینه کردن میزان لهیدگی لوله در برابر جذب انرژی، به گونه‌ای که با کمترین میزان لهیدگی بیشترین جذب انرژی حاصل شود، افزایش سطح مقطع و چند لایه کردن لوله فلزی معرفی شده است و برای بررسی تأثیر آن بر روی نیروی بیشینه اولیه، ظرفیت جذب انرژی و پارامترهای دیگر به مطالعه عددی این نوع لوله‌های فلزی مشبک پرداخته شده است.

به منظور صحت سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی به مقایسه نحوه فروریزش لوله فلزی مشبک پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، نحوه فروریزش و لهیدگی لوله فلزی مشبک با زاویه سلولی صفر درجه حاصل از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری با یکدیگر یکسان می‌باشند و برای هر دو حالت نحوه فروریزش به صورت متقارن است.

۲- شبیه‌سازی عددی

به منظور بررسی تأثیر اندازه سطح مقطع و چند لایه کردن جذب تحت بارگذاری ضربه‌ای بر روی نیروی بیشینه اولیه و ظرفیت جذب انرژی، این نمونه‌ها در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده‌اند.

۲-۱- شبیه‌سازی اجزا محدود و پارامترهای مؤثر

برای بررسی عددی جاذب‌های انرژی مشبک از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس نسخه ۶،۱۴ استفاده شده است. مشخصات نمونه‌ها در جدول ۱ و شکل ۵ نشان داده شده است. تمامی نمونه‌ها دارای زاویه سلولی $\alpha=0$ می‌باشند. در جدول ۱، N_C تعداد سلول‌های محیطی، N_L تعداد سلول‌های طولی، N_T تعداد لایه‌ها، D قطر نمونه، L طول، جرم ضربه زننده ۱۰۰ کیلوگرم و سرعت ضربه زننده ۶ متر بر ثانیه می‌باشد. سلول مورد نظر دارای قطرهای $l_1=35$ و $l_2=30$ میلی‌متر، ضخامت $t=2$ میلی‌متر و پهنای $w=3$ میلی‌متر می‌باشد.

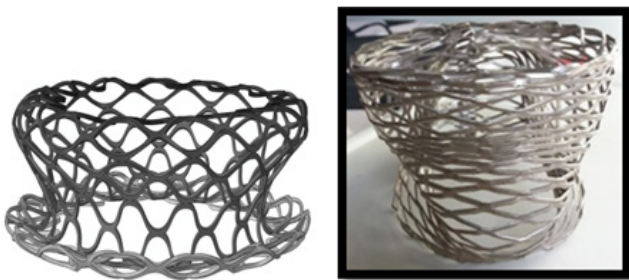


Fig. 4. Experimental and numerical collapse

شکل ۴: فروریزش عددی و تجربی لوله فلزی مشبک

جنس ورق استفاده شده در شبیه‌سازی عددی فولاد می‌باشد که دارای مدول الاستیسیته ۲۱۱ گیگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۳ و چگالی ۷۸۰۰

- 1 Number of Circular Cells
- 2 Number of Longitudinal Cells
- 3 Number of Tube

جاذب‌های انرژی که به آن توجه می‌شود، انرژی ویژه یا بازده انرژی (SEA) می‌باشد. این پارامتر از نسبت انرژی جذب شده توسط جاذب بر جرم جاذب به دست می‌آید. لوله‌های فلزی مشبک دارای وزن کمی هستند و انرژی زیادی را جذب می‌کنند و هدف از محاسبه این پارامتر بیان جرم کم ورق‌های فلزی مشبک بوده است. [۲۰]



Fig. 2. Collapse of tubes with cell angle $\alpha=0$ and $\alpha=90$

شکل ۲: فروریزش جاذب با زاویه سلولی مختلف [۲۰]

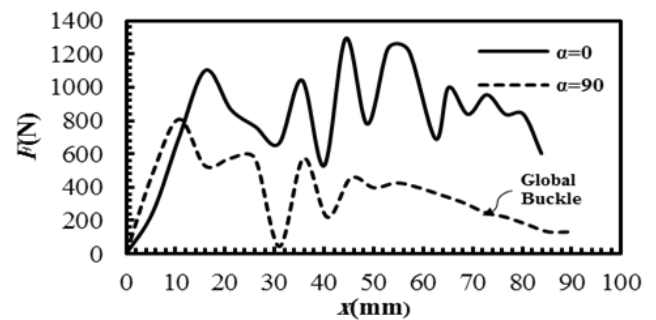


Fig. 3. Force-displacement curve for tubes with cell angle $\alpha=0$ and $\alpha=90$

شکل ۳: نمودار نیرو-جابجایی برای دو نمونه با زاویه سلولی صفر و نود درجه [۲۰]

در مطالعه‌ای که به صورت عددی و تجربی تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری بر روی لوله‌های فلزی مشبک صورت گرفته است، مشخص شد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی انطباق خوبی با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی دارد و می‌تواند جایگزین مناسبی برای نتایج تجربی باشد. همچنین مشخص شد که در لوله‌های فلزی مشبک افزایش تعداد سلول‌های طولی تأثیر قابل توجهی بر روی نیروی بیشینه اولیه و نیروی میانگین ندارد و افزایش تعداد سلول‌های طولی باعث افزایش ظرفیت جذب انرژی می‌شود. همچنین باید توجه شود که افزایش بیش از حد طول نسبت به قطر جاذب باعث ایجاد کماتش کلی می‌شود که در طراحی باید این پارامتر در نظر گرفته شود. [۲۱]

در مطالعاتی که به صورت تجربی و عددی بر روی لوله‌های فلزی مشبک انجام گرفته است، مشخص شد که این نوع لوله‌ها به خصوص لوله‌های فلزی مشبک با زاویه سلولی $\alpha=0$ عملکرد خوبی در برابر نیروی ضربه‌ای دارند و می‌توانند کارایی خوبی به عنوان جاذب انرژی داشته باشند.

جدول ۱: مشخصات نمونه‌ها

Table 1. Specifications of the models

W_m (gr)	L (mm)	D (mm)	N_T	N_L	N_C	نمونه‌ها
۱۷۵	۲۰۲	۱۰۰	۱	۶	۷	مشبک ۱
۲۱۱	۲۰۲	۱۲۰	۱	۶	۹	مشبک ۲
۲۴۷	۲۰۲	۱۴۰	۱	۶	۱۱	مشبک ۳
۲۸۳	۲۰۲	۱۶۰	۱	۶	۱۲	مشبک ۴
۳۱۹	۲۰۲	۱۸۰	۱	۶	۱۵	مشبک ۵
۳۷۶	۲۰۲	۱۲۰	۲	۶	۹-۷	مشبک ۶
۶۳۳	۲۰۲	۱۴۰	۳	۶	۱۱-۹-۷	مشبک ۷
۹۱۶	۲۰۲	۱۶۰	۴	۶	۱۲-۱۱-۹-۷	مشبک ۸
۱۲۳۵	۲۰۲	۱۸۰	۵	۶	۱۵-۱۲-۱۱-۹-۷	مشبک ۹

جدول ۲: ضرایب جانسون-کوک فولاد ASTM A611 [۲۳]

Table 2. Johnson cook coefficient

A (MPa)	B (MPa)	c	n	m	T_m (°C)
۵۵۳/۱	۶۰۰/۸	۰/۰۱۳۴	۰/۲۳۴	۱	۱۴۶۰

مربوط به فولاد را نشان می‌دهد. [۲۲]

$$\sigma = (A + B \varepsilon^n)(1 + C \dot{\varepsilon}_p)(1 - T^{*m}) \quad (۵)$$

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (۶)$$

شرایط بارگذاری شبیه‌سازی شده به صورت دینامیکی می‌باشد؛ به همین منظور از دینامیک/اکسپلیسیت استفاده شده است و زمان حل مسأله ۰/۰۲۸ ثانیه می‌باشد. لوله‌های فلزی مشبک بر روی دو صفحه صلب قرار دارد. صفحه صلب پایینی ثابت بوده و لوله فلزی مشبک روی آن قرار گرفته است. صفحه صلب بالایی دارای جرم ۱۰۰ کیلوگرم می‌باشد و با سرعت ۶ متر بر ثانیه به صورت سقوط آزاد بر روی لوله فلزی مشبک سقوط می‌کند و باعث فروریزش آن می‌شود و صفحه صلب پایینی ثابت می‌باشد و لوله فلزی روی آن قرار می‌گیرد. هنگامی که لوله فلزی مشبک دچار فروریزش می‌شود، سلول‌ها با یکدیگر برخورد می‌کنند. به منظور در نظر گرفتن اندرکنش بین سلول‌ها و تأثیر برخورد سلول‌های له شده در اتلاف انرژی و جذب آن، در قسمت تعریف خصوصیات تماس، تماس کلی بین صفحات صلب و لوله فلزی مشبک تعریف شده است و ضریب اصطکاک ۰/۲ بین آن‌ها تعریف شده است. برای تحلیل عددی، برای صفحات صلب از جزء پوسته‌ای و برای لوله فلزی مشبک از اجزای سه بعدی شش وجهی با ۸ گره C3D8R استفاده شده است و اندازه اجزا ۲ میلی‌متر می‌باشد و نوع مش‌بندی به صورت مش منظم می‌باشد.

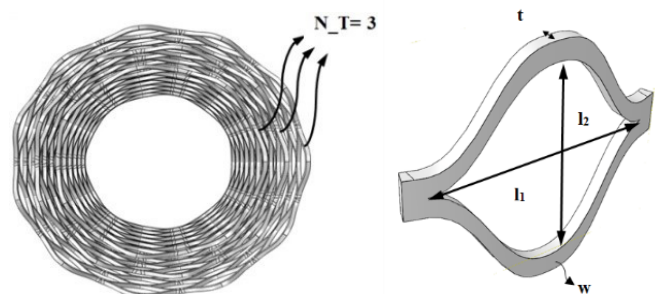


Fig. 5. EMT cell and multi-layer tube

شکل ۵: سلول مشبک و لوله فلزی چند لایه

کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. نیروی بیشینه اولیه (P_{peak})، نیروی میانگین (P_{mean})، ظرفیت جذب انرژی (E_a) و ضریب شکل (η) پارامترهایی هستند که برای سنجش جاذب‌های انرژی استفاده می‌شوند. این پارامترها با روابط ۴-۱ محاسبه می‌شود. [۱۵]

$$E_a = \int_{x_2}^{x_1} F(x) dx \quad (۱)$$

$$P_{mean} = \frac{E_a}{x_2 - x_1} \quad (۲)$$

$$\eta = \frac{P_{mean}}{P_{peak}} \quad (۳)$$

$$SEA = \frac{E_a}{W_m} \quad (۴)$$

در بارگذاری‌های دینامیکی نرخ کرنش مواد در محاسبات مورد توجه قرار می‌گیرد. در این مقاله از مدل جانسون-کوک برای لحاظ کردن نرخ کرنش استفاده شده است. رابطه (۵) و (۶) فرمول جانسون کوک و جدول ۲ ضرایب

$$v = \frac{1}{2}mv^2 \quad (7)$$

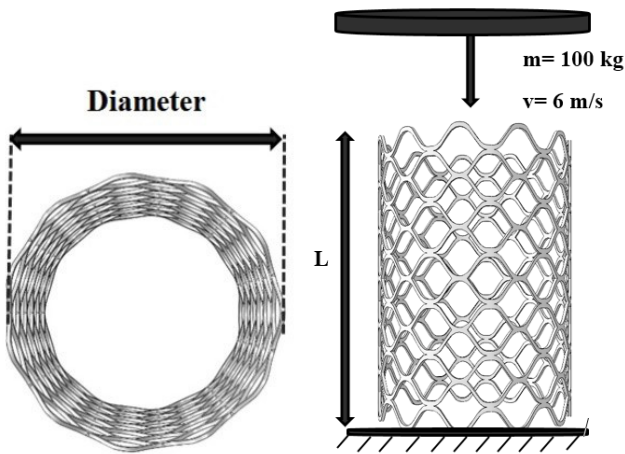


Fig. 8. Boundary condition and loading

شکل ۸: شرایط مرزی لوله‌های فلزی مشبک و نوع بارگذاری

۲-۲- نتایج عددی و بحث

به منظور بررسی تأثیر اندازه سطح مقطع و چند لایه کردن لوله فلزی مشبک، تعداد ۹ نمونه شبیه‌سازی شده است و ظرفیت جذب انرژی و نیروی بیشینه اولیه آنها مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲-۱- بررسی لوله‌های فلزی مشبک تک لایه

در ابتدا به بررسی لوله‌های فلزی مشبک تک لایه پرداخته شده است. لوله‌های تک لایه دارای قطر سطح مقطع متفاوت می‌باشند و به ترتیب قطر سطح مقطع آنها افزایش می‌یابد و تأثیر آن بر روی رفتار لوله بررسی شده است. شکل ۹ نحوه فروریزش لوله‌های فلزی مشبک تک لایه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این تحقیق نمونه‌ها دارای فروریزش متقارن می‌باشند و تمامی سلول‌ها بر روی یکدیگر بسته شده و لهیدگی آنها باعث جذب انرژی ضربه می‌شود.

مقارن بودن فروریزش لوله‌ها منجر به منظم و یکنواخت بودن نمودار نیرو-جابجایی شده است. در شکل ۱۰ نمودارهای تغییرات نیرو-جابجایی مربوط به فروریزش جاذب‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودارها دیده می‌شود، نمودار در ابتدا به حالت بیشینه اولیه می‌رسد. این نیرو مربوط به غلبه بر مقاومت اولیه جاذب بوده و بعد از آن لهیدگی جاذب شروع می‌شود. در ادامه لهیدگی سلول‌ها باعث ایجاد نوسان در نمودار نیرو-جابجایی شده است.

در جدول ۳ و شکل ۱۱ نتایج مربوط به لوله‌های فلزی مشبک تک لایه آورده شده است. همان‌طور که در جدول نتایج مشاهده می‌شود، با افزایش قطر سطح مقطع تعداد سلول‌های محیطی لوله فلزی مشبک افزایش می‌یابد و مقاومت بیشتری در برابر نیروی ضربه و فروریزش از خود نشان می‌دهد و منجر به افزایش نیروی بیشینه اولیه می‌شود و مقدار جذب انرژی بیشتری با

در روش اجزا محدود معمولاً هرچه تعداد اجزا بیشتر باشد جواب مسأله از دقت بیشتری برخوردار است؛ از طرف دیگر افزایش تعداد اجزا باعث افزایش زمان حل مسأله می‌شود. برای به‌دست آوردن تعداد اجزای مناسب باید حساسیت یک پارامتر خاص را با افزایش تعداد اجزا بررسی نمود. به همین منظور در این تحقیق اثر اندازه اجزا بر میزان جذب انرژی برای لوله فلزی مشبک ۱ مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است.

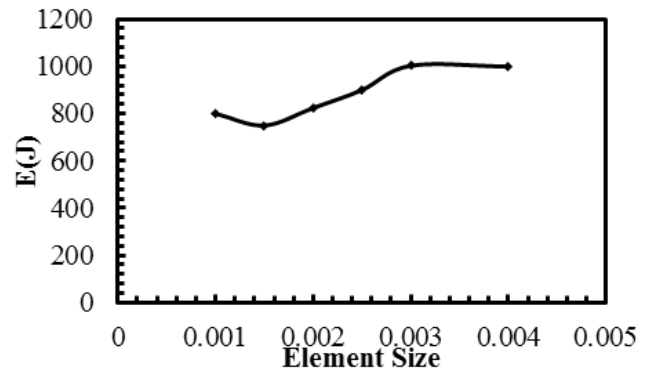


Fig. 6. Convergence of mesh

شکل ۶: همگرایی مش

برای شبیه‌سازی و بررسی لوله‌های فلزی مشبک به عنوان جاذب انرژی، ابتدا تحلیل کمانشی روی لوله فلزی مشبک انجام گرفته شده است و مدهای کمانش این نوع لوله‌ها محاسبه شده است. برای کاهش سختی اولیه لوله فلزی و نزدیک شدن پاسخ‌ها به واقعیت، ضریبی از نیروی بحرانی کمانش لوله‌های فلزی به عنوان عیوب برای آنها در نظر گرفته شده است. مقدار این ضریب $1e-8$ می‌باشد و برای تمامی نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. مقادیر نیروی بحرانی کمانش (F_{cr}) لوله‌های فلزی مشبک در جدول ۳ و جدول ۴ آورده شده است.

در شکل ۷، ۴ مد از کمانش تیوب مشبک ۱ قابل مشاهده می‌باشد.

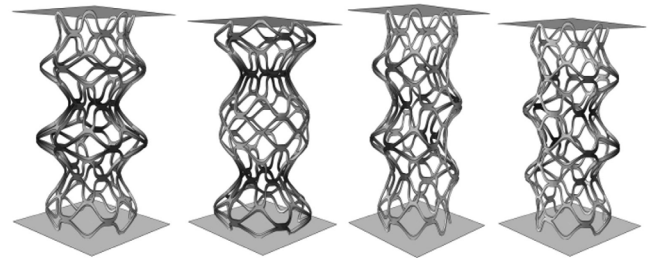
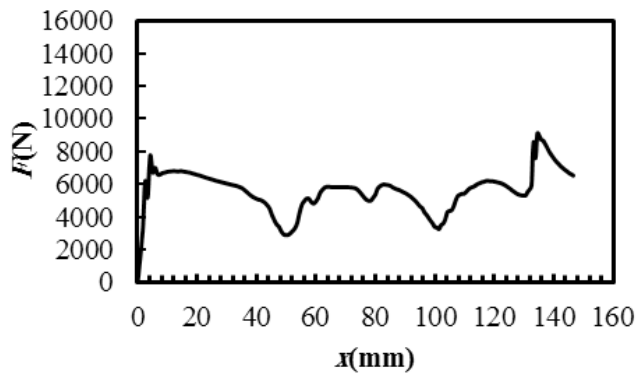


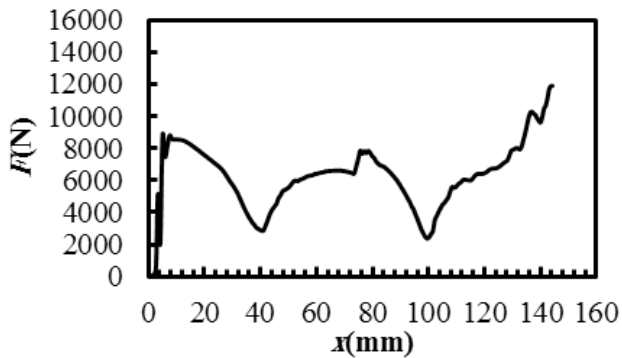
Fig. 7. Mods of buckling for EMT1

شکل ۷: مدهای کمانش لوله فلزی مشبک ۱

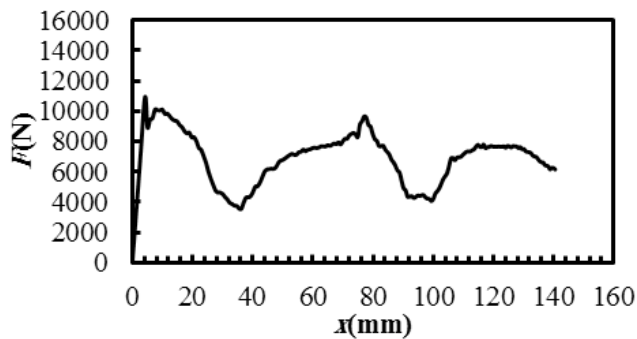
در اثر سقوط وزنه مقدار ۱۸۰۰ ژول انرژی تولید می‌شود. انرژی جنبشی ناشی از حرکت جسم به وسیله رابطه ۷ محاسبه می‌شود. در جاذب‌های انرژی برای تحلیل نتایج از نمودار نیرو-جابجایی استفاده می‌شود و سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی بیانگر مقدار انرژی جذب شده می‌باشد. (شکل ۸)



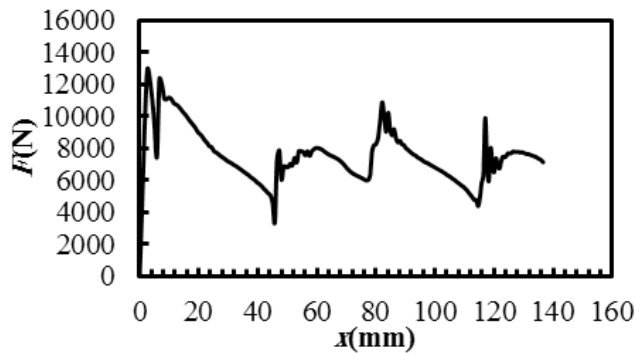
(۱) نمودار نیرو - جابه‌جایی مشبک ۱



(۲) نمودار نیرو - جابه‌جایی مشبک ۲



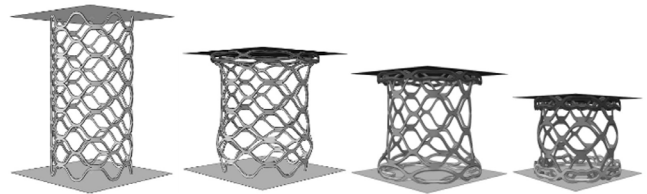
(۳) نمودار نیرو - جابه‌جایی مشبک ۳



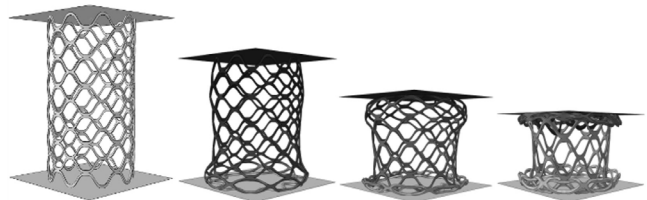
(۴) نمودار نیرو - جابه‌جایی مشبک ۴

توجه به طول لهیدگی لوله فلزی دارد. لهیدگی سلول‌ها منجر به جذب انرژی ناشی از نیروی ضربه می‌شود؛ مقدار انرژی جذب شده توسط لوله مشبک به اندازه سطح مقطع لوله وابسته است.

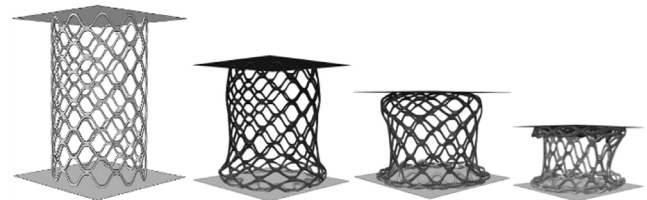
عملکرد پارامتر انرژی ویژه (SEA) در لوله‌های فلزی مشبک تا حدودی نزدیک به یکدیگر می‌باشند. انحنای سلول‌ها تأثیر کمی در برابر پاسخ نیرو دارد و بیشتر افزایش تعداد سلول‌های له شده است که منجر به افزایش ظرفیت جذب انرژی جذب می‌شود؛ بنابراین پارامتر SEA بیشتر به افزایش تعداد سلول‌های له شده و لولاهای پلاستیک بستگی دارد.



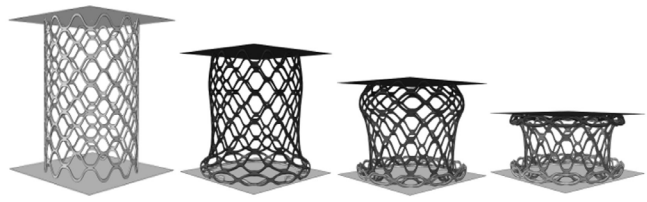
(۱) فروریزش جاذب مشبک ۱



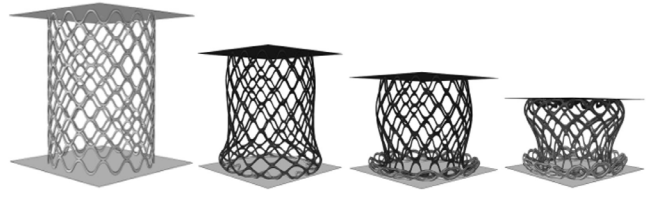
(۲) فروریزش جاذب مشبک ۲



(۳) فروریزش جاذب مشبک ۳



(۴) فروریزش جاذب مشبک ۴



(۵) فروریزش جاذب مشبک ۵

Fig. 9. Collapse of single layer EMT tubes

شکل ۹: نحوه فروریزش لوله‌های تک لایه مشبک

۴ و مشبک ۵ تا حدودی دارای جذب انرژی یکسانی می‌باشند و همچنین طول لهیدگی آنها با یکدیگر برابر است.

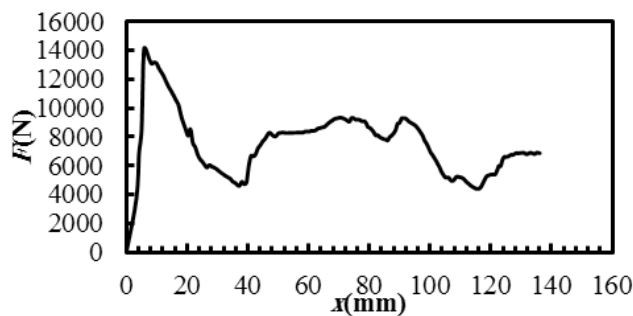
همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش اندازه سطح مقطع برای لوله‌های فلزی مشبک ۱-۴ باعث افزایش ظرفیت جذب انرژی شده است. لوله مشبک ۴ از نظر نیروی لهیدگی و ضریب شکل از لوله مشبک ۵ بهتر می‌باشد و می‌توان این‌طور بیان کرد که استفاده از لوله مشبک ۴ کارآمدتر از لوله مشبک ۵ می‌باشد.

۲-۲-۲- بررسی لوله‌های فلزی مشبک چند لایه

در ادامه به بررسی رفتار لوله‌های فلزی مشبک چند لایه پرداخته شده است. لوله‌های چند لایه استوانه‌های هم مرکز هستند که درون یکدیگر قرار گرفته‌اند و تأثیر آن بر روی رفتار فروریزش و ظرفیت جذب انرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل ۱۲ نحوه فروریزش لوله‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فروریزش لوله‌های فلزی به صورت متقارن بوده و هر لایه با لهیدگی خود و بسته شدن سلول‌ها روی یکدیگر انرژی ضربه را جذب می‌کند. (شکل ۱۳)

نحوه فروریزش لوله‌های فلزی مشبک چند لایه هم به صورت متقارن می‌باشد. نمودار تغییرات نیرو-جابه‌جایی مربوط به فروریزش لوله‌های مشبک چند لایه در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

همان‌طور که از نمودارهای نیرو-جابه‌جایی شکل ۱۲ و جدول ۴ مشاهده می‌شود، چند لایه کردن لوله‌ها باعث افزایش ظرفیت جذب انرژی لوله فلزی مشبک می‌شود. در لوله‌های چند لایه، هر لایه لوله مشبک به طور مجزا در اثر فروریزش انرژی ناشی از ضربه را جذب می‌کند. همچنین در اثر برخورد سلول‌ها به یکدیگر و اندرکنش بین لایه‌ها، با توجه به طول لهیدگی کمتر مقدار انرژی بیشتری جذب می‌شود و ظرفیت جذب انرژی لوله فلزی مشبک را افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش لایه‌های لوله فلزی، با توجه به درصد لهیدگی و طول فروریزش کمتر تقریباً تمامی انرژی جنبشی ناشی از بار ضربه‌ای را جذب می‌کند.



۵) نمودار نیرو - جابه‌جایی مشبک ۵

Fig. 10. Force-displacement diagrams

شکل ۱۰: نمودارهای نیرو جابه‌جایی

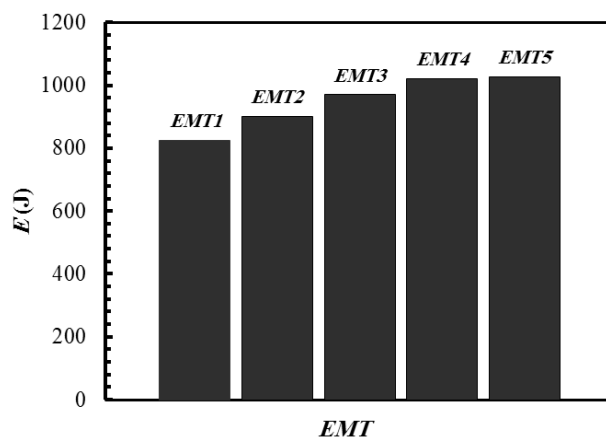


Fig. 11. Energy absorption for single layer EMT tubes

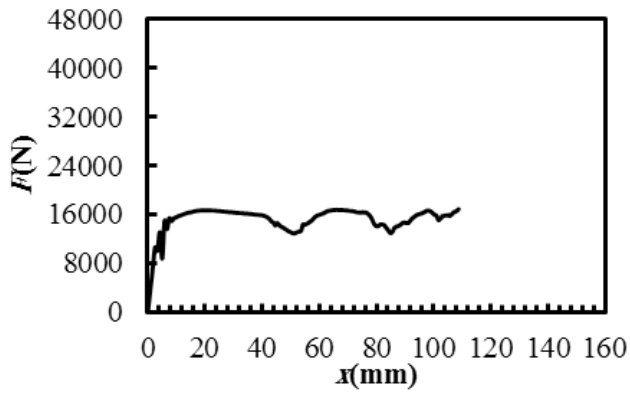
شکل ۱۱: انرژی جذب شده لوله مشبک تک لایه

در بارگذاری دینامیکی مقدار نیروی ضربه و انرژی جنبشی ناشی از آن ثابت می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقدار طول لهیدگی لوله‌ها بعد از فروریزش متفاوت می‌باشد و هر لوله با توجه به مقاومتی که در برابر نیروی ضربه دارد دچار لهیدگی می‌شود و مقداری از انرژی را جذب می‌کند. با افزایش اندازه سطح مقطع لوله‌ها، با طول لهیدگی کمتر مقدار انرژی بیشتری جذب می‌شود و همچنین درصد لهیدگی لوله کاهش یافته و منجر به افزایش ظرفیت جذب انرژی لوله فلزی مشبک می‌ود. لوله مشبک

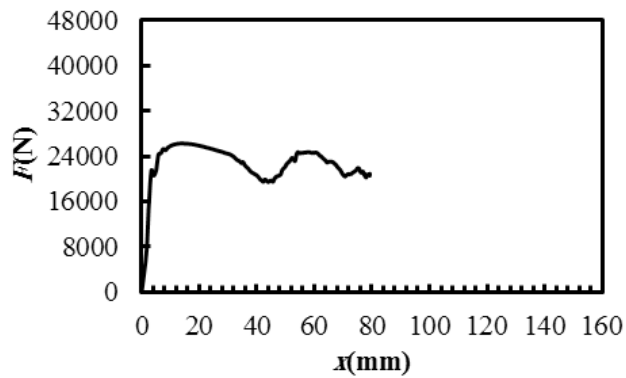
جدول ۳: نتایج مربوط به جذب مشبک تک لایه

Table 3. Results of single layer EMT tubes

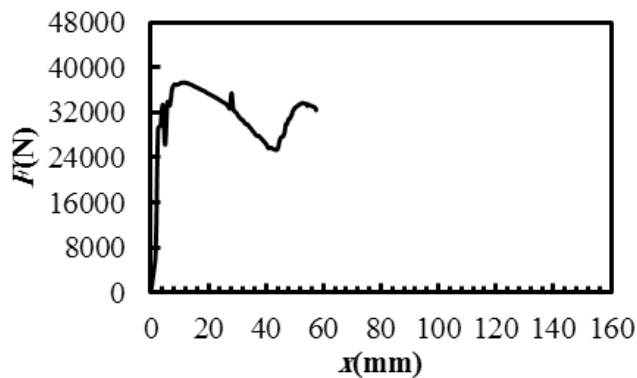
نمونه‌ها	نیروی بیشینه اولیه $P(N)$	نیروی میانگین $P_m(N)$	طول لهیدگی $\delta(mm)$	جذب انرژی $E(J)$	درصد لهیدگی L/δ	ضریب شکل η	SEA	$F_{cr}(N)$
مشبک ۱	۷۷۴۳/۱۱	۵۶۲۰/۷۴	۱۴۶/۶۰	۸۲۴	۷۲/۶ %	۰/۷۳	۴/۷	۴۲۵۲۰
مشبک ۲	۸۷۹۳/۱۷	۶۲۵۳/۰۴	۱۴۴/۱۵	۹۰۲	۷۱/۴ %	۰/۷۲	۴/۳	۴۵۰۸۶
مشبک ۳	۸۹۳۱/۰۱	۶۹۰۱/۴۶	۱۴۰/۵۵	۹۷۰	۶۹/۶ %	۰/۷۷	۳/۹	۴۷۵۲۶
مشبک ۴	۱۱۱۳۶/۷۰	۷۴۶۵/۹۷	۱۳۶/۶۲	۱۰۲۰	۶۷/۶ %	۰/۶۷	۳/۶	۴۸۶۳۲
مشبک ۵	۱۴۱۱۱/۶۰	۷۶۴۹/۸۷	۱۳۶/۱۲	۱۰۲۶	۶۷/۴ %	۰/۵۴	۳/۳	۴۹۷۲۸



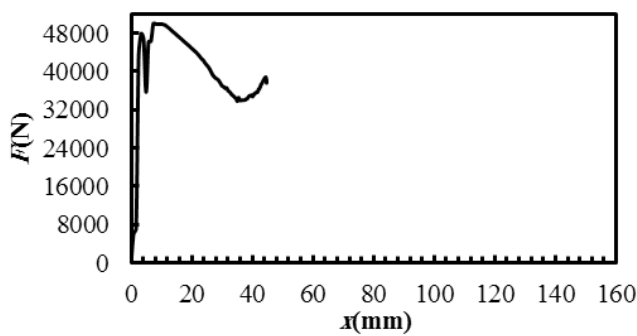
(۱) نمودار نیرو - جابه‌جایی مشبک ۶



(۱) نمودار نیرو - جابه‌جایی مشبک ۷



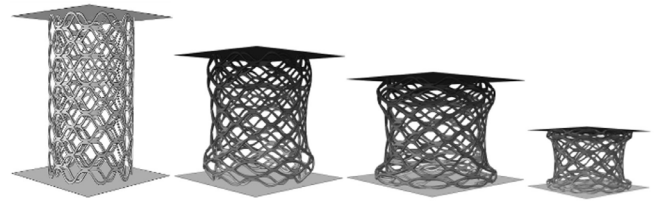
(۱) نمودار نیرو - جابه‌جایی مشبک ۸



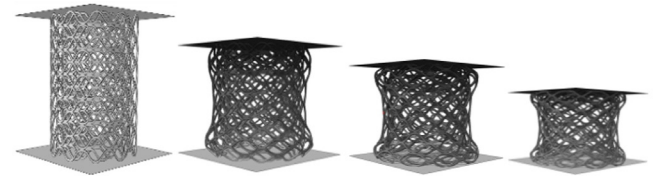
(۱) نمودار نیرو - جابه‌جایی مشبک ۹

Fig. 14. Force- displacement diagrams

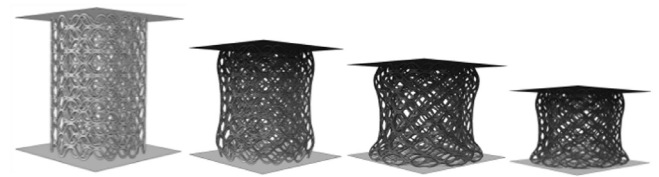
شکل ۱۴: نمودارهای نیرو - جابه‌جایی



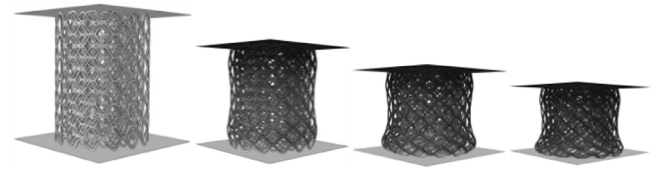
(۱) فروریزش جاذب مشبک ۶



(۲) فروریزش جاذب مشبک ۷



(۳) فروریزش جاذب مشبک ۸



(۴) فروریزش جاذب مشبک ۹

Fig. 12. Collapse of multi-layer EMT tubes

شکل ۱۲: نحوه فروریزش جاذب‌های چند لایه

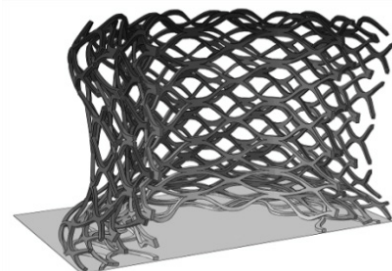
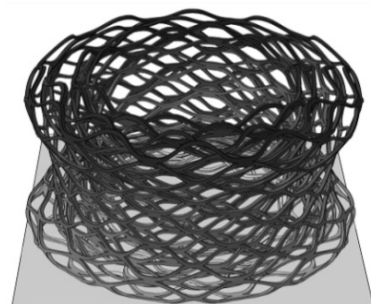


Fig. 13. Mode of collapse in multi-layer EMT tubes

شکل ۱۳: نحوه فروریزش لایه‌های لوله چند لایه

جدول ۴: نتایج مربوط به جاذب مشبک چند لایه

Table 4. Results of multi-layer EMT tubes

$F_{cr}(N)$	SEA	ضریب شکل η	درصد لهیدگی L/δ	جذب انرژی $E(J)$	طول لهیدگی $\delta(mm)$	نیروی میانگین $P_m(N)$	نیروی بیشینه اولیه $P(N)$	نمونه‌ها
۷۸۷۳۷	۳/۴	۰/۹۷	۵۳/۸ %	۱۶۲۵	۱۰۸/۷۷	۱۴۹۳۹/۷۸	۱۵۴۲۰/۵۰	مشبک ۶
۱۱۲۱۶۱	۸/۲	۰/۸۹	۳۹/۲ %	۱۷۹۶	۷۹/۲۰	۲۲۶۷۶/۷۷	۲۵۵۲۲/۷۰	مشبک ۷
۱۴۵۷۸۳	۹/۱	۰/۹۴	۲۸/۵ %	۱۷۹۴	۵۷/۴۵	۳۱۲۲۷/۱۵	۳۳۲۳۱/۶۰	مشبک ۸
۱۶۰۵۶۷	۴/۱	۰/۸۳	۲۲/۲ %	۱۷۹۰	۴۴/۷۰	۴۰۰۴۴/۷۴	۴۷۹۴۷/۷۰	مشبک ۹

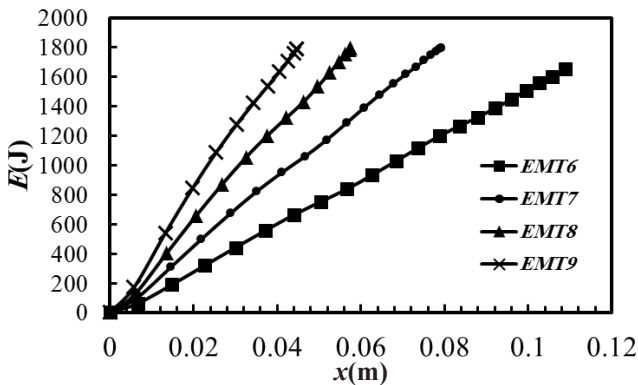


Fig. 16. Energy absorption- displacement diagram

شکل ۱۶: نمودار جذب انرژی - جابه‌جایی

ظرفیت جذب انرژی بالایی داشته باشند. همچنین این نوع لوله‌ها به دلیل شکل‌سازه‌ای که دارند دارای وزن کمی می‌باشند و انرژی زیادی را نسبت به وزن لوله فلزی مشبک جذب می‌کند.

هنگامی که نیروی ضربه‌ای به لوله فلزی مشبک وارد می‌شود سلول‌ها روی یکدیگر بسته شده و دچار لهیدگی می‌شوند. بسته شدن سلول‌ها باعث ایجاد یک نیروی عمودی در راستای محوری لوله و نیروی گشتاور نسبت به تقاطع سلول‌ها ایجاد می‌شود که این نیروها منجر به بسته شدن سلول‌ها می‌شود. عکس‌العمل این نیروهای ایجاد شده باعث اتلاف نیروی ضربه می‌شود. همچنین در اثر بار ضربه‌ای یک لولای پلاستیک در تقاطع سلول‌ها ایجاد شده و باعث هدر رفتن بار ضربه‌ای می‌شود و انرژی ایجاد شده را جذب می‌کند. افزایش تعداد سلول‌ها در راستای محیطی و چند لایه کردن لوله باعث می‌شود که نیروهای عکس‌العمل و لولاهای پلاستیک افزایش یابد و ظرفیت جذب انرژی لوله فلزی مشبک زیاد شود.

افزایش اندازه سطح مقطع لوله فلزی مشبک باعث زیاد شدن مقاومت لوله در برابر لهیدگی شده و نیروی بیشینه اولیه را که نیروی لازم جهت غلبه بر مقاومت اولیه لوله می‌باشد، افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش سطح مقطع تعداد سلول‌ها در راستای محیطی افزایش می‌یابد و ظرفیت جذب انرژی لوله فلزی مشبک را زیاد می‌کند. به منظور افزایش ظرفیت جذب انرژی می‌توان از لوله‌های فلزی چند لایه استفاده کرد. چند لایه کردن لوله باعث می‌شود که هر لایه در اثر فروریزش انرژی ناشی از ضربه را جذب کند؛

شکل ۱۵ مقدار انرژی جذب شده توسط لوله‌های فلزی مشبک چند لایه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با دو لایه کردن لوله مشبک ۶ در مقایسه با لوله مشبک ۱ مقدار جذب انرژی جاذب با طول لهیدگی کمتر دو برابر شده است و باعث افزایش ظرفیت جذب انرژی جاذب می‌شود.

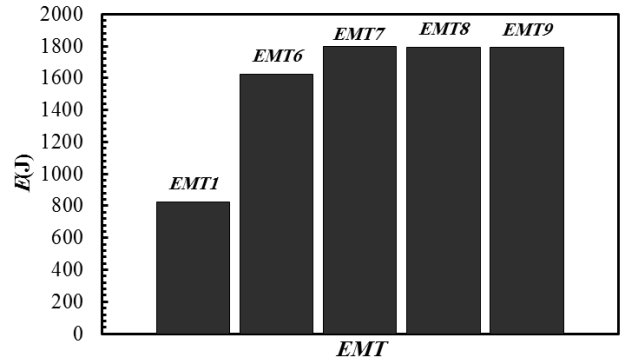


Fig. 15. Energy absorption for multi-layer EMT tubes

شکل ۱۵: انرژی جذب شده لوله‌های فلزی مشبک چند لایه

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، لوله فلزی مشبک ۱ با طول لهیدگی ۱۴۶/۶ میلی‌متر مقدار ۸۲۴ ژول انرژی را جذب می‌کند؛ لوله فلزی مشبک ۹ از ۵ لایه لوله مشبک تشکیل شده است و با طول لهیدگی ۴۴/۷۰ میلی‌متر مقدار ۱۷۹۰ ژول انرژی ضربه را جذب می‌کند. با پنج لایه کردن لوله فلزی مشبک در مقایسه با لوله فلزی تک لایه، می‌توان با کاهش ۶۹/۵ درصد از طول لهیدگی مقدار انرژی جذب شده را به میزان بیش از دو برابر افزایش داد.

چند لایه کردن لوله فلزی به افزایش نیروی بیشینه اولیه و ظرفیت جذب انرژی لوله فلزی مشبک منجر می‌شود. از نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش لایه‌ها می‌توان با طول لهیدگی کمتر بیشترین مقدار جذب انرژی را داشت و بازده لهیدگی را افزایش داد. (شکل ۱۶)

۳- نتیجه‌گیری

در این تحقیق لوله‌های فلزی مشبک با زاویه سلولی $\alpha=0$ تحت بارگذاری ضربه‌ای به صورت متقارن فروریزش می‌کنند و منجر می‌شود که

- International Journal of Impact Engineering*, 37(6) (2010) 754-765.
- [3] A. Meidell, Computer aided material selection for circular tubes designed to resist axial crushing, *Thin-Walled Structures*, 47(8) (2009) 962-969.
- [4] A.G. Olabi, E. Morris, M.S.J. Hashmi, Metallic tube type energy absorbers: A synopsis, *Thin-Walled Structures*, 45(7) (2007) 706-726.
- [5] A.A.A. Alghamdi, Collapsible impact energy absorbers: an overview, *Thin-Walled Structures*, 39(2) (2001) 189-213.
- [6] G.N. SC. Yuen, energy absorbing characteristics of tubular structures with geometric and material modification, *Apply Mechanics Review*, 61 (2008) 15.
- [7] Z. Yang, H. Yan, C. Huang, X. Diao, X. Wu, S. Wang, L. Lu, L. Liao, Y. Wei, Experimental and numerical study of circular, stainless thin tube energy absorber under axial impact by a control rod, *Thin-Walled Structures*, 82 (2014) 24-32.
- [8] D. Karagiozova, N. Jones, Influence of stress waves on the dynamic progressive and dynamic plastic buckling of cylindrical shells, *International Journal of Solids and Structures*, 38(38) (2001) 6723-6749.
- [9] D. Karagiozova, N. Jones, Dynamic effects on buckling and energy absorption of cylindrical shells under axial impact, *Thin-Walled Structures*, 39(7) (2001) 583-610.
- [10] M.Y. Huang, Y.S. Tai, H.T. Hu, Dynamic crushing characteristics of high strength steel cylinders with elliptical geometric discontinuities, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 54(1) (2010) 44-53.
- [11] J. Song, Y. Chen, G. Lu, Light-weight thin-walled structures with patterned windows under axial crushing, *International Journal of Mechanical Sciences*, 66 (2013) 239-248.
- [12] H.K.A. Nadaf Oskouei, M. Pakian Booshehri, Numerical and Experimental Study of a Diamond Collapse of a Thin Wall Tube Energy-Absorber with Caps under Dynamic Axial Loading, *Modares Mechanical Engineering*, 15 (2015) 9.
- [13] H.K. A. Naddaf Oskouei, M. Sohrabi, Experimental and numerical study of conical thin shells collapse under dynamic axial loadings, *Modares Mechanical Engineering*, 15 (2015) 10.
- [14] A. Niknejad, S.M. Elahi, S.A. Elahi, S.A. Elahi, Theoretical and experimental study on the flattening deformation of the rectangular brazen and aluminum columns, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 13(4) (2013) 449-464.
- [15] C. Graciano, G. Martínez, D. Smith, Experimental

همچنین اندرکنش بین لایه‌ها باعث جذب انرژی بیشتر می‌شود و ظرفیت جذب انرژی لوله فلزی مشبک را افزایش دهد. ضریب شکل یا بازده نیروی لهیدگی (η) پارامتری است که در طراحی‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد و هرچه به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده بازده بالای جاذب انرژی می‌باشد. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود در لوله‌های فلزی تک لایه این ضریب برای تمام نمونه‌ها نزدیک به هم می‌باشد. در لوله‌های فلزی مشبک چند لایه مشاهده می‌شود که این ضریب افزایش یافته است که نشان‌دهنده این است که لوله‌های فلزی مشبک چند لایه دارای بازده لهیدگی بالایی هستند و افزایش تعداد لایه‌ها باعث افزایش بازده لهیدگی لوله فلزی مشبک می‌شود.

با مشاهده نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی و این که استفاده از افزایش سطح مقطع و چند لایه کردن لوله فلزی مشبک باعث بهبود رفتار و عملکرد لوله فلزی مشبک می‌شود؛ بنابراین می‌توان برای درک بهتر از آزمایش‌های تجربی استفاده شود.

فهرست علائم

A	تنش تسلیم (MPa)
B	فاکتور کرنش سختی (MPa)
c	ضریب حساسیت به نرخ کرنش
E	مدول الاستیسیته (GPa)
E_a	انرژی جذب شده (J)
F	نیرو (N)
m	ضریب گرمایی
n	ضریب کرنش سختی
T	انرژی جنبشی (J)
T_m	دمای ذوب ماده (°C)

علائم یونانی

α	زاویه سلولی
δ	طول لهیدگی (mm)
ν	ضریب پواسون
ρ	چگالی (kgm^{-3})
η	ضریب شکل

منابع

- [1] H.R.Z. A. Ghamarian, M.T. Abadi, Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of Empty and Foam-filled End-capped Conical Tubes, *Thin-walled Structures*, 49 (2011) 1312-1319.
- [2] N. Jones, Energy-absorbing effectiveness factor,

- [19] D. Smith, C. Graciano, G. Martínez, P. Teixeira, Axial crushing of flattened expanded metal tubes, *Thin-Walled Structures*, 85 (2014) 42-49.
- [20] H.H. M. Damghani Nouri, A. Ghodsbin Jahromi, Experimental Investigation of Expanded Metal Tube Absorber under Axial Impact Loading, *Modares Mechanical Engineering*, 15 (2015) 7.
- [21] H.H. M. Damghani Nouri, A. Ghodsbin Jahromi, Experimental and numerical investigation of expanded metal tube absorber under axial impact loading, *Structural Engineering and Mechanics*, 54 (2015) 21.
- investigation on the axial collapse of expanded metal tubes, *Thin-Walled Structures*, 47(8) (2009) 953-961.
- [16] C. Graciano, G. Martínez, A. Gutiérrez, Failure mechanism of expanded metal tubes under axial crushing, *Thin-Walled Structures*, 51 (2012) 20-24.
- [17] G. Martínez, C. Graciano, P. Teixeira, Energy absorption of axially crushed expanded metal tubes, *Thin-Walled Structures*, 71 (2013) 134-146.
- [18] D. Smith, C. Graciano, G. Martínez, Quasi-static axial compression of concentric expanded metal tubes, *Thin-Walled Structures*, 84 (2014) 170-176

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Ghodsbin Jahromi and H. Hatami, Numerical Behavior Study of Expanded Metal Tube Absorbers and Effect of Cross Section Size and Multi-Layer Under Low Axial Velocity Impact Loading, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(4) (2018) 685-696.

DOI: 10.22060/mej.2016.727



