

تأثیر حفره، زاویه و راستای اعمال بار مورب بر روی پارامترهای ضربه پذیر لوله‌های درپوش‌دار استوانه‌ای: مطالعه تجربی و شبیه سازی عددی

سجاد آذرخش^۱، علی قمریان^۲ و محمدجواد رضوانی^{۳*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۰۸	یکی از مهمترین مسائلی که در جاذب‌های انرژی به عنوان سازه‌های جدارنازک مورد توجه طراحان قرار گرفته‌است، میزان جذب انرژی و نیروی پیک اولیه فروریزش می‌باشد. در این مطالعه، ضربه‌پذیری لوله‌های آلومینیومی درپوش‌دار استوانه‌ای جدار نازک تحت بار محوری و مورب بررسی می‌شود. در این طراحی، به منظور کاهش ماکزیمم نیروی پیک اولیه فروریزش، حفره‌هایی بر روی جاذب با فاصله‌های مشخص در طول لوله ایجاد شده‌اند. وجود حفره‌های حلقوی به عنوان نقص در جاذب، باعث کاهش نیروی وارد به سازه اصلی و سرنشینان می‌شود. در این مقاله، با استفاده از شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار آباکوس، اثر وجود حفره، زاویه و راستای اعمال بار مورب بر روی تغییرات نمودار نیرو-جابجایی لوله‌های درپوش‌دار مطالعه می‌شود. همچنین، به منظور بررسی صحت شبیه‌سازی عددی، تعدادی تست تجربی انجام گردید که نتایج قابل قبولی حاصل شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که اعمال بار مورب با زاویه ۱۰ درجه و در خلاف راستای حفره‌ها بر نحوه فروریزش، میزان جذب انرژی و کاهش نیروی پیک اولیه مؤثر بوده و زوایای بارگذاری ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه تغییرات زیادی در نیروی پیک اولیه و جذب انرژی ندارند.
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۰۵	
واژگان کلیدی: نیروی پیک اولیه فروریزش، لوله درپوش‌دار استوانه، حفره، شبیه سازی عددی، بارگذاری مورب،	

۱-مقدمه

گوس، با کاهش ۱۰ درصدی وزن کنترل در سیستم‌های حمل و نقل جاده‌ای می‌توان حدود ۷-۶٪ کاهش در مصرف سوخت حاصل کرد [۲]. برای این منظور، نیاز به یک ساختار سبک برای جذب انرژی حاصل از برخورد ضروری می‌باشد [۳]. به گفته جونز، ضربه‌پذیری سازه‌ای برای بهبود ایمنی مسافران در یک سیستم حمل و نقل با جذب انرژی لوله‌های جدار نازک امکان‌پذیر می‌شود. همچنین برای محدود کردن نیروها و کاهش سرعت وارد شده به مسافران مورد نیاز است [۴]. به منظور کاهش ماکزیمم نیروی لهیدگی و بهبود پایداری فروریزش، بسیاری از محققان راه حل‌های مختلفی شامل راه انداز یا آغازگر [۵-۸]، لوله‌های شیاردار یا موجدار [۹-۱۲]، سازه‌های دیواره نازک با خواص

طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی (WHO) در سال ۲۰۱۵، حدود ۱/۲۵ میلیون نفر هر ساله در تصادفات جاده‌ای جان خود را از دست می‌دهند که ۳٪ از تولید ناخالص داخلی آنها برای بیشتر کشورهای هزینه می‌شود [۱]. بنابراین، یک سیستم حمل و نقل ایمن با قابلیت ضربه‌پذیری یک نیاز روز است. طراحی لوله‌های استوانه‌ای به عنوان ساختارهای اصلی جذب انرژی در هواپیما، اتومبیل، سازه‌های هوافضا، آسانسورها و برخی سازه‌های زبردیری می‌تواند نقش مهمی در جذب انرژی ضربه و کاهش نیروی پیک اولیه برای کاهش سطح شتاب تجربه شده توسط مسافران داشته باشد. طبق محاسبات نظری

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.rezvani@semnaniau.ac.ir

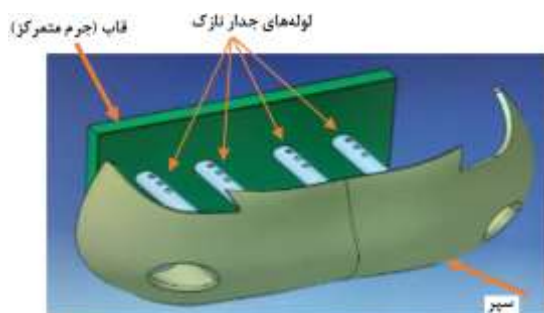
۱. باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۲. باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳. دانشیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

بودلانی و همکاران، مشخصات جذب انرژی لوله‌های فولادی مربعی با چندین حفره دایره‌ای را بصورت تجربی و شبیه‌سازی عددی بررسی نمودند [۲۳، ۲۴]. نتایج نشان داد که حفره‌ها باعث کاهش نیروی اوج اولیه می‌شود اما افزایش تعداد حفره‌ها بیش از ۲ حفره در هر طرف باعث کاهش معنادار نیروی اوج اولیه نمی‌شود.

هان و همکاران، با استفاده از شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار انسیس تاثیر ابعاد و موقعیت حفره‌های مربعی شکل را بر روی نحوه فروریزش و میزان جذب انرژی پوسته‌های استوانه‌ای بررسی نمودند و به کمک آزمایش‌های تجربی نتایج بدست آمده را با نتایج عددی مقایسه کردند [۲۵]. تاکنون مطالعه کاملی از تأثیر حفره، زاویه و راستای اعمال بارگذاری مورب بر نحوه فروریزش لوله‌های استوانه‌ای درپوش‌دار و مقایسه آن با لوله‌های ساده (بدون حفره) کاری انجام نشده است. در مقاله حاضر، مطالعه تجربی و شبیه‌سازی عددی جذب انرژی، نیروی پیک اولیه فروریزش، نحوه تغییر شکل جاذب و همچنین تأثیر پارامترهای مؤثر بر عملکرد آنها از مهم‌ترین شاخصه‌های مورد بررسی در این پژوهش می‌باشند. در شکل (۱) نحوه قرارگیری ضربه‌گیرهای استوانه‌ای حفره دار در پشت سپر خودرو نشان داده شده است. قابل ذکر است که در این طراحی به منظور کاهش ماکزیمم نیروی پیک اولیه فروریزش، حفره‌هایی در سطح خارجی جاذب با فاصله‌های مشخص در طول لوله ایجاد شده است.



شکل ۱- نحوه قرارگیری جاذب‌های استوانه‌ای حفره‌دار در پشت سپر

۲- مشخصات نمونه آزمایش

لوله‌های درپوش‌دار استوانه‌ای از ورق آلومینیوم سری ۱۰۵۰ بوده که به روش شکل دهی چرخشی^۱ ساخته شده‌اند. روش شکل دهی چرخشی یکی از روش‌های شکل‌دهی

و ضخامت‌های مناسب [۱۳، ۱۴] و لوله‌های چند جزئی [۱۶، ۱۵] پیشنهاد داده‌اند.

ژائو و همکاران، اثرات نقص در رفتارهای کمانشی پوسته‌های آلومینیوم استوانه‌ای تحت فشار را با استفاده از روش‌های تجربی و عددی بررسی کردند [۱۷].

لیو و همکاران، شبیه‌سازی عددی تغییر شکل و جذب انرژی لوله‌های مربع دیواره نازک با حفره‌های مربعی تحت بارگذاری محوری با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام دادند [۱۸]. آنها نشان دادند که نیروی پیک اولیه لوله‌های مربع با افزایش طول حفره‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش ناحیه بریدگی در لوله‌های مربع، جذب انرژی کل و جذب انرژی مخصوص کاهش می‌یابد.

هیلبرگر و همکاران، نحوه فروریزش و میزان جذب انرژی لوله‌های استوانه‌ای کامپوزیتی با حفره دایره‌ای شکل تحت بارگذاری محوری را بررسی نمودند. نتایج به دست آمده نشان داد که وجود حفره در نوع کمانش و نحوه فروریزش تأثیرگذار است. همچنین، تأثیر ابعاد حفره و نقص‌های هندسی اولیه مورد بررسی قرار گرفت و نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه گردید [۱۹].

علوی نیا و چهاردولی بررسی تجربی و عددی تأثیر سوراخ و انحنای لبه بر ویژگی‌های فروپاشی جاذب‌های استوانه‌ای تحت بار محوری را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش تعداد سوراخ‌ها، نیروی بیشینه کمتر و کارایی بیشتر می‌شود. همچنین، در بارگذاری ضربه‌ای ایجاد انحنا در لبه منجر به کاهش نیروی بیشینه، کاهش انرژی جذب شده و افزایش راندمان می‌گردد [۲۰].

چهاردولی و همکاران با استفاده از الگوریتم‌های بهینه سازی، ضخامت بهینه دیوار و موقعیت سوراخ در لوله‌های مخروط فولادی را انجام دادند. نتایج نشان داد که افزایش قطر سوراخ منجر به کاهش حداکثر نیرو و انرژی ویژه می‌شود. همچنین، صرف نظر از قطر سوراخ، بهترین موقعیت برای سوراخ‌ها در قسمت فوقانی مخروط می‌باشد [۲۱].

نیکخواه و همکاران ضربه‌پذیری لوله‌های حفره‌دار با اشکال مختلف حفره را تحت بارگذاری محوری بررسی کردند. آنها یافتند که یک لوله دایره‌ای با حفره مربع بهترین ویژگی‌های جذب انرژی را از خود نشان می‌دهد [۲۲].

^۱ Spinning

این دستگاه دارای دو فک یکی در بالا و دیگری در پایین است. فک پایین دستگاه ثابت بوده ولی فک بالا می‌تواند با سرعت ثابت یا متغیر، در مسافت تعریف شده حرکت کند. نمونه‌های ساخته‌شده با در نظر گرفتن شرط تکیه‌گاهی، بین دو فک قرار گرفته و نمودار نیرو-جابجایی در حین تغییر شکل توسط نرم‌افزار دستگاه استخراج می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۳- نحوه قرار گرفتن نمونه‌های درپوش‌دار استوانه‌ای بر روی دستگاه تست فشار (الف) لوله ساده (ب) لوله حفره‌دار

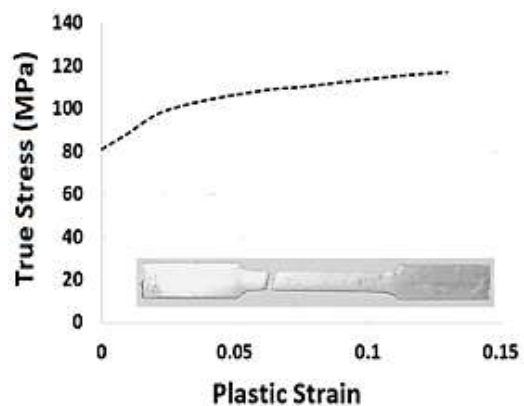
۳- تست تجربی

در این مطالعه، با توجه به انجام آزمایشات شبه استاتیک، سرعت جابجایی فک بالا ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و مسافتی که فک طی می‌کند ۴۴ میلی‌متر، معادل ۸۰ درصد ارتفاع اولیه نمونه‌ها، انتخاب شده‌است. همچنین، برای افزایش دقت نتایج، تعداد ۳ نمونه آزمایش انجام شده و سپس میانگین مقادیر کمیت‌های مورد نظر شامل جذب انرژی،

فلزات است که در آن از ترکیب نیرو و چرخش، برای ساخت لوله‌های توخالی با صافی سطح بالا و بدون درز استفاده می‌شود [۲۶]. مشخصات نمونه‌های آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده‌است که با یک کد مشخص شده‌اند. برای لوله درپوش‌دار استوانه‌ای ساده (بدون حفره) از مخفف SCCT^۱ و برای نمونه حفره‌دار از مخفف CCHT^۲ استفاده شده‌است. لازم به ذکر است که در پوسته حفره‌دار، سه حفره با قطر ۵ میلی‌متر وجود داشته که این حفره‌ها به فاصله ۱۵ میلی‌متر از مرکز یکدیگر قرار گرفته‌اند و موقعیت ابتدایی‌ترین آنها در ۱۰ میلی‌متری لبه فوقانی لوله است. همچنین، برای شناسایی خصوصیات مکانیکی ورق آلومینیوم از آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM E8M-04 استفاده شده است [۲۷]. شکل (۲) نمودار تنش حقیقی- کرنش پلاستیک ورق آلومینیوم را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های استوانه‌ای درپوش‌دار بدون حفره و دارای حفره دایروی بر حسب میلی‌متر

نام نمونه	قطر	ضخامت	طول	قطر حفره
SCCT	۵۰	۱/۱	۵۵/۰۵	-
CCHT	۵۰	۱/۰۴	۵۵/۱۴	۵



شکل ۲- نمودار تنش حقیقی-کرنش پلاستیک ورق آلومینیوم سری ۱۰۵۰

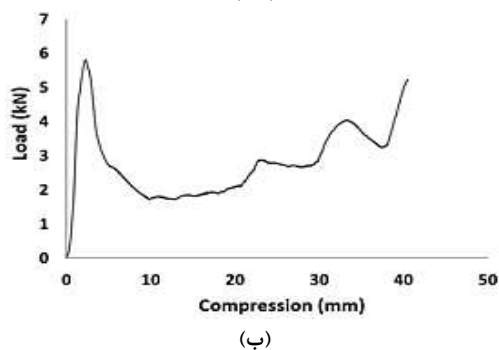
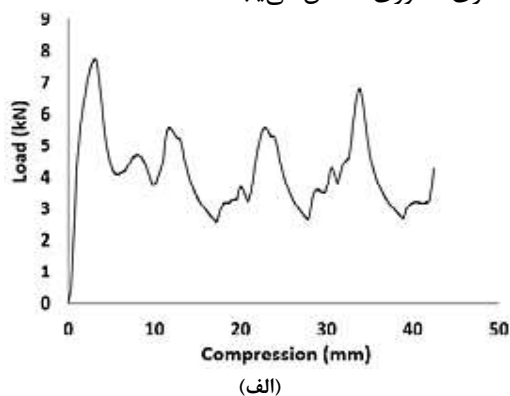
برای مقید کردن قاعده پایین نمونه‌های استوانه‌ای از قطعه فولادی استفاده شده‌است. در سطح این قطعه شیار هم قطر با پوسته‌های استوانه‌ای به عمق ۵ میلی‌متر تراشیده شده‌است تا از حرکت افقی و عمودی قاعده پایینی آن در طی فروریزش آن جلوگیری شود.

برای اعمال بارگذاری مطابق شکل (۳) از دستگاه تست یونیورسال ۲۵ تن ساخت شرکت سنتام استفاده شده‌است.

^۲ Circular Capped Tube with Hole

^۱ Simple Circular Capped Tube

ناشی از رفتار الاستیک نمونه استوانه‌ای تحت اثر بار فشاری قبل از آغاز کمانش است. کمانش سطح قاعده فوقانی نمونه استوانه‌ای باعث تشکیل نیروی پیک اولیه در نمودار نیرو- جابه‌جایی شده و سپس نیرو با تشکیل چین خارجی کاهش می‌یابد. وقتی دیواره لوله استوانه‌ای در محل چین با خودش تماس می‌یابد، نیرو افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین تشکیل و تکمیل یک چین، یک بیشینه محلی دیده می‌شود، این بیشینه به این دلیل رخ می‌دهد که همواره بخشی از یک چین به سمت خارج و بخش دیگر به سمت درون لوله قرار می‌گیرد. به طور کلی در طی فرآیند فروریزش، نیرو با تشکیل چین داخلی و خارجی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد در نتیجه منحنی نیرو- جابه‌جایی فروریزش متقارن محوری همواره به صورت تناوبی است. از طرفی دیگر، میزان افزایش اولین پیک نیروی فروریزش لوله درپوش‌دار استوانه‌ای ساده در مقایسه با سایر نیروها در منحنی نیرو-جابه‌جایی قابل توجه است. علت این امر پایداری و مقاومت اولیه لوله استوانه‌ای در برابر بارگذاری محوری است. این درحالی است که با افزایش جابه‌جایی و کمانش پوسته استوانه‌ای، پایداری آن در برابر بارگذاری محوری کاهش می‌یابد.



شکل ۵- نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌های درپوش‌دار استوانه‌ای (الف) بدون حفره و (ب) با حفره

شکل ۵-ب) نمودار نیرو-جابه‌جایی لوله درپوش‌دار

متوسط نیروی لهیدگی و اولین نیروی لهیدگی محاسبه و ثبت شده‌است.

۳-۱- نمونه‌های درپوش‌دار استوانه‌ای ساده و حفره‌دار

شکل (۴) تصویری از فروریزش نمونه‌های درپوش‌دار استوانه‌ای ساده و حفره‌دار تحت شرایط مرزی یک‌سرگیردار نشان می‌دهد. نحوه فروریزش لوله‌های ساده به صورت متقارن محوری و جاذب‌های دارای حفره به صورت کمانش نامنظم چهارگوش است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، وجود حفره به عنوان یک عیب هندسی سبب می‌شود، که تغییر شکل از این ناحیه آغاز شود و سپس در ناحیه دیگری از دیواره تکمیل شود. به عبارت دیگر، تغییرشکل در هر مرحله، از محل حفره بر روی لوله آغاز می‌شود.



شکل ۴- فروریزش نمونه‌های درپوش‌دار استوانه‌ای (الف) لوله ساده، (ب) لوله حفره تحت شرایط مرزی یک‌سرگیردار

در فروریزش متقارن محوری (لوله‌های ساده)، صرف‌نظر از بیشینه نیرو، که در ابتدای نمودار نیرو-جابه‌جایی رخ می‌دهد و مربوط به تغییرشکل الاستیک در لوله است، نیروی متوسط فروریزش ثابت است. این ویژگی از مزیت‌های این شیوه فروریزش است. زیرا در این نوع فروریزش تقریباً تمام لوله، کار پلاستیک انجام می‌دهد و بازده لهیدگی بسیار بالا است. بنابراین، حالت فروریزش متقارن محوری، مطلوب‌ترین شیوه فروریزش برای جذب انرژی می‌باشد.

در شکل (۵) مقایسه‌ای از نمودار نیرو-جابه‌جایی بین لوله‌های درپوش‌دار استوانه‌ای ساده و دارای حفره نشان داده شده‌است. همان‌طور که در شکل (۵)-الف ملاحظه می‌شود، در شروع بارگذاری، نیرو به طور تقریباً خطی تا یک مقدار ماکزیمم افزایش می‌یابد. این روند تغییر نیرو

درصد بیشتر از نمونه حفره‌دار است. یکی از پارامترهای بسیار مهم در ضربه‌گیرها، کاهش بیشینه نیرو لهیدگی در منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی است. در صورتی که این بیشینه نیروها افزایش چشم‌گیری داشته باشند باعث صدمه زدن به سلامت سرنشینان یا حسگرهای محموله متصل به ضربه‌گیر می‌شود. بنابراین گاهی لازم است این نیرو به شیوه‌ای از جمله وجود شیار، عیوب هندسی مانند برش بخشی از ضربه‌گیر و ... کاهش یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، وجود حفره در طول نمونه درپوش‌دار استوانه‌ای نیز می‌تواند عاملی برای کاهش بیشینه نیروی اولیه محسوب شود.

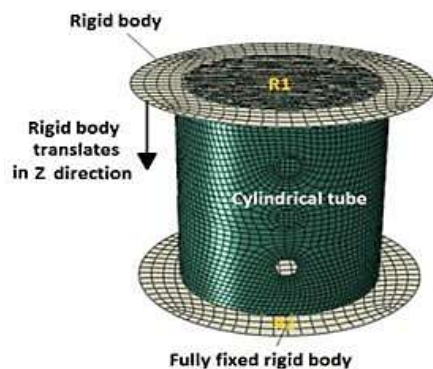
جدول ۲- نتایج آزمون‌های فروریزش نمونه‌های درپوش‌دار

ساده و حفره‌دار

نمونه	δ (mm)	$P_{initial}$ (kN)	E (J)	P_m (kN)
SCCT	۴۰/۵	۷/۶	۱۷۵	۴/۳
CCTH	۴۰/۵	۵/۴	۱۴۱	۳/۵

۴- شبیه‌سازی عددی

در این مطالعه، برای تحلیل رفتار لهیدگی نمونه‌های درپوش‌دار ساده و با حفره تحت اثر بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده‌است. بدلیل وجود حفره در طول لوله و همچنین وجود عیوب هندسی، شیوه فروریزش برخی از این نمونه‌ها به صورت نامتقارن شده‌است. بهترین روش برای ایجاد عیوب هندسی در شبیه‌سازی عددی استفاده از مودهای کمانش است. شبیه‌سازی رفتار ناحیه پلاستیک آلومینیوم با استفاده از منحنی تنش حقیقی- کرنش پلاستیک (شکل ۲) انجام گردید. در مدل‌سازی حاضر مطابق شکل (۷)، برای تمامی تغییر شکل‌های پوسته‌های استوانه‌ای (مقارن محوری و غیرمقارن) از مدل سه‌بعدی استفاده شده‌است.

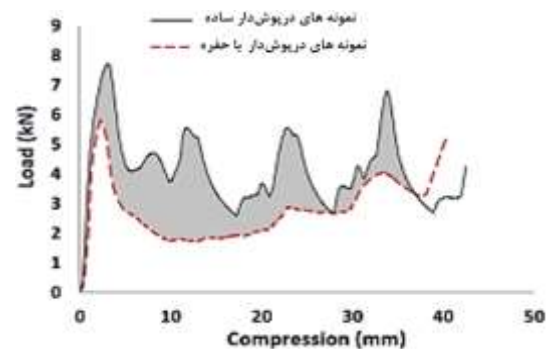


شکل ۷- لوله‌ی استوانه‌ای حفره‌دار با شرایط مرزی یکسرگیردار

استوانه‌ای حفره‌دار را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، نیرو در ابتدا با افزایش جابه‌جایی فک فوقانی دستگاه افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که این روند نیرو برخلاف شکل ۵-الف به دلیل عدم وجود بیشینه و کمینه متوالی، از تناوب حول متوسط نیروی فروریزش برخوردار نیست. علت اصلی این امر کمانش نامنظم بوده که خود ناشی از وجود حفره در نمونه آزمایشگاهی است. با توجه به وجود دو بیشینه نیرو در نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه استوانه‌ای حفره‌دار می‌توان دریافت که در این نمونه تنها دو لایه تغییرشکل تشکیل شده‌است و در نتیجه بدیهی است که میزان سطح زیر نمودار یا اصطلاحاً انرژی جذب‌شده آن کمتر از تغییرشکل متقارن محوری شود.

۳-۲- مقایسه نتایج آزمایشگاهی بین نمونه‌های استوانه‌ای ساده و دارای حفره

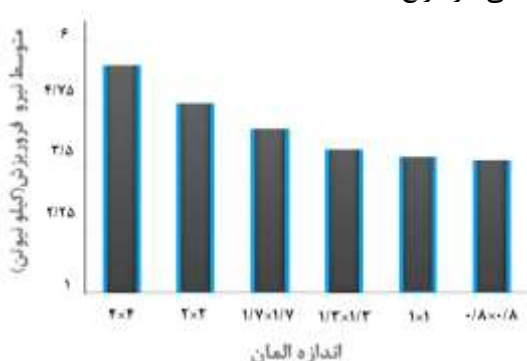
در شکل (۶) مقایسه‌ای از نمودار نیرو-جاب‌جایی بین نمونه‌های استوانه‌ای ساده و حفره‌دار نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، لوله ساده به دلیل چین‌های متقارن محوری دارای تعداد چین بیشتری نسبت به نمونه حفره‌دار است. این امر سبب افزایش جذب انرژی در نمونه ساده شده‌است.



شکل ۶- مقایسه نمودار نیرو-جاب‌جایی بین نمونه‌های درپوش‌دار ساده و حفره‌دار

جدول ۲ نتایج حاصل از تست تجربی فروریزش لوله‌های درپوش‌دار استوانه‌ای ساده و با حفره شامل اولین بیشینه نیرو ($P_{initial}$)، متوسط نیروی فروریزش (P_m) و انرژی جذب شده (E) تحت شرایط مرزی یکسرگیردار نشان می‌دهد. متوسط نیروی فروریزش نمونه‌های استوانه‌ای در طول جابه‌جایی (δ) از تقسیم انرژی جذب شده بر واحد طول جابه‌جایی محاسبه می‌شود. آنچه به وضوح مشخص است انرژی جذب شده و بیشینه نیروی فروریزش در پوسته استوانه‌ای درپوش‌دار ساده به ترتیب در حدود ۲۴ و ۴۰

بنابراین در تحقیق حاضر با توجه به همگرایی پاسخ فروریزش، اندازه المان‌های پوسته‌ای هر لوله $1/3 \times 1/3$ میلی‌متر مربع انتخاب شده‌است.

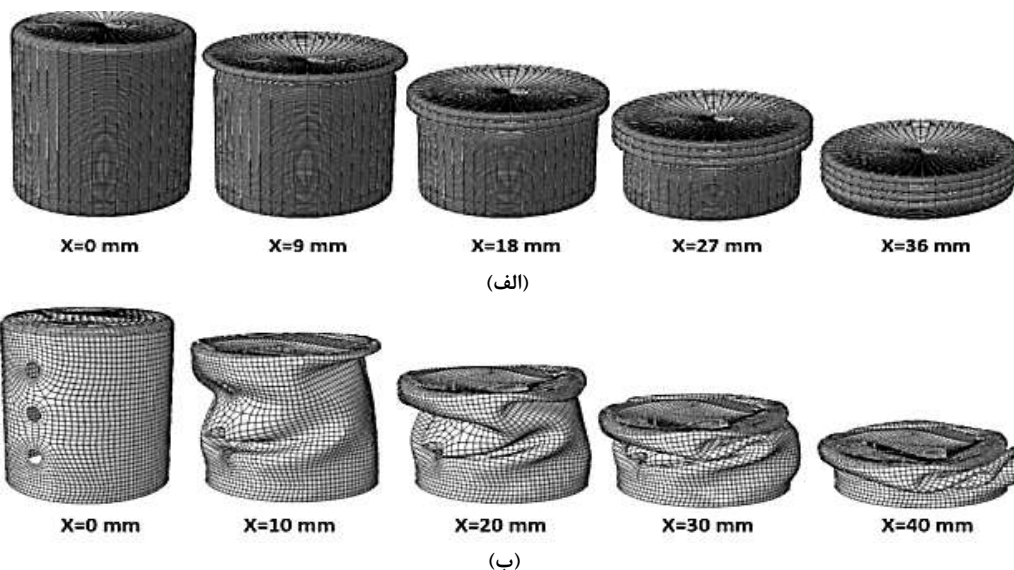


شکل ۸- همگرایی نیروی متوسط فروریزش لوله استوانه‌ای بر حسب اندازه المان

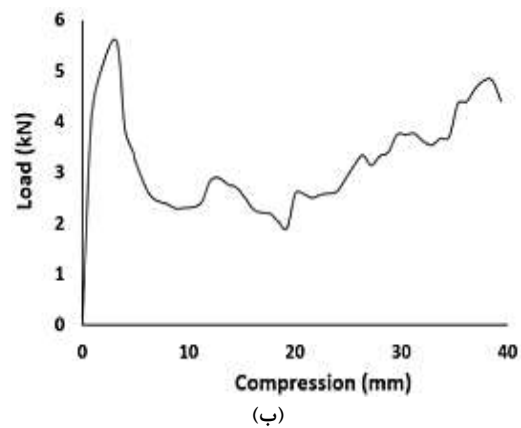
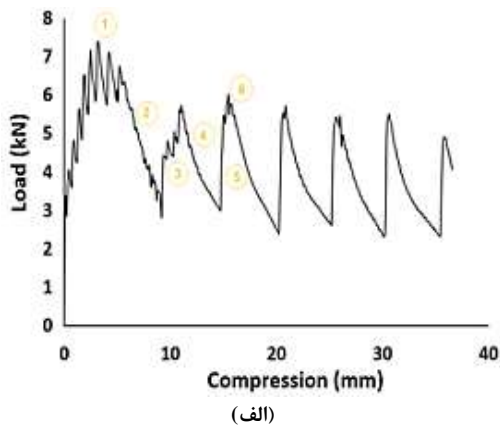
۴-۱- نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های درپوش استوانه‌ای ساده و با حفره به روش المان محدود

مراحل فروریزش محوری لوله ساده و با حفره در شکل (۹) نشان داده شده‌است. در این شبیه‌سازی، فروریزش لوله ساده مطابق شکل (۹)-الف از ناحیه فوقانی به صورت چین خوردگی شروع می‌شود و پشت سرهم ادامه می‌یابد. اما شیوه فروریزش در نمونه حفره‌دار به صورت نامتقارن بوده که علت این امر را می‌توان در عیوب هندسی جستجو کرد. به عبارت دیگر، در نمونه‌های حفره‌دار، فروریزش ابتدا از محل حفره به صورت چین موضعی آغاز شده و سپس با افزایش جابه‌جایی فک دستگاه، نمونه در خود واژگون می‌شود. این فرآیند تا تشکیل تغییر شکل بعدی ادامه می‌یابد.

شرط مرزی تماسی برای جلوگیری از نفوذ نقاط مختلف لوله استوانه‌ای به داخل قطعات، صلب تعریف شده‌است. همچنین امکان لغزش لوله استوانه‌ای بر روی سطوح صلب تعریف شده‌است. در این پژوهش بین سطح بالایی لوله جدار نازک استوانه‌ای شرط تماس ایجاد شده و مقدار ضریب اصطکاک برای این نوع تماس $0/3$ در نظر گرفته شده‌است [۲۸]. در تحلیل عددی فروریزش لوله‌های استوانه‌ای، صفحه صلب پایینی به فک ثابت دستگاه متصل است. پس کلیه درجه‌های آزادی آن مقید می‌شود. از طرف دیگر، صفحه صلب بالایی به فک متحرک متصل است پس کلیه درجه‌های آزادی مرتبط با آن غیر از جابجایی در راستای محوری باید مقید شود. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، بارگذاری به صورت جابجایی معین صفحه صلب بالایی است. با توجه به اینکه سرعت فک متحرک دستگاه یونیورسال ثابت است، سرعت بارگذاری 10 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی، برای لوله استوانه‌ای و صفحات صلب به ترتیب از المان‌های پوسته‌ای چهارگوش (S4R) و المان پوسته‌ای صلب (R3D4) استفاده شده‌است. برای همگرایی مش و مستقل شدن نتایج نسبت به ابعاد مش، لازم است ابعاد المان‌ها به گونه‌ای انتخاب شوند که هم مدت زمان حل بهینه باشد و هم تغییرات ابعاد بر نتایج تأثیر گذار نباشد. برای این منظور، ابعاد مختلف مش بر روی نیروی متوسط فروریزش مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود، کاهش بیشتر اندازه مش از $1/3 \times 1/3$ میلی‌متر مربع تغییر محسوسی در نیروی فروریزش ایجاد نکرده‌است.



شکل ۹- مراحل فروریزش نمونه‌های درپوش‌دار استوانه‌ای تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی (الف) لوله ساده، (ب) لوله حفره‌دار



شکل ۱۰- نمودار نیرو- جابجایی فروریزش محوری نمونه‌های درپوش‌دار استوانه‌ای: (الف) لوله ساده، (ب) لوله حفره‌دار

و شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در هر دو حالت نحوه تغییر شکل شبیه‌سازی مشابه نتایج تجربی است.



شکل ۱۱- مقایسه هندسه فروریزش نمونه درپوش‌دار استوانه‌ای (الف) بدون حفره و (ب) حفره‌دار تحت بارگذاری محوری

شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مقایسه نمودار نیرو-جابجایی و انرژی جذب شده برای نمونه‌های درپوش‌دار استوانه‌ای ساده با حفره‌دار در حالت تجربی و شبیه‌سازی عددی را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روند تغییر نیرو و میزان انرژی جذب شده در نمونه‌های ساده و حفره‌دار با یک خطای قابل قبول به یکدیگر نزدیک می‌باشند.

در شکل (۱۰)، نمودار نیرو-جابجایی فروریزش نمونه‌های ساده و حفره‌دار نشان داده شده است. در شروع اعمال بار بر روی نمونه استوانه‌ای ساده، نیرو به‌طور تقریباً خطی تا یک مقدار ماکزیمم افزایش می‌یابد، این روند تغییر نیرو ناشی از رفتار الاستیک پوسته استوانه‌ای تحت اثر بار فشاری، قبل از آغاز کمانش است (ناحیه اول). با شروع کمانش سطح قاعده بالایی پوسته استوانه‌ای، نیرو افت می‌کند (ناحیه ۲) که با تشکیل چین داخلی افزایش می‌یابد (ناحیه ۳). تشکیل چین خارجی سبب کاهش نیرو می‌شود (ناحیه ۴). با تماس دیواره بیرونی پوسته استوانه‌ای با خودش و تکمیل چین، نیروی لهیدگی پوسته استوانه‌ای افزایش می‌یابد (ناحیه ۵). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بین تشکیل و تکمیل یک چین، یک بیشینه محلی (ناحیه ۶) دیده می‌شود، این بیشینه به این دلیل رخ می‌دهد که همواره بخشی از یک چین به سمت خارج و بخش دیگر به سمت درون پوسته استوانه‌ای قرار می‌گیرد. همچنین در نمونه‌های حفره‌دار در شروع بارگذاری، نیرو به‌طور تقریباً خطی تا یک مقدار ماکزیمم افزایش می‌یابد. بدیهی است که با وجود حفره نیروی لهیدگی اولیه کاهش می‌یابد.

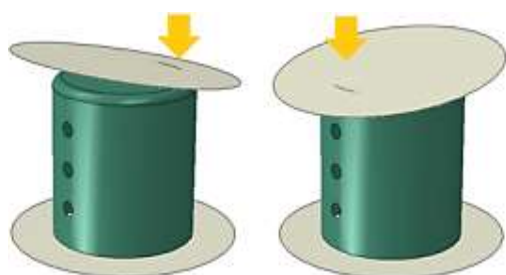
۵- مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی نمونه‌های درپوش‌دار استوانه‌ای تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی

در این بخش به مقایسه نتایج تجربی نمونه‌های درپوش‌دار استوانه‌ای ساده و حفره‌دار تحت اثر بارگذاری شبه استاتیکی پرداخته شده است. بیشینه نیروی فروریزش، میزان انرژی جذب شده از مهم‌ترین معیارها می‌باشد. شکل (۱۱) فروریزش این نمونه‌ها را در حالت آزمایشگاهی

حفره دار به خاطر وجود عیوب و نقص اولیه شامل تغییرات کوچک در ناحیه حفره در زمان ایجاد آن، غیرخطی بودن ضخامت و برآمدگی سطح می‌باشند. در این شبیه‌سازی نقص‌های اولیه به صورت حدودی و با استفاده از مقادیر ویژه مودهای کمانش به نرم‌افزار المان محدود اعمال شده است.

۶- بررسی تأثیر زاویه اعمال بارگذاری مورب بر روی لوله‌های حفره‌دار

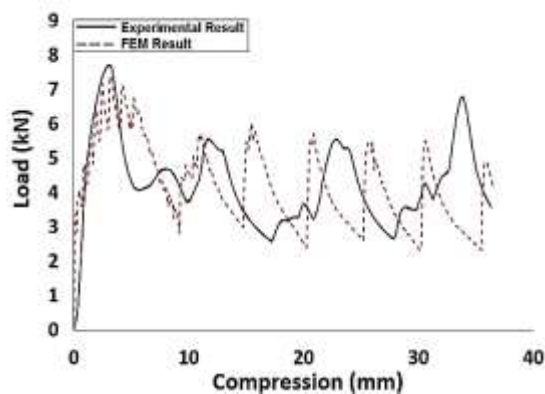
سازه‌های جدار نازک به طور گسترده‌ای برای جذب انرژی ناشی از برخورد مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقالات منتشر شده در این زمینه بیشتر مربوط به بارگذاری محوری است. اما در عمل سازه‌های جذب انرژی در خودروها تحت بارگذاری فشاری غیرمحوری و برخورد مورب می‌باشند. بنابراین بحث و بررسی چگونگی پاسخ جذب انرژی تحت بارگذاری مورب بسیار مهم و ضروری است. مطابق بخش قبل، مشخص گردید که مدل اجزای محدود ارائه‌شده می‌تواند پدیده فروریزش لوله‌های جدارنازک استوانه‌ای درپوش‌دار تحت اثر بارگذاری محوری را با دقت قابل قبولی مدلسازی کند. اکنون می‌توان با استفاده از مدل ارائه‌شده، اثر زاویه بارگذاری مورب بر فروریزش لوله‌های جدارنازک درپوش‌دار استوانه‌ای را بررسی نمود. مطابق شکل (۱۴)، لوله‌های استوانه‌ای درپوش‌دار با حفره تحت زوایای بارگذاری مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه قرار می‌گیرند. نحوه بارگذاری مورب شامل اعمال بار در راستای حفره و در جهت مخالف آن است.



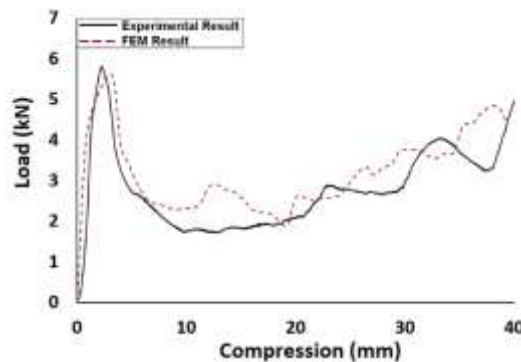
شکل ۱۴- مدل‌سازی لوله‌های استوانه‌ای درپوش‌دار تحت بارگذاری مورب در راستای حفره و در خلاف حفره

۶-۱- بارگذاری مورب در راستای حفره

در شکل (۱۵)، تأثیر زاویه اعمال بارگذاری مورب در راستای حفره بر روی فروریزش لوله‌های درپوش‌دار استوانه‌ای نشان داده شده است. بدیهی است افزایش زاویه بارگذاری سبب افزایش طول چین‌های تشکیل شده نسبت به بارگذاری

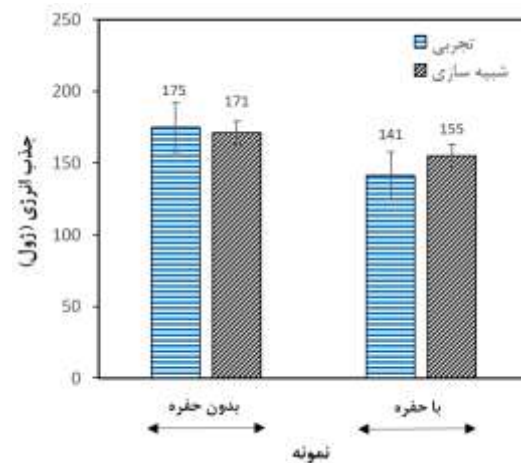


(الف)



(ب)

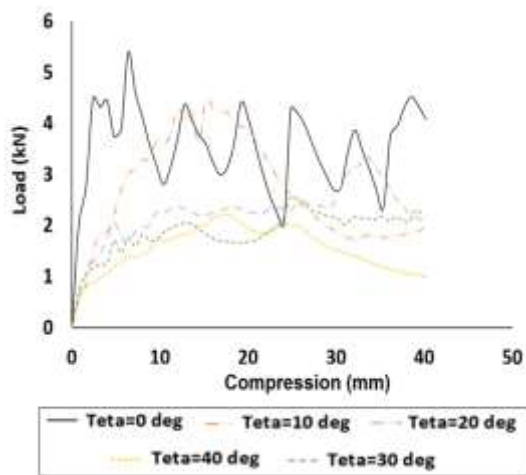
شکل ۱۲- مقایسه نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته استوانه‌ای درپوش‌دار تحت بارگذاری محوری به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی الف- بدون حفره، ب- حفره‌دار



شکل ۱۳- مقایسه انرژی جذب شده بین نمونه‌های درپوش‌دار ساده و حفره‌دار تحت بارگذاری محوری به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی

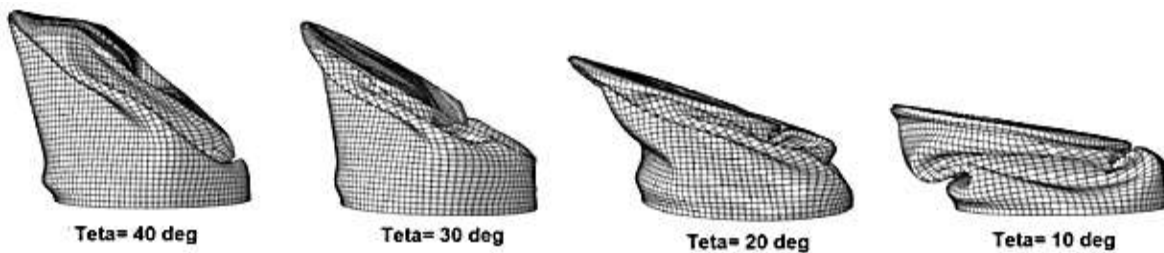
همانطور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، خطای ناشی از انرژی جذب شده در شبیه‌سازی عددی نسبت به آزمایشگاهی برای نمونه‌های ساده و حفره دار به ترتیب در حدود ۲ درصد و ۱۰ درصد است. به طور کلی، علت اصلی اختلاف بین شبیه‌سازی عددی و تست تجربی در نمونه

ضربه‌گیرهای فروریزی باعث کاهش شوک اولیه فروریزش و افزایش زمان انتقال این شوک به جسم متحرک می‌شود.



شکل ۱۶- تأثیر زاویه اعمال بارگذاری مورب در راستای حفره بر روی نمودار نیرو-جابجایی

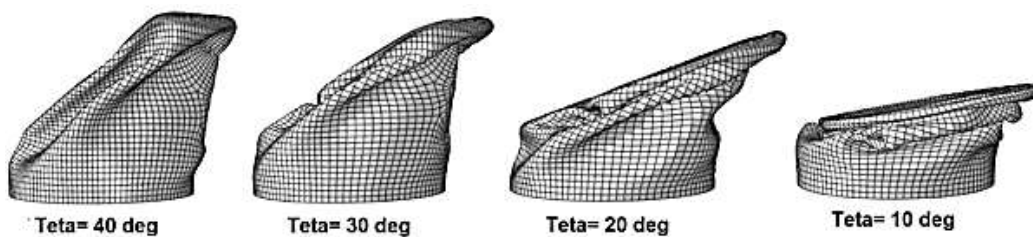
محوری می‌شود. مطابق شکل (۱۶) در بارگذاری مورب نیروی فروریزش به شدت نسبت به بارگذاری محوری کاهش می‌یابد. در ادامه، با افزایش جابه‌جایی و تماس چین‌های غیرمتقارن با سطح صلب فوقانی نیرو دوباره افزایش می‌یابد. براساس نمودار نیرو-جابجایی تغییرات نیرو با تشکیل اولین چین داخلی به صورت افزایشی و با تشکیل چین خارجی به صورت کاهش است. آنچه به وضوح مشخص است، زاویه بارگذاری مورب از ۲۰ به ۴۰ درجه، اثر محسوسی بر نیروی اولیه فروریزش ندارد. این در حالی است که اثر این پارامتر بر شیب نمودار نیرو-جابجایی قابل توجه است، همان‌طور که دیده می‌شود افزایش زاویه بارگذاری سبب کاهش شیب نمودارها شده‌است. این امر به دلیل افزایش سطح تماس صفحه صلب با بدنه لوله استوانه‌ای می‌باشد. به طور کلی کاهش شیب خط در بخش ابتدایی نمودار نیرو-جابجایی



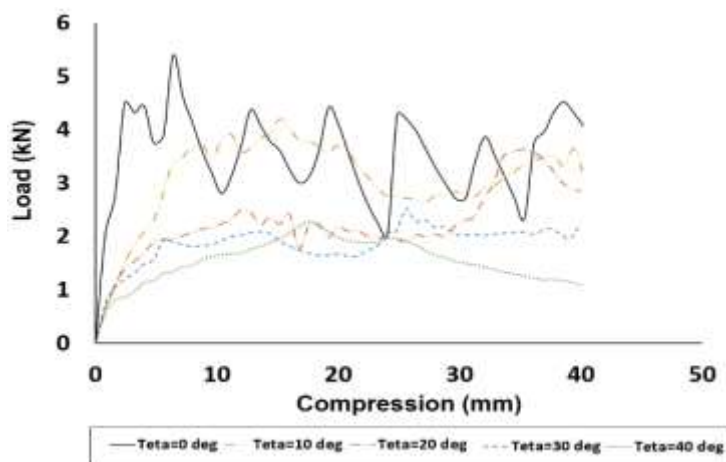
شکل ۱۵- تأثیر زاویه بارگذاری بر حالت فروریزش لوله‌های درپوش‌دار استوانه‌ای در راستای حفره

جدول ۳- نتایج اثر زاویه بارگذاری در راستای حفره بر روی پارامترهای ضربه پذیر

درصد کاهش بیشینه نیروی فروریزش نسبت به زاویه صفر درجه	P_m (kN)	E (J)	$P_{initial}$ (kN)	θ (°)
-	۳/۵	۱۴۱	۵/۴	۰
۳۲	۳/۱	۱۲۵	۴/۱	۱۰
۱۴۵	۲/۶	۹۰	۲/۲	۲۰
۱۸۴	۱/۹	۷۵	۱/۹	۳۰
۱۷۰	۱/۶	۶۲	۲/۰	۴۰



شکل ۱۷- تأثیر زاویه بارگذاری بر حالت فروریزش لوله‌های درپوش‌دار استوانه‌ای در خلاف جهت حفره



شکل ۱۸- تأثیر زاویه اعمال بار در خلاف جهت حفره بر روی نمودار نیرو-جابجایی

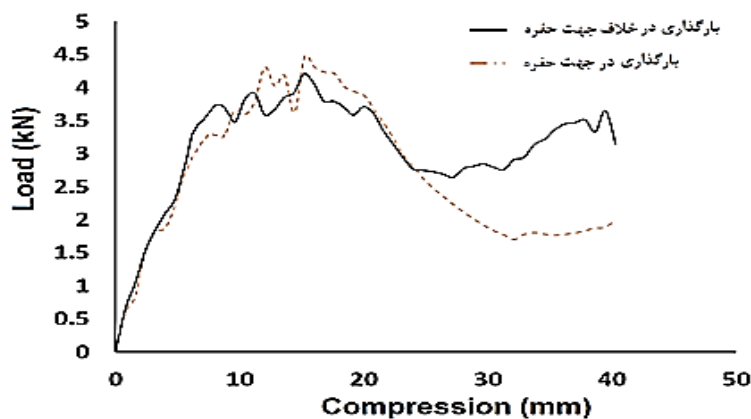
۳-۶- مقایسه رفتار فروریزش بین نمونه های تحت بارگذاری مورب ۱۰ درجه در راستای حفره و خلاف جهت حفره

در شکل (۱۹) مقایسه‌ای از نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های درپوش‌دار استوانه‌ای تحت زاویه بار ۱۰ درجه در راستا و خلاف جهت حفره نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انرژی جذب شده برای نمونه بارگذاری شده در جهت حفره برابر با ۱۲۵ ژول بوده و برای نمونه بارگذاری شده در خلاف حفره برابر با ۱۴۲ ژول می‌باشد. بنابراین انرژی جذب شده در خلاف جهت حفره در حدود ۱۳/۶ درصد نسبت به انرژی جذب شده در جهت حفره بیشتر است. برای بارگذاری مورب در راستای حفره، محل تشکیل اولین چین در موقعیت حفره‌ها است، بنابراین این امر سبب کاهش نیرو و همچنین به دنبال آن کاهش جذب انرژی می‌شود. در شکل (۲۰) چگونگی فروریزش نمونه‌های استوانه‌ای درپوش‌دار تحت بارگذاری مورب ۱۰ درجه در راستای حفره و خلاف آن نشان داده شده است.

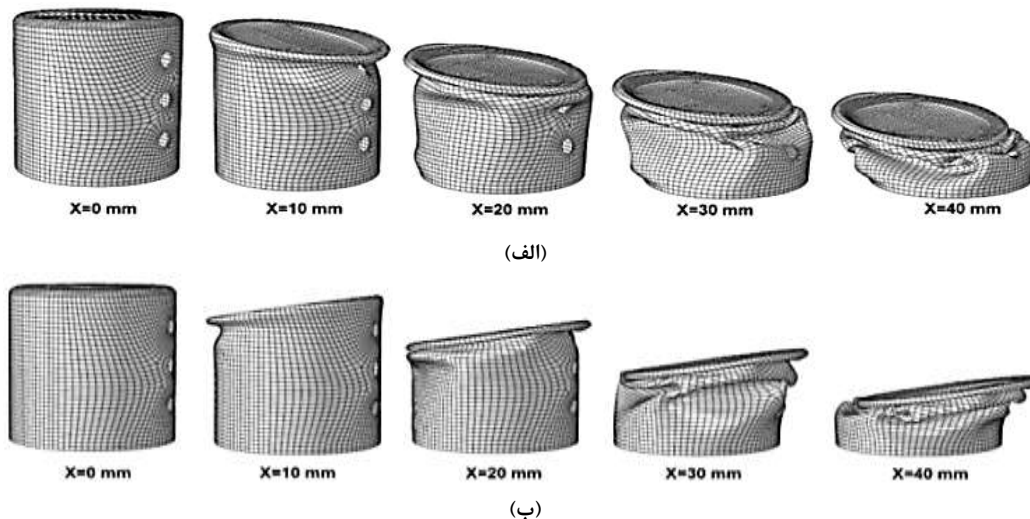
در جدول ۳ نتایج تأثیر زاویه اعمال بارگذاری در راستای حفره بر پارامترهای ضربه پذیر نمونه‌های استوانه‌ای تحت شرایط مرزی یکسرگیردار نشان داده شده است. نکته قابل توجه در نتایج، کاهش نیروی متوسط و انرژی جذب شده لوله‌های استوانه‌ای نسبت به افزایش زاویه بارگذاری است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انرژی جذب شده لوله‌های استوانه‌ای با زاویه ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ به ترتیب در حدود ۱۳، ۵۷، ۸۸ و ۱۲۷ درصد نسبت به فروریزش محوری کاهش می‌یابد.

۲-۶- بارگذاری مورب در خلاف جهت حفره

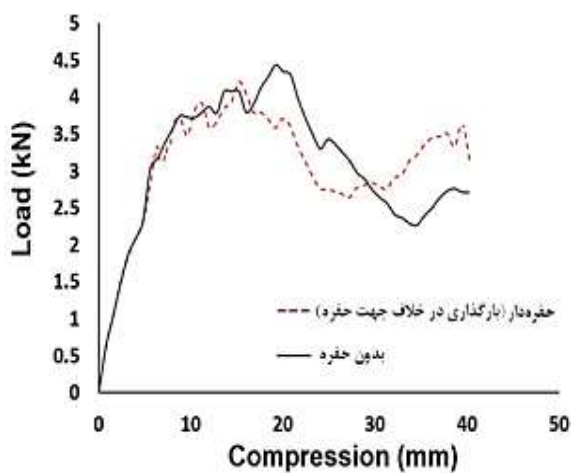
در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) اثر زاویه بارگذاری بر نحوه فروریزش و منحنی نیرو-جابجایی لوله استوانه‌ای درپوش‌دار در خلاف جهت حفره نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فقط بارگذاری مورب با زاویه ۱۰ درجه بر نحوه فروریزش و میزان جذب انرژی مؤثر بوده و زاویه بارگذاری ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه تغییرات زیادی در نیروی پیک اولیه و سطح زیر منحنی ندارد.



شکل ۱۹- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بین نمونه‌ها تحت زاویه بارگذاری مورب ۱۰ درجه در راستای حفره و خلاف جهت حفره



شکل ۲۰- مقایسه مراحل فروریزش بین لوله‌های تحت بارگذاری مورب ۱۰ درجه: (الف) در راستای حفره، (ب) خلاف جهت حفره



شکل ۲۱- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بین نمونه‌های ساده و با حفره تحت بار مورب ۱۰ درجه

۴-۶- مقایسه رفتار فروریزش بین نمونه‌های ساده و با حفره تحت بار مورب ۱۰ درجه

به منظور انتخاب یک جاذب انرژی ایده آل، مطابق شکل (۲۱) مقایسه‌ای از نمودار نیرو-جابجایی بین لوله‌های ساده و حفره‌دار انجام شده است. همچنین، برای مقایسه بهتر، در جدول (۴) نتایج شبیه‌سازی مربوط به پارامترهای ضربه‌پذیر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در صورتی که اعمال نیرو در خلاف راستای حفره باشد، تفاوت محسوسی در نمودار نیرو-جابجایی با نمونه ساده (بدون حفره) مشاهده نمی‌شود. این در حالی است که اگر بار مورب ۱۰ درجه در راستای حفره‌ها اعمال شود، انرژی جذب شده لوله استوانه‌ای ساده حدود ۲۲ درصد افزایش می‌یابد.

جدول ۴- مقایسه فروریزش لوله استوانه ساده و حفره‌دار تحت بارگذاری محوری و بارگذاری مورب (خلاف جهت حفره) با زاویه ۱۰ درجه

نمونه	$\theta(^{\circ})$	$P_{initial}$ (kN)	E (J)	P_m (kN)
SCCT	۰	۷/۶	۱۷۵	۴/۳
CCHT	۰	۵/۴	۱۴۱	۳/۵
SCCT-10	۱۰	۳/۷	۱۵۳	۳/۸
CCHT-10	۱۰	۳/۲	۱۴۲	۳/۵

۷- نتیجه گیری

آلومینیوم تحت بارگذاری شبه-استاتیک محوری و مورب با زوایای مختلف انجام گرفت و نحوه فروریزش، میزان جذب انرژی، نیروی پیک اولیه فروریزش محاسبه گردید. در این مطالعه نحوه فروریزش نمونه‌ها با تغییر اعمال بارگذاری مورب در راستای حفره و در خلاف آن مورد بررسی قرار گرفت که نتایج مهم حاصل از این تحقیق به صورت زیر می‌باشند:

در این مقاله، توسط نرم‌افزار آباکوس ضربه‌پذیری لوله‌های درپوش‌دار استوانه‌ای ساده و حفره‌دار به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی مطالعه گردید. وجود حفره در طول نمونه درپوش‌دار استوانه‌ای عاملی برای کاهش نیروی پیک اولیه لهیدگی در نظر گرفته شده است. به منظور دستیابی به این هدف، بررسی جامع روی لوله‌های استوانه‌ای آلیاژ

حفره‌ها اعمال شود، تغییرات محسوسی در نمودار نیرو-جابجایی و انرژی جذب شده نسبت به نمونه‌های بدون حفره با همان شرایط بارگذاری مشاهده نگردید. این درحالی است که اگر زاویه بارگذاری ۱۰ درجه در راستای حفره‌ها اعمال شود، انرژی جذب شده لوله استوانه‌ای ساده نسبت به حفره‌دار ۲۲ درصد افزایش می‌یابد.

• انرژی جذب شده و نیروی پیک اولیه فروریزش در نمونه ساده تحت بارگذاری ۱۰ درجه نسبت به نمونه ساده تحت بارگذاری محوری به ترتیب به اندازه ۱۴ و ۱۰۵ درصد کمتر گردید.

• انرژی جذب شده و نیروی پیک اولیه فروریزش به ترتیب به اندازه ۲۴ و ۴۰ درصد در لوله درپوش‌دار ساده تحت بارگذاری محوری نسبت به نمونه حفره‌دار افزایش یافت.

• بارگذاری مورب با زاویه ۱۰ درجه بر نحوه فروریزش و میزان جذب انرژی مؤثر بوده و زاویه بارگذاری ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه تغییرات زیادی در نیروی پیک اولیه و جذب انرژی ندارد.

• انرژی جذب شده تحت بارگذاری مورب ۱۰ درجه در خلاف جهت سوراخ‌ها به اندازه ۱۳/۶ درصد نسبت به بارگذاری اعمال شده در امتداد سوراخ‌ها افزایش یافت.

• زمانی که بارگذاری مورب ۱۰ درجه در خلاف جهت

مراجع

[1] Global Status Report on Road, 2015.

[2] M. D. Goel, "Numerical investigation of the axial impact loading behaviour of single, double and stiffened circular tubes", International journal of crashworthiness, Vol. 21, No. 1, 2016, pp. 41-50.

[3] M. J. Rezvani, E. Borhani, and E. A. Shahi, "Manufacturing and analysis of dynamic and mechanical properties of rigid nanocomposite polyurethane foam reinforced by nano particles of SiC", Journal of Modeling in Engineering, Vol. 16, No. 53, 2018, pp. 1-7.

[4] N. Jones, "Several phenomena in structural impact and structural crashworthiness", European Journal of Mechanics-A/Solids, Vol. 22, No. 5, 2003, pp. 693-707.

[5] H. El-Hage, P. Mallick, and N. Zamani, "A numerical study on the quasi-static axial crush characteristics of square aluminum tubes with chamfering and other triggering mechanisms", International Journal of Crashworthiness, Vol. 10, No. 2, 2005, pp. 183-196.

[6] L. Yan, N. Chouw, and K. Jayaraman, "Effect of triggering and polyurethane foam-filler on axial crushing of natural flax/epoxy composite tubes", Materials and Design (1980-2015), Vol. 56, 2014, pp. 528-541.

[7] Z. Song, S. Ming, T. Li, K. Du, C. Zhou, and B. Wang, "Improving the energy absorption capacity of square CFRP tubes with cutout by introducing chamfer", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 189, 2021, p. 105994.

[8] N. Negahban Vasheghani, M. J. Rezvani, and M. Damghani Nouri, "Experimental and numerical investigation of energy absorption of foam-filled cylindrical tubes with initiator", Journal of Modeling in Engineering, Vol. 14, No. 44, 2016, pp. 69-78.

[9] S. Shahravi, M. J. Rezvani, and A. Jahan, "Multi-response optimization of grooved circular tubes filled with polyurethane foam as energy absorber", Journal of Optimization in Industrial Engineering, Vol. 12, No. 1, 2019, pp. 133-149.

[10] M. Rezvani and M. D. Nouri, "Mathematical modelling of energy absorption in thin-walled grooved conical tubes with considering of strain hardening phenomena", International Journal of Structural Engineering, Vol. 8, No. 4, 2017, pp. 308-326.

[11] A. Eyvazian, T. Tran, and A. M. Hamouda, "Experimental and theoretical studies on axially crushed corrugated metal tubes", International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol. 101, 2018, pp. 86-94.

[12] S. E. Alkhatib, F. Tarlochan, and A. Eyvazian, "Collapse behavior of thin-walled corrugated tapered tubes", Engineering Structures, Vol. 150, 2017, pp. 674-692.

[13] Y. Lin, J. Min, Y. Li, and J. Lin, "A thin-walled structure with tailored properties for axial crushing", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 157, 2019, pp. 119-135.

- [14] G. Sun, T. Pang, C. Xu, G. Zheng, and J. Song, "Energy absorption mechanics for variable thickness thin-walled structures", *Thin-Walled Structures*, Vol. 118, 2017, pp. 214-228.
- [15] N. Jafarian and M. J. Rezvani, "Crushing behavior of multi-component conical tubes as energy absorber: A comparative analysis between end-capped and non-capped conical tubes", *Engineering Structures*, Vol. 178, 2019, pp. 128-135.
- [16] H. Souzangarzadeh, M. J. Rezvani, and A. Jahan, "Selection of optimum design for conical segmented aluminum tubes as energy absorbers: Application of MULTIMOORA method", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 51, 2017, pp. 546-560.
- [17] C. Zhao, J. Niu, Q. Zhang, C. Zhao, and J. Xie, "Buckling behavior of a thin-walled cylinder shell with the cutout imperfections", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 26, No. 18, 2019, pp. 1536-1542.
- [18] W. Liu, Z. Liu, G. Lu, and Z. Wang, "Investigation of the energy absorption of thin-walled square tubes with cutouts under axial impact loading", *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2016.
- [19] M. W. Hilburger, V. O. Britt, and M. P. Nemeth, "Buckling behavior of compression-loaded quasi-isotropic curved panels with a circular cutout", *International journal of solids and structures*, Vol. 38, No. 9, 2001, pp. 1495-1522.
- [20] A. Alavi Nia and S. Chahardoli, "Experimental and numerical investigation of hole and edge radius effect on collapse properties of cylindrical absorbers under axial impact loading", *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 16, No. 53, 2018, pp. 53-65.
- [21] S. Chahardoli, H. Hadian, and R. Vahedi, "Optimization of hole height and wall thickness in perforated capped-end conical absorbers under axial quasi-static loading (using NSGA-III and MOEA/D algorithms)", *Thin-Walled Structures*, Vol. 127, 2018, pp. 540-555.
- [22] H. Nikkhah, A. Baroutaji, and A. G. Olabi, "Crashworthiness design and optimisation of windowed tubes under axial impact loading", *Thin-Walled Structures*, Vol. 142, 2019, pp. 132-148.
- [23] S. Bodlani, S. Chung Kim Yuen, and G. Nurick, "The energy absorption characteristics of square mild steel tubes with multiple induced circular hole discontinuities—Part II: numerical simulations", *Journal of applied mechanics*, 2009, Vol. 76, No. 4.
- [24] S. Bodlani, S. Yuen, and G. Nurick, "The energy absorption characteristics of square mild steel tubes with multiple induced circular hole discontinuities—part I: experiments", *Journal of applied mechanics*, Vol. 76, No. 4, 2009.
- [25] H. Han, J. Cheng, F. Taheri, and N. Pegg, "Numerical and experimental investigations of the response of aluminum cylinders with a cutout subject to axial compression", *Thin-Walled Structures*, Vol. 44, No. 2, 2006, pp. 254-270.
- [26] J. T. Black and R. A. Kohser, "Materials and processes in manufacturing", Prentice-Hall International, 1997.
- [27] A. Ghamarian, H. Zarei, M. Farsi, and N. Ariaeifar, "Experimental and numerical crashworthiness investigation of the empty and foam-filled conical tube with shallow spherical caps", *Strain*, Vol. 49, No. 3, 2013, pp. 199-211.
- [28] S. Azarakhsh, A. Rahi, A. Ghamarian, and H. Motamedi, "Axial crushing analysis of empty and foam-filled brass bitubular cylinder tubes", *Thin-Walled Structures*, Vol. 95, 2015, pp. 60-72.