

بررسی پارامترهای جذب انرژی پوسته‌های استوانه‌ای فولادی پر شده با پلی‌اتیلن تحت بارگذاری

شبه‌استاتیکی

فرید رئوف^۱، جواد رضاپور^{۲*}، سینا گوهری راد^۳، رضا رجیبه‌فرد^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

برجسته‌ها

- پرکننده پلی‌اتیلن سبب کاهش بیشینه نیروی لهیدگی می‌شود.
- جذب انرژی در نمونه‌های دارای پرکننده کاهش می‌یابد.
- انتقال نیرو در نمونه پر شده یکنواخت‌تر می‌باشد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

*نویسنده مسئول:

rezapour@liau.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

شبه‌استاتیکی

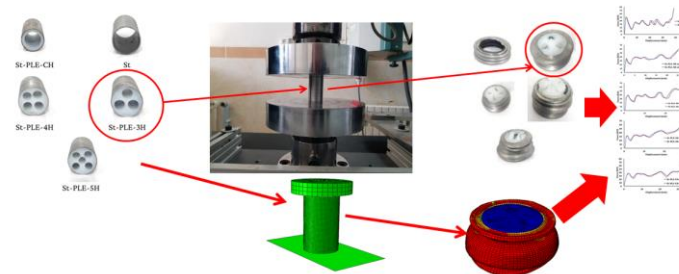
جذب انرژی

پوسته استوانه‌ای

پرکننده پلی‌اتیلن

لوله فولادی

چکیده گرافیکی



چکیده

در این تحقیق، هدف اصلی، بررسی پارامترهای جذب انرژی پوسته‌های استوانه‌ای فولادی پر شده با پلی‌اتیلن است. بدین منظور از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی استفاده شد. به‌منظور مقایسه عملکرد جذب انرژی، نمونه‌های پوسته استوانه‌ای فولادی توخالی و چهار نمونه پوسته استوانه‌ای فولادی پر شده با پلی‌اتیلن ارتالون با سوراخ‌کاری‌های مختلف محوری در قسمت پرکننده تحت آزمایش شبه استاتیکی فشاری قرار گرفتند و با یکدیگر مقایسه شدند. شبیه‌سازی عددی نیز به کمک نرم‌افزار ABAQUS انجام شد و از نتایج آزمایشگاهی برای خواص مکانیکی مواد استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی همخوانی خوبی را با نتایج تجربی نشان داد. همچنین نتایج نشان دادند که استفاده از پرکننده پلی‌اتیلن در نمونه‌های پر شده سبب کاهش در مقادیر نیروی بیشینه لهیدگی اولیه، افزایش مقادیر میانگین نیروی لهیدگی، کاهش در جذب انرژی، افزایش بازده نیروی لهیدگی نسبت به نمونه‌های خالی می‌شود. به‌عنوان مثال، در نمونه پر شده با پلی‌اتیلن و دارای پنج سوراخ محوری در مقدار نیروی بیشینه لهیدگی ۶۰/۵٪ کاهش و در بازده نیروی لهیدگی ۱۶۶/۷۷٪ افزایش نسبت به نمونه خالی مشاهده شد. همچنین در بین نمونه‌های پر شده با پلی‌اتیلن، نمونه دارای پنج سوراخ محوری دارای بیشترین بازده نیروی لهیدگی بود.

۱- مقدمه

رفتار مکانیکی لوله‌های فلزی جدارنازک را با تغییر پارامترهای هندسی و مواد پیش‌بینی نمود [۹-۱۱]. فرآیند لهیدگی سازه‌های جدارنازک تحت بارمحوری، دارای محدودیت خاصی مانند نیروی بیشینه اولیه بالا و حالت ناپایدار تغییرشکل است. تحت بار مایل نیز ساختار جدارنازک مستعد خمش کلی است که منجر به کاهش ظرفیت جذب انرژی می‌شود. استفاده از آغازگر لهیدگی به‌عنوان یک روش مؤثر برای ایجاد تغییرشکل معقول و بهبود ویژگی‌های جذب انرژی در نظر گرفته می‌شود. اصلاحات ساختاری مانند استفاده از یک شیار [۱۲]، اشکال مختلف سوراخ‌ها [۱۳-۱۵] و طرح‌های هندسی مبتنی بر تا کردن کاغذ [۱۶-۱۸] نمونه‌هایی از آغازگرهای لهیدگی استفاده‌شده در چنین شرایطی هستند. قابلیت ضربه محوری و مورب سازه‌های جدارنازک بدون آغازگرهای لهیدگی به‌طور گسترده در زمینه حمل‌ونقل مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۹ و ۲۰].

آبراموویچ و جونز [۲۱ و ۲۲] عملکرد لهیدگی محوری لوله‌های جدارنازک را ارزیابی کردند و یک مدل نظری از میانگین نیروی لهیدگی (MCF) با در نظر گرفتن استحکام کرنش، نرخ کرنش مواد و فاصله تغییرشکل مؤثر ایجاد کردند. لیو و همکارانش [۲۳] به‌طور تجربی و عددی اثرات دما و نرخ کرنش را بر رفتارهای تغییرشکل پلاستیکی لوله‌ها بررسی کردند و یک مدل پیش‌بینی برای لهیدگی لوله‌ها ایجاد کردند. علاوه بر این، سازه‌های جدارنازک با شکل‌های مقطع مختلف، مانند دایره‌ها [۲۴]، چهارضلعی [۲۵]، شش‌ضلعی [۲۶]، هشت‌ضلعی [۲۷] و لوله‌های مقعر [۲۸] مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. برای برآورده ساختن الزامات کاربردی سازه‌های جدارنازک در تنظیمات مختلف، بسیاری از محققان طراحی قابلیت تصادف و اهداف بهینه‌سازی را با روش‌هایی مانند الگوریتم‌های ژنتیک و شبکه‌های عصبی [۲۹]، الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه [۳۰] و [۳۱] و الگوریتم‌های ژنتیک انجام داده‌اند [۳۲ و ۳۳]. بایکاسوگلو و همکارانش [۳۴] یک ساختار شبکه‌ای پر از لوله جدارنازک و اهداف بهینه‌سازی شده برای به حداقل رساندن نیروی بیشینه لهیدگی (PCF) و به حداکثر رساندن جذب انرژی ویژه (SEA) از طریق جاذبه وزنی برهم نهفته و

سازه‌های جدارنازک به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان جاذب انرژی در حمل‌ونقل و مهندسی هوافضا استفاده‌شده است. در همین حال، تقاضای روزافزون برای عملکرد بالا و وزن پایین، استفاده از سازه‌ها متشکل از ترکیب مواد مختلف را سبب می‌شود. سازه‌های ساندویچی که شامل یک پوسته نازک خارجی و یک هسته داخلی است، یک نمونه از این ساختارهای مؤثر است. به‌طور کلی در این ساختارها، پوسته‌های خارجی از فلز یا یک کامپوزیت تقویت‌شده با فلز یا الیاف ساخته می‌شوند و هسته آن نیز از فوم لانه‌زنبوری، فلزی یا پلیمری ساخته می‌شود. سازه‌های ساندویچی معمولی تحت شرایط فشاری، شامل لوله‌های ساندویچی [۱]، تیرها [۲ و ۳] و پانل‌ها [۴ و ۵] می‌شوند. آن‌ها رفتار جذب انرژی خوب و جذب انرژی ویژه بالا تحت شرایط شبه‌استاتیکی و یا در بارگذاری ضربه‌ای دارند. لوله‌های ساندویچی می‌توانند علاوه بر وزن سبک، قابلیت ضربه‌پذیری را با استفاده از مواد مختلف به‌منظور کنترل حالت‌های تغییرشکل و جذب انرژی تا حد ممکن افزایش دهند.

رفتار مکانیکی لوله‌های فلزی جدارنازک تحت شرایط شبه‌استاتیکی و بارگذاری ضربه‌ای به‌طور گسترده در دهه‌های گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، اندروز و همکارانش [۶] حالت‌های شکست را با عنوان‌های آکاردئونی، الماسی، مختلط و کمانش اویلر طبقه‌بندی کردند. متعاقباً، محققان بیشتری بر روی کاربرد آلیاژ آلومینیوم به دلیل مزیت وزن سبک آن تمرکز کردند. علاوه بر این، تحقیقات نشان داد که برخی از لوله‌های جدارنازک با شکل‌های خاص می‌توانند عملکرد ایمنی را بهبود بخشند. به‌عنوان مثال، یائو و همکارانش [۷] قابلیت برخورد لوله‌های کنگره‌دار هیبریدی دایره‌ای تحت فشار محوری را بررسی کردند و نشان دادند که ظرفیت جذب انرژی بهتری نسبت به لوله‌های کنگره‌دار معمولی دارند.

لی و همکارانش [۸] قابلیت ضربه‌پذیری لوله‌های مربعی چند سلولی تقویت‌شده به‌وسیله کنگره‌دار نمودن را بررسی کردند و نشان دادند که ظرفیت جذب انرژی بالا و کارایی وزنی خوبی را دارند. به کمک روش اجزای محدود می‌توان

بار و بازده انرژی. جذب انرژی (EA) به عنوان ناحیه زیر منحنی نیرو-جابجایی تعریف می‌شود که طبق رابطه (۱) نشان داده شده است [۳۹].

$$EA = \int_0^{d_{\max}} F(s) ds \quad (1)$$

که در رابطه فوق d_{\max} نشان‌دهنده بیشینه جابجایی است. نیروی بیشینه (PCF) عبارت است از بیشترین نیرویی که نیاز است تا پوسته لهیده گردد و غالباً در بازه‌های زمانی آغازین فرآیند رخ می‌دهد. هرچه نیروی بیشینه کوچک‌تر باشد، جذب انرژی مطلوب‌تر است؛ چراکه این نیرو در واقع بیان‌گر نیروی تکیه‌گاهی است که به سازه تحت محافظت (به عنوان مثال اتاق خودرو) منتقل می‌گردد.

نیروی لهیدگی میانگین (MCF)، متوسط نیرویی است که سازه در طول فرآیند بارگذاری متحمل می‌گردد و طبق رابطه (۲) تعریف می‌گردد [۳۹].

$$MCF = \frac{EA}{d_{\max}} = \frac{\int_0^{d_{\max}} F(s) ds}{d_{\max}} \quad (2)$$

همانند نیروی بیشینه، نیروی میانگین کوچک‌تر مطلوب‌تر هست. بازده نیروی لهیدگی (CFE) طبق رابطه (۳) معیاری است برای سنجش نسبت نیروی میانگین (MCF) به نیروی بیشینه لهیدگی (PCF) [۳۹].

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} = \frac{P_{\text{mean}}}{P_{\text{max}}} \quad (3)$$

نوسانی شدن ظرفیت باربری (ULC) به عنوان نسبت بین کار انجام‌شده توسط انحراف نیروی لهیدگی واقعی از میانگین نیروی لهیدگی و جذب انرژی تعریف می‌شود [۴۰] و به صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$ULC = \frac{\int_0^d [F(x) - MCF] dx}{\int_0^d F(x) dx} \quad (4)$$

نوسانی شدن ظرفیت باربری (ULC)، نشان‌دهنده درجه نوسانی بودن نیروی لهیدگی حول میانگین نیروی لهیدگی است و مقدار بالاتر این پارامتر، ناپایداری را در حالت تغییرشکل نشان می‌دهد. بازده انرژی (f) سازه را می‌توان به عنوان نسبت بین انرژی جذب‌شده و نیروی بیشینه تعریف نمود [۴۰].

$$f = \frac{\int_0^d F(x) dx}{PCF} \quad (5)$$

یک شبکه عصبی مصنوعی را طراحی کردند. پاتل و همکارانش [۳۵] یک ساختار چندلایه جدارنازک را بر اساس تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری بهینه کردند و دریافتند که یک پیکربندی سه لایه قابلیت تصادف بهتری را ارائه می‌دهد. چو و همکارانش [۳۶] لوله‌های جدارنازک با شیارها را از طریق شبیه‌سازی عددی برای تخمین تأثیرات نسبت ضخامت به عرض بر قابلیت ضربه‌پذیری سازه‌های جدارنازک مطالعه کردند. بودلانی و همکارانش بر اساس آزمایش‌ها [۳۷] و شبیه‌سازی عددی [۳۸]، بررسی اثرات سوراخ‌های دایره‌ای بر عملکرد جذب انرژی لوله‌های جدارنازک را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که سوراخ‌های دایره‌ای که در محدوده معینی وارد شده‌اند، می‌تواند نیروی بیشینه لهیدگی را کاهش دهد و ظرفیت جذب انرژی لوله‌های جدارنازک را بهبود بخشد.

با توجه به اهمیت پرکننده بر رفتار جذب انرژی و لهیدگی پوسته‌های جدارنازک، در این پژوهش اثر پرکننده پلی‌اتیلن ارتالون بر رفتار جذب انرژی لوله‌های استوانه‌ای جدارنازک فلزی تحت بارگذاری شبه استاتیکی محوری بررسی شده است. در بخش ۲، ابتدا خواص مواد و مشخصات هندسی نمونه‌های مورد آزمایش و شرایط انجام آزمایش‌ها بیان شده است و در بخش ۳ نیز روش مدل‌سازی عددی بیان شده است. سپس در بخش ۴، نتایج آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی بحث خواهد شد. در پایان دستاوردهای این پژوهش در بخش آخر ارائه خواهد گردید.

۲- مواد و روش تحقیق

در این بخش ساختار آزمایشی و روش شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه قرار می‌گیرد و شاخص‌های جذب انرژی برای ارزیابی ویژگی‌های بارگذاری محوری معرفی می‌شوند.

۲-۱- پارامترهای جذب انرژی

معمولاً به منظور ارزیابی نمونه‌های مختلف از نظر جذب انرژی، علاوه بر نمودارهای انرژی جذب‌شده بر حسب کوتاه‌شدگی، معیارهای دیگری نیز استفاده می‌گردند که عبارت‌اند از: نیروی بیشینه، نیروی لهیدگی میانگین، انرژی جذب‌شده، بازده نیروی لهیدگی، نوسانی شدن ظرفیت حمل

جدول (۱): مشخصات فولاد نرم ST37.

خاصیت	E	ν	ρ	σ_y	σ_u	ϵ_u
	GPa	-	kg/m ³	MPa	MPa	%
مقدار	۲۰۰	۰.۳	۷۸۶۴	۲۲۵	۳۵۰	۲۰

جدول (۲): مشخصات پلی‌اتیلن ارتالون 6PLA.

خاصیت	E	ν [41]	ρ	σ_y	ϵ_u
	GPa	-	kg/m ³	MPa	%
مقدار	۳/۶	۰/۴۶	۱۱۵۰	۲۰	۲۵

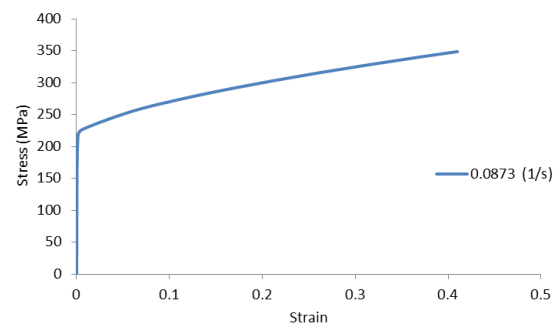
به منظور یکسان‌سازی جرم پوسته‌های فلزی بدون پرکننده با نمونه‌های دارای مواد پرکننده، در داخل مواد پرکننده چهار مدل سوراخ‌کاری با قطرهای مختلف انجام شد و به منظور بررسی اثر نوع سوراخ‌کاری چهار مدل سوراخ‌کاری طراحی و اجرا شد. تصویر نمونه‌های مورد آزمایش که بر اساس مشخصات هندسی ذکر شده در جدول الف موجود در پیوست طراحی و ساخته شدند در شکل ۳ نشان داده شده است. شایان‌ذکر است حروف St، PLE، CH، 3H، 4H و 5H به ترتیب نشان‌دهنده ماده فولاد، ارتالون، سوراخ مرکزی طولی، سه سوراخ طولی، چهار سوراخ طولی و پنج سوراخ طولی در نام‌گذاری نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشند. این نمونه‌ها مطابق شکل ۴ با دستگاه تست فشار سنتام در دانشگاه آزاد اسلامی مرکز لشت‌نشا-زیباکنار مورد آزمایش شبه‌استاتیکی فشاری قرار گرفتند.



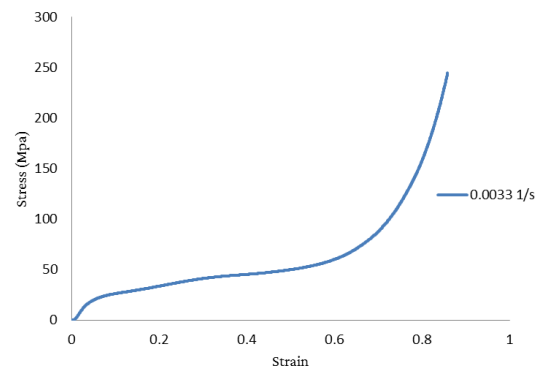
شکل (۳): تصویر نمونه‌های مورد آزمایش.

۲-۲- مواد و مشخصات هندسی

به منظور تعیین خواص مکانیکی فولاد نرم ST37 مورداستفاده در پوسته‌ها، آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM E8 با استفاده از دستگاه تست کشش سنتام در دانشگاه آزاد اسلامی مرکز لشت‌نشا-زیباکنار انجام شده است. نمودار تنش-کرنش به دست آمده در شکل ۱ ارائه شده و مشخصات به دست آمده از آن در جدول ۱ بیان شده است. همچنین تمام مواد پرکننده از جنس پلی‌اتیلن ارتالون 6PLA می‌باشند که به منظور تعیین خواص مکانیکی پلی‌اتیلن مورداستفاده، آزمایش فشاری طبق استاندارد ISO 527-1 با استفاده از دستگاه تست فشار سنتام در دانشگاه آزاد اسلامی مرکز لشت‌نشا-زیباکنار انجام شده است و نمودار تنش-کرنش به دست آمده در شکل ۲ ارائه شده است و مشخصات مکانیکی حاصل از آن در جدول ۲ بیان شده است. ضریب پواسون از مرجع [۴۱] به دست آمده است.



شکل (۱): نمودار تنش کرنش فولاد نرم در محدوده نرخ کرنش شبه‌استاتیکی.

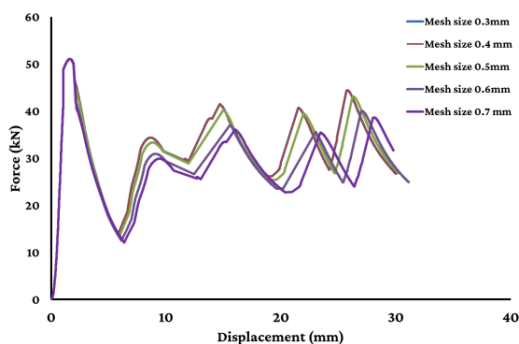


شکل (۲): نمودار تنش کرنش پلی‌اتیلن ارتالون در محدوده نرخ کرنش شبه‌استاتیکی.

میلی‌متر به تدریج روی صفحه صلب بالایی اعمال شد تا پوسته استوانه‌ای در چندین چین‌خوردگی لهیده شود. از الگوریتم عمومی تماس برای تعامل تماس بین پوسته جدارنازک، ماده پرکننده و دو صفحه صلب در شبیه‌سازی استفاده شد. ویژگی‌های تماسی به ترتیب تماس زبر با ضریب اصطکاک نامحدود (هنگامی که نقاط در تماس هستند، هیچ لغزشی رخ نمی‌دهد) و تماس سخت بود. خواص مواد با استفاده از نمودارهای تجربی به دست آمده از شکل‌های ۱ و ۲ تعریف شد و برای گسسته کردن لوله‌ها از اندازه‌های مختلف المان استفاده شد و تأثیر اندازه مش بر بار لهیدگی نمونه‌ها مطابق شکل ۶ و میانگین نیروی لهیدگی مطابق جدول ۳ مورد مطالعه قرار گرفت.

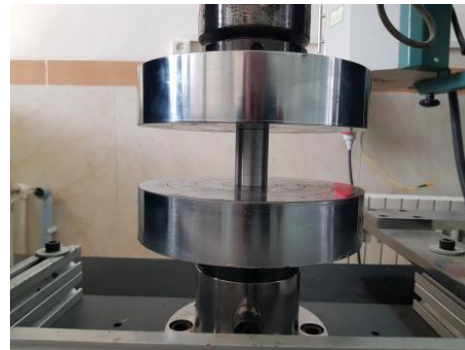
جدول (۳): میانگین نیروی لهیدگی عددی نمونه استوانه فولادی توخالی (St) بر حسب اندازه مش.

اندازه مش	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷
میانگین نیروی لهیدگی	۳۱/۹۸	۳۱/۹۸	۳۲/۴	۳۸/۱۶	۳۸/۸۶



شکل (۶): نمودار اثر اندازه مش بر نمودار نیرو-جابجایی نمونه استوانه فولادی توخالی (St).

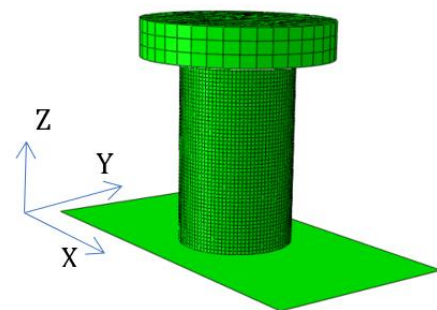
از المان جامد شکل‌پذیر هشت گره (C3D8R) با اندازه ۰/۴ میلی‌متر پس از آزمایش‌های همگرایی مش، برای پوسته فلزی و هسته ارتالون استفاده شدند چراکه هیچ تغییر قابل توجهی در پاسخ بار با مش‌های ظریف‌تر مشاهده نشد (شکل ۶) و صفحات بالا و پایین صلب در نظر گرفته شدند. جهت صحت سنجی شبیه‌سازی انجام شده، شکل موده‌های کمانشی و نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه گردید که در بخش بعد به آن پرداخته می‌شود.



شکل (۴): تصویر یک نمونه در دستگاه تست فشار سننم. در این آزمایش نمونه بر روی فک ثابت دستگاه قرار گرفته و سپس فک متحرک دستگاه با سرعت 10 mm/min نمونه را تحت بارگذاری فشار قرار می‌دهد. نیروهای وارده به نمونه توسط لودسل دستگاه و کوتاه‌شدگی نمونه بر اساس تغییر فاصله بین دو فک، توسط دستگاه ثبت شده و آزمایش تا زمانی که ظرفیت جذب انرژی نمونه پایان یابد و مقادیر نیرو فقط افزایشی شوند ادامه می‌یابد.

۳- شبیه‌سازی عددی

برای مدل‌سازی سه‌بعدی از نرم‌افزار تجاری ABAQUS/Explicit استفاده شد. در شکل ۵ چیدمان پوسته استوانه‌ای پرشده با پلی‌اتیلن دارای سه سوراخ و صفحه صلب پایینی و بالایی در فرآیند شبیه‌سازی بارگذاری شبه استاتیکی فشاری نشان داده شده است.



شکل (۵): چیدمان گسسته شده فک بالایی و پوسته و صفحه صلب.

از خواص مکانیکی مواد با استفاده از نتایج تجربی به دست آمده که در بخش (۲-۲) بیان شده در شبیه‌سازی استفاده شد. پوسته جدارنازک بر روی صفحه صلب و ثابت پایین قرار گرفت و یک جابجایی عمودی به اندازه ۵۰

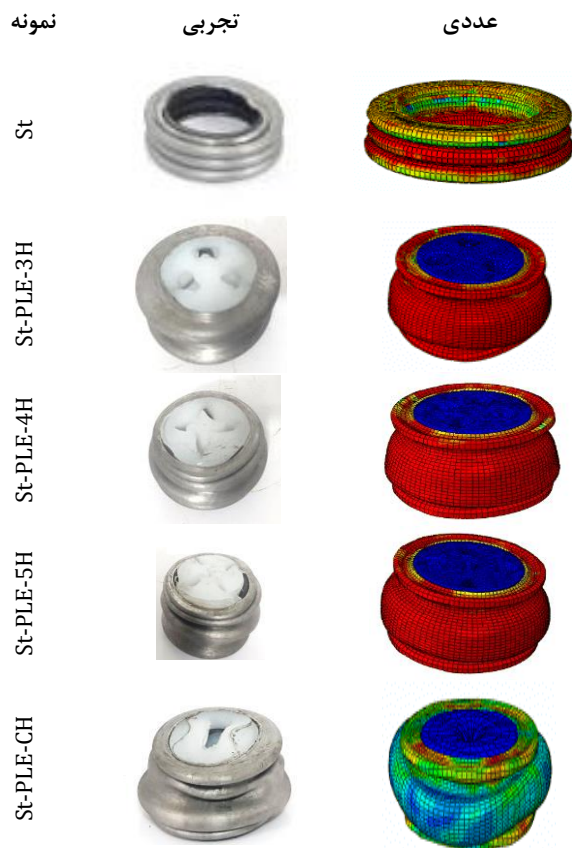
۴- نتایج تجربی و عددی و تحلیل داده‌ها

شکل‌های ۷ الف الی ۷ ه مقایسه نمودار نیرو بر حسب جابجایی حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی را برای نمونه‌های پوسته استوانه‌ای جدارنازک توخالی و پرشده با پلی‌اتیلن ارتالون، مطابق مشخصات جدول (۳) نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های ۷ الف الی ۷ ه مشخص است، تطابق خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی وجود دارد. در جدول ۴ مقادیر نیروی بیشینه لهیدگی اولیه (PCF)، میزان کوتاه‌شدگی در این نیرو و نیروی میانگین لهیدگی (MCF) در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی برای نمونه‌های جدول الف موجود در پیوست با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین، شکل‌های کمانش تجربی و عددی نمونه‌ها مطابق شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که کوتاه‌شدگی‌های تجربی، نیروهای بیشینه اولیه و اشکال کمانش در مقایسه با شبیه‌سازی عددی با دقت خوبی پیش‌بینی شده است. همچنین، بر اساس کوتاه‌شدگی‌های محوری و اشکال کمانش، مشخص شده است که به دلیل کاهش ضخامت پوسته فولادی در نمونه‌های پرشده با پلی‌اتیلن، مقادیر نیروی بیشینه لهیدگی اولیه کاهش و میانگین نیروهای لهیدگی افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از پرکننده پلی‌اتیلن سبب کاهش نوسانات نیرو در نمودارهای نیرو-جابجایی نشان داده شده در شکل ۷ می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که کوتاه‌شدگی‌های تجربی، نیروهای بیشینه اولیه و اشکال کمانش در مقایسه با شبیه‌سازی عددی با دقت خوبی پیش‌بینی شده است. همچنین، بر اساس کوتاه‌شدگی‌های محوری و اشکال کمانش، مشخص شده است که به دلیل کاهش ضخامت پوسته فولادی در نمونه‌های پرشده با پلی‌اتیلن، مقادیر نیروی بیشینه لهیدگی اولیه کاهش و میانگین نیروهای لهیدگی افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از پرکننده پلی‌اتیلن سبب کاهش نوسانات نیرو در نمودارهای نیرو-جابجایی نشان داده شده در شکل ۷ می‌شود. در ادامه، به بررسی پارامترهای جذب انرژی پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت لوله، مقدار نیروی بیشینه لهیدگی اولیه

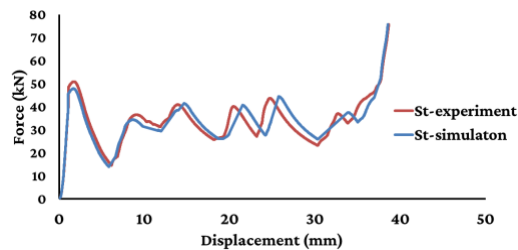
افزایش یافته است اما به به‌کارگیری پرکننده پلی‌اتیلن ارتالون مقدار میانگین نیروی لهیدگی را نسبت به نمونه خالی افزایش می‌دهد. همچنین در مقایسه نمونه‌های پرشده با یکدیگر مشاهده می‌شود که نمونه دارای چهار سوراخ محوری دارای بیشترین مقدار نیروی میانگین لهیدگی و نمونه‌های دارای سوراخ مرکزی و دارای پنج سوراخ محوری کمترین میزان نیروی میانگین لهیدگی را دارند. این امر نشان می‌دهد که افزایش تعداد سوراخ یا استفاده از سوراخ مرکزی اگر به‌گونه‌ای باشد که از تشکیل یک هسته استوانه‌ای شکل از پرکننده در مرکز لوله جلوگیری نماید، می‌تواند سبب کاهش نیروهای میانگین لهیدگی شود. به عبارتی فضای خالی بیشتری برای ایجاد چین‌خوردگی در پوسته فلزی به دلیل و فروریزش هسته ارتالونی به سمت بخش خالی وجود دارد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت لوله، مقدار انرژی جذب شده افزایش یافته است همچنین استفاده از پرکننده پلی‌اتیلن ارتالون سبب کاهش میزان جذب انرژی می‌شود اما این در حالی است که مطابق نمودار شکل ۹ استفاده از پرکننده موجب سبب کاهش نیروی بیشینه لهیدگی نیز می‌شود. در میان نمونه‌های پرشده، نمونه دارای چهار سوراخ محوری از میزان جذب انرژی بیشتری برخوردار است که دلیل این امر بالا بودن میانگین نیروی لهیدگی در آن است. به‌طور کلی مقدار جذب انرژی در نمونه‌های دارای سه، چهار و پنج سوراخ و دارای سوراخ مرکزی به ترتیب $۰.۲۹/۶$ ، $۰.۱۰/۸۹$ ، $۰.۳۴/۳۴$ و $۰.۳۰/۱۴$ نسبت به نمونه توخالی با ضخامت بالاتر، کاهش جذب انرژی داشتند. هرچند کاهش جذب انرژی اگر به‌تنهایی در نظر گرفته شود نشان‌دهنده عملکرد ضعیف یک سازه به‌عنوان جاذب انرژی باشد اما کاهش پارامترهایی مانند نیروی بیشینه لهیدگی و میانگین نیروی لهیدگی تأثیر بسیاری در انتخاب یک سازه به‌عنوان یک جاذب با عملکرد بهتر دارند که این موارد در نمونه‌های پرشده همانند نمونه دارای پنج سوراخ محوری و یا سوراخ مرکزی دیده می‌شود. یکی دیگر از پارامترهای قابل‌بررسی در جذب انرژی، بازده نیروی لهیدگی و نوسانی شدن ظرفیت باربری است. شکل ۱۱ نمودار مقایسه‌ای این دو پارامتر را برای نمونه خالی و نمونه‌های پرشده از پلی‌اتیلن ارتالون نشان می‌دهد.

جدول (۴): کوتاه‌شدگی محوری، نیروی بیشینه لهیدگی اولیه و میانگین نیروی لهیدگی تجربی و عددی.

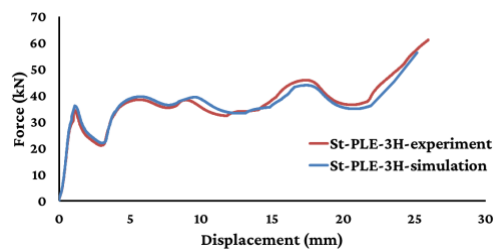
نمونه	کوتاه‌شدگی (mm)		نیروی بیشینه (kN)		نیروی میانگین (kN)	
	تجربی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی
St	۱/۶۹	۱/۵۳	۵۰/۸۷	۵۰/۹۳	۳۱/۸۶	۳۱/۹۸
St-PLE-3H	۱/۰۲	۱/۱۱	۳۴/۵۸	۳۵/۰۶	۳۵/۱۱	۳۵/۸۸
St-PLE-4H	۱/۹۴	۱/۹۹	۳۷/۴۸	۳۸/۰۱	۳۶/۳۳	۳۷/۷۸
St-PLE-5H	۱/۵۸	۱/۶۴	۳۰/۸۰	۳۱/۰۵	۳۲/۱۷	۳۳/۰۳
St-PLE-CH	۲/۷۲	۲/۸۳	۳۷/۶۹	۳۷/۷۵	۳۱/۸۷	۳۲/۰۱



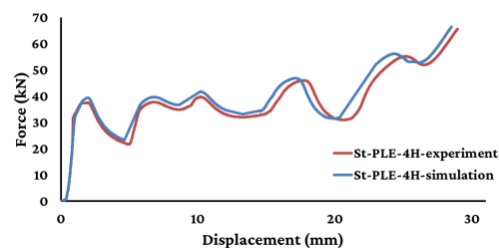
شکل (۸): شکل‌های کمانش تجربی و عددی نمونه‌ها.



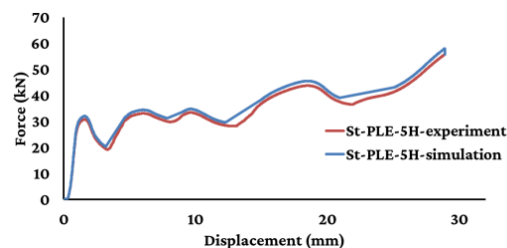
(الف)



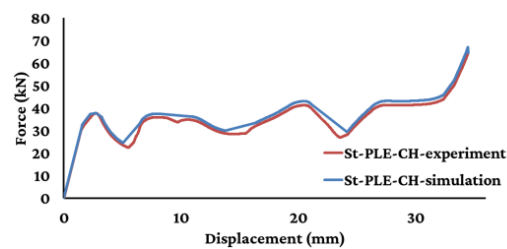
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل (۷): مقایسه منحنی نیرو-جابجایی تجربی و عددی نمونه‌های (الف) لوله فولادی توخالی، لوله فولادی: (ب) پرشده با پلی‌اتیلن دارای سه سوراخ، (ج) پرشده با پلی‌اتیلن دارای چهار سوراخ، (د) پرشده با پلی‌اتیلن دارای پنج سوراخ، (ه) پرشده با پلی‌اتیلن دارای سوراخ مرکزی.

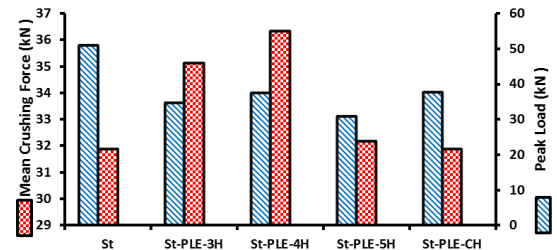
نمونه دارای پنج سوراخ محوری دارای بالاترین بازده نیروی لهیدگی و نمونه دارای سه سوراخ دارای کمترین نوسانی شدن ظرفیت باربری می‌باشند.

۶- نتیجه‌گیری

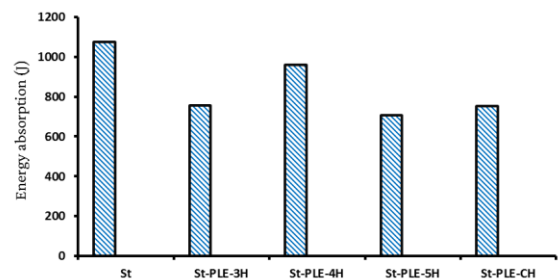
در این تحقیق به مطالعه تجربی و شبیه‌سازی عددی پوسته‌های جدارنازک فولادی توخالی و پر شده با پلی‌اتیلن ارتالون به منظور بررسی پارامترهای جذب انرژی آن‌ها پرداخته شد. در ابتدا پس از مروری بر مطالعات پیشین، مشخصات مکانیکی و هندسی نمونه‌ها و شرایط انجام آزمایش‌های تجربی و چگونگی مدل‌سازی عددی بیان شد و ادامه نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و مدل‌سازی عددی بیان گردید. با مشاهده نتایج می‌توان دریافت شبیه‌سازی عددی انجام‌شده مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد و می‌تواند در مدل‌سازی حالت‌های مختلف پرکننده پلی‌اتیلن در لوله همانند تغییر تعداد سوراخ‌های محوری، وجود شیار و یا سوراخ‌های شعاعی در پرکننده به کار رود. همچنین دیده شد که کاهش در ضخامت پوسته فلزی لوله سبب کاهش در مقادیر نیروی بیشینه لهیدگی اولیه می‌شود همچنین استفاده از پرکننده پلی‌اتیلن مقادیر نیروی میانگین لهیدگی را افزایش می‌دهد که این امر انتقال نیرو به جسم را یکنواخت‌تر می‌نماید. همچنین در شرایطی که جرم تمام نمونه‌های خالی و پر یکسان است، مقدار جذب انرژی نمونه‌های پر به دلیل کاهش ضخامت لوله فلزی نسبت به نمونه خالی کاهش می‌یابد اما نیروی بیشینه لهیدگی در آن‌ها کاهش می‌یابد و بازده نیروی لهیدگی در آن‌ها بیشتر می‌شود. به‌طور کلی می‌توان بیان نمود استفاده از پرکننده پلی‌اتیلن سبب یکنواختی در بار انتقالی به سرنشینان محفظه تحت حفاظت می‌شود و میزان بار بیشینه لهیدگی اولیه را کاهش می‌دهد.

۷- مراجع

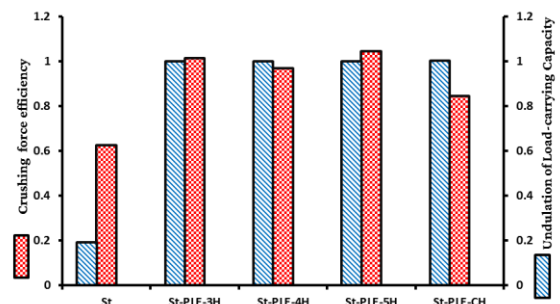
[1] Li S, Guo X, Li Q, Ruan D, Sun G. On lateral compression of circular aluminum, CFRP and GFRP tubes. Composite Structures. 2020;232:111534.



شکل (۹): نمودار مقایسه نیروی بیشینه لهیدگی و نیروی میانگین لهیدگی برای نمونه‌های توخالی و پر شده با پلی‌اتیلن.



شکل (۱۰): نمودار مقایسه جذب انرژی نمونه‌های خالی و پر شده با پلی‌اتیلن ارتالون.



شکل (۱۱): نمودار مقایسه نیروی لهیدگی و نوسانی شدن ظرفیت باربری نمونه‌های خالی و پر شده با پلی‌اتیلن ارتالون مقادیر بالاتر در بازده نیروی لهیدگی نشان‌دهنده کماتش پیش‌رونده و مقادیر بالاتر نوسانی شدن ظرفیت باربری نشان‌دهنده ناپایداری در تغییر شکل در زمان جذب انرژی می‌باشند. همان‌طور که از نمودار شکل ۱۱ مشخص است، نمونه‌های دارای پرکننده پلی‌اتیلن ارتالون هرچند دارای بازده نیروی لهیدگی بیشتری نسبت به نمونه خالی هستند اما ناپایداری در تغییر شکل‌ها بیشتر است که دلیل آن جلوگیری از شکل‌گیری کماتش پیش‌رونده به دلیل استفاده از پرکننده و ایجاد محدودیت برای شکل‌گیری یکنواخت چین‌ها در پوسته فلزی است و در بین نمونه‌های پر شده،

windowed tubes under dynamic axial loading. *Thin-Walled Structures*. 2017;119:412-20.

[14] Kathiresan M. Influence of shape, size and location of cutouts on crashworthiness performance of aluminium conical frusta under quasi-static axial compression. *Thin-Walled Structures*. 2020;154:106793.

[15] Song J, Guo F. A comparative study on the windowed and multi-cell square tubes under axial and oblique loading. *Thin-Walled Structures*. 2013;66:9-14.

[16] Song J, Chen Y, Lu G. Axial crushing of thin-walled structures with origami patterns. *Thin-Walled Structures*. 2012;54:65-71.

[17] Zhou C, Wang B, Ma J, You Z. Dynamic axial crushing of origami crash boxes. *International journal of mechanical sciences*. 2016;118:1-12.

[18] Ciampaglia A, Fiumarella D, Niuitta CB, Ciardiello R, Belingardi G. Impact response of an origami-shaped composite crash box: Experimental analysis and numerical optimization. *Composite Structures*. 2021;256:113093.

[19] Baroutaji A, Sajjia M, Olabi A-G. On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: recent advances and future developments. *Thin-Walled Structures*. 2017;118:137-63.

[20] Isaac CW, Ezekwem C. A review of the crashworthiness performance of energy absorbing composite structure within the context of materials, manufacturing and maintenance for sustainability. *Composite Structures*. 2021;257:113081.

[21] Abramowicz W, Jones N. Dynamic axial crushing of square tubes. *International Journal of Impact Engineering*. 1984;2(2):179-208.

[22] Abramowicz W, Jones N. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. *International Journal of Impact Engineering*. 1986;4(4):243-70.

[23] Liu W, Lian J, Münstermann S, Zeng C, Fang X. Prediction of crack formation in the progressive folding of square tubes during dynamic axial crushing. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020;176:105534.

[24] Guillow S, Lu G, Grzebieta R. Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium

[2] Zhang W, Qin Q, Li J, Li K, Poh L, Li Y, et al. Deformation and failure of hybrid composite sandwich beams with a metal foam core under quasi-static load and low-velocity impact. *Composite Structures*. 2020;242:112175.

[3] Sebaey T, Mahdi E. Filler strengthening of foam-filled energy absorption devices using CFRP beams. *Composite Structures*. 2017;160:1-7.

[4] Sun G, Chen D, Wang H, Hazell PJ, Li Q. High-velocity impact behaviour of aluminium honeycomb sandwich panels with different structural configurations. *International Journal of Impact Engineering*. 2018;122:119-36.

[5] Bai R, Guo J, Lei Z, Liu D, Ma Y, Yan C. Compression after impact behavior of composite foam-core sandwich panels. *Composite Structures*. 2019;225:111181.

[6] Andrews K, England G, Ghani E. Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1983;25(9-10):687-96.

[7] Yao S, Huo Y, Yan K, Xu P. Crashworthiness study on circular hybrid corrugated tubes under axial impacts. *Thin-Walled Structures*. 2019;145:106358.

[8] Li Z, Ma W, Hou L, Xu P, Yao S. Crashworthiness analysis of corrugations reinforced multi-cell square tubes. *Thin-Walled Structures*. 2020;150:106708.

[9] Ma W, Xie S, Li Z. Mechanical performance of bio-inspired corrugated tubes with varying vertex configurations. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020;172:105399.

[10] Xu P, Xu K, Yao S, Yang C, Huang Q, Zhao H, et al. Parameter study and multi-objective optimisation of an axisymmetric rectangular tube with diaphragms for subways. *Thin-Walled Structures*. 2019;136:186-99.

[11] Li Z, Yao S, Ma W, Xu P, Che Q. Energy-absorption characteristics of a circumferentially corrugated square tube with a cosine profile. *Thin-Walled Structures*. 2019;135:385-99.

[12] Tran T. Study on the crashworthiness of windowed multi-cell square tubes under axial and oblique impact. *Thin-Walled Structures*. 2020;155:106907.

[13] Nikkhah H, Guo F, Chew Y, Bai J, Song J, Wang P. The effect of different shapes of holes on the crushing characteristics of aluminum square

- [34] Baykasoğlu A, Baykasoğlu C, Cetin E. Multi-objective crashworthiness optimization of lattice structure filled thin-walled tubes. *Thin-Walled Structures*. 2020;149:106630.
- [35] Patel V, Tiwari G, Dumpala R. Crashworthiness analysis of multi-configuration thin walled co-axial frusta tube structures under quasi-static loading. *Thin-Walled Structures*. 2020;154:106872.
- [36] Cho Y-B, Bae C-H, Suh M-W, Sin H-C. A vehicle front frame crash design optimization using hole-type and dent-type crush initiator. *Thin-Walled Structures*. 2006;44(4):415-28.
- [37] Bodlani S, Yuen S, Nurick G. The energy absorption characteristics of square mild steel tubes with multiple induced circular hole discontinuities—part I: experiments. *Journal of applied mechanics*. 2009;76(4).
- [38] Bodlani S, Chung Kim Yuen S, Nurick G. The energy absorption characteristics of square mild steel tubes with multiple induced circular hole discontinuities—Part II: numerical simulations. *Journal of applied mechanics*. 2009;76(4).
- [39] Li G, Xu F, Sun G, Li Q. A comparative study on thin-walled structures with functionally graded thickness (FGT) and tapered tubes withstanding oblique impact loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2015;77:68-83.
- [40] Zhang Z, Lei H, Xu M, Hua J, Li C, Fang D. Out-of-plane compressive performance and energy absorption of multi-layer graded sinusoidal corrugated sandwich panels. *Materials & Design*. 2019;178:107858.
- [41] Koh hei Nitta MY. Poisson's ratio and mechanical nonlinearity under tensile deformation in crystalline polymers. *Croatia: Rheology, Open Access; Vicente, JD, Ed.; Intec: Rijeka; 2012.*
- tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2001;43(9):2103-23.
- [25] Li Z-g, Yang H-f, Zhang Z-s, Ye S, Han Z-t, Wei J-f. Crashworthiness of extruded magnesium thin-walled square tubes. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019;29(6):1223-32.
- [26] Wang Z, Zhang J, Li Z, Shi C. On the crashworthiness of bio-inspired hexagonal prismatic tubes under axial compression. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020;186:105893.
- [27] Chen Y, Bai Z, Zhang L, Wang Y, Sun G, Cao L. Crashworthiness analysis of octagonal multi-cell tube with functionally graded thickness under multiple loading angles. *Thin-Walled Structures*. 2017;110:133-9.
- [28] Chen J, Li E, Li Q, Hou S, Han X. Crashworthiness and optimization of novel concave thin-walled tubes. *Composite Structures*. 2022;283:115109.
- [29] Marzbanrad J, Ebrahimi MR. Multi-objective optimization of aluminum hollow tubes for vehicle crash energy absorption using a genetic algorithm and neural networks. *Thin-Walled Structures*. 2011;49(12):1605-15.
- [30] Albak Eİ. Crashworthiness design and optimization of nested structures with a circumferentially corrugated circular outer wall and inner ribs. *Thin-Walled Structures*. 2021;167:108219.
- [31] Zou X, Gao G-j, Dong H-p, Li J, Zhou X-s, Chen W, et al. Crushing analysis and multi-objective optimization of bitubular hexagonal columns with ribs. *Journal of Central South University*. 2017;24(5):1164-73.
- [32] Xu P, Yang C, Peng Y, Yao S, Zhang D, Li B. Crash performance and multi-objective optimization of a gradual energy-absorbing structure for subway vehicles. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016;107:1-12.
- [33] Bahramian N, Khalkhali A. Crashworthiness topology optimization of thin-walled square tubes, using modified bidirectional evolutionary structural optimization approach. *Thin-Walled Structures*. 2020;147:106524.

پیوست:

جدول الف: مشخصات هندسی نمونه‌های مورد آزمایش

نام نمونه	جنس	ارتفاع (mm)	قطر خارجی (mm)	قطر داخلی سوراخ (mm)	ضخامت (mm)	جرم (g)
PLE	پلی اتیلن (Ertalon 6 PLA)	۵۰	۳۱/۳	۰	۳۱/۳	۴۰
St	فولاد نرم (mild steel)	۵۰	۳۰/۴	۲۸	۱/۲	۴۵
St-PLE-CH	فولاد-پلی اتیلن	۵۰	St	St	PLE	۴۵
			۲۸	۲۸	۲۹/۶	۴
St-PLE-3H	فولاد-پلی اتیلن	۵۰	St	St	PLE	۴۵
			۲۸	۲۸	۲۹/۶	۲۸
St-PLE-4H	فولاد-پلی اتیلن	۵۰	St	St	PLE	۴۵
			۲۸	۲۸	۲۹/۶	۲۸
St-PLE-5H	فولاد-پلی اتیلن	۵۰	St	St	PLE	۴۵
			۲۸	۲۸	۲۹/۶	۲۸



Investigating the Energy Absorption Parameters of Steel Cylindrical Shells Filled with Polyethylene Subjected to Quasi-static Loading

Farid Raouf¹, Javad Rezapour^{2*}, Sina Gohari Rad³, Reza Rajabiehfarid³

¹ Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran.

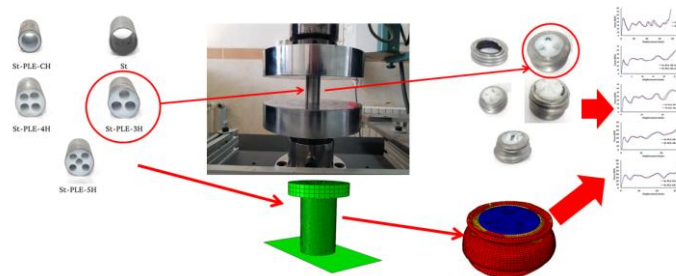
² Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran.

³ Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran.

HIGHLIGHTS

- Polyethylene filler reduces the peak crushing force
- Energy absorption decreases in specimen with fillers
- force transmission is more uniform in the filled sample

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 12 July 2022

Received in revised form: 30 July 2022

Accepted: 28 August 2022

Available online: 18 October 2022

*Correspondence:

rezapour@liau.ac.ir

How to cite this article:

F. Raouf, J. Rezapour, S.G. Rad, R. Rajabiehfarid. Investigating the energy absorption parameters of steel cylindrical shells filled with polyethylene subjected to quasi-static loading. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2022; 18(4):65-76.

Keywords:

Quasi-static

Energy absorption

Cylindrical shell

Polyethylene filler

Mild steel tube

ABSTRACT

In this research, the main goal is to investigate the energy absorption parameters of cylindrical steel tubes filled with polyethylene. For this purpose, experimental tests and numerical simulation were used. In order to compare the performance of energy absorption, empty steel cylindrical tube specimens and four type of steel cylindrical tube filled with polyethylene specimens with different axial perforations in the filling part were subjected to quasi-static compression test and compared with each other. Numerical simulation was also done with the help of ABAQUS software and experimental results were used for the mechanical properties of materials. The results of the numerical simulation showed a good agreement with the experimental results. Also, the results showed that the use of polyethylene filler in the filled samples causes a decrease in the initial peak crushing force values, an increase in the mean crushing force values and also a decrease in energy absorption, and an increase in the crushing force efficiency compared to the empty samples. For example, in the sample filled with polyethylene and having five axial holes, there was a 60.5% decrease in the maximum crushing force and an increase in the crushing force efficiency by 166.77% compared to the empty sample. Also, the samples with five holes have the highest crushing force efficiency among the samples filled with polyethylene.

