



## تحلیل لهیدگی محوری لوله‌های جدارنازک ساندویچی به کمک آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود

سجاد آذرخش<sup>۱</sup>، عباس رهی<sup>۲\*</sup>

\* نویسنده مسئول: A\_Rahi@Sbu.ac.ir

### واژه‌های کلیدی

جاذب انرژی، تحلیل اجزای محدود، فروریزش محوری، سازه‌های جدارنازک، فوم پلی‌یورتان

### چکیده

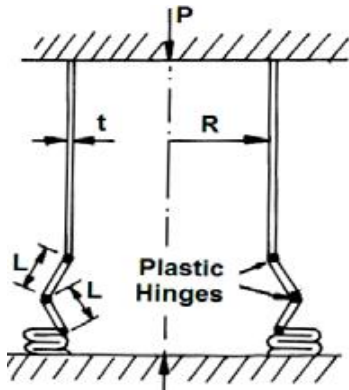
کاربرد سیستم‌های جذب انرژی ضربه در صنایع مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لوله‌های جدارنازک به‌خاطر سبکی، ظرفیت جذب انرژی بالا، طول لهیدگی زیاد و نسبت جذب انرژی به وزن بالا به‌عنوان یکی از کارآمدترین سیستم‌های جذب انرژی کاربرد روزافزونی پیدا کرده‌اند. در این پژوهش با انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود، شیوه فروریزش سازه‌های جدارنازک ساندویچی توخالی و پرشده با فوم پلی‌یورتان تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در مطالعه‌ی آزمایشگاهی نمونه‌های استوانه‌ای به روش اکستروژن ساخته شده و بین دو صفحه‌ی صلب تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی قرار گرفته و سپس نحوه‌ی فروریزش نمونه، تغییرات نیرو و مقدار انرژی لازم تعیین شده‌اند. مدلی برای شبیه‌سازی فرآیند فروریزش با استفاده از تحلیل اجزای محدود ارائه و اثر رفتار غیرخطی مواد، تماس و تغییر شکل بزرگ در این شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی نمونه‌های آزمایش شده در نرم افزار آباکوس به صورت سه‌بعدی و به روش صریح اجرا شده است. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل ارائه شده برای تعیین پاسخ فروریزش و تعیین نمودار نیرو-جابجایی و میزان انرژی جذب شده مناسب است. با استفاده از مدل عددی، اثر ضخامت لوله، جنس مواد، عیوب هندسی و چگالی فوم بر متوسط نیروی فروریزش، میزان انرژی جذب شده و نحوه‌ی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای بررسی شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهند که وجود فوم باعث افزایش میزان جذب انرژی در سازه‌ها می‌شود؛ این افزایش در میزان جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی در چگالی‌های بالاتر فوم، نمایان‌تر است.

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

۱- مقدمه

طرح با آن‌که با فرضیات زیادی همراه بود، ولی بسیاری از نکات دیده شده در آزمایش‌ها را پوشش نداده است.



شکل (۱) نحوه چین خوردگی در طرح الکساندر [۱]

یامازاکی و هان [۲] توانستند به کمک روش المان محدود شیوهی صحیح فروریزش چین‌دار، الماسی و اولر را شبیه‌سازی کنند. نتایج این شبیه‌سازی با آزمایش ضربه افقی لوله مقایسه شد و تطابق خوبی مشاهده گردید. این پژوهشگران با استفاده از روش تقریب سطح پاسخ و نتایج تجربی و شبیه‌سازی، ابعاد لوله‌ی آلومینیومی را به گونه‌ای تعیین کردند که لوله به شیوه چین‌دار فرو ریخت.

اکتای و همکارانش [۳] به بررسی تجربی و عددی فروریزش محوری شبه‌استاتیکی لوله‌های آلومینیومی جدارنازک استوانه‌ای تقویت‌شده با فوم پلی‌استیرن پرداختند. در این تحقیق، تحلیل عددی فروریزش لوله‌های توخالی و تقویت‌شده با فوم به روش دینامیکی صریح انجام شد. نتایج نشان داد که انرژی جذب شده لوله‌های تقویت‌شده با فوم بیشتر از مجموع انرژی‌های لوله‌ی توخالی و فوم پر شده در آن است.

کاوی و همکارانش [۴] مطالعاتی را در زمینه پیش‌بینی میزان جذب انرژی در لوله جدارنازک آلومینیومی پر شده با فوم انجام دادند. نتایج مطالعات ایشان در زمینه بررسی تاثیر استفاده از فوم‌های مذکور نشان داد که مود کماتش الماسی مربوط به لوله جدارنازک توخالی به مود کماتش آکاردئونی

ضربه‌گیرها و جاذب‌های انرژی از جمله اجزایی هستند که در برخی سامانه‌ها برای جذب انرژی جنبشی و تبدیل آن به صورت دیگری از انرژی استفاده می‌شوند به عبارت دیگر ضربه‌گیرها برای کاهش شتاب توقف تجهیزات متحرک استفاده می‌شوند و انرژی جنبشی را به انواع دیگر انرژی تبدیل می‌کنند. انرژی جنبشی صرف غلبه بر اصطکاک، تغییرشکل پلاستیک و یا شکست در قطعات می‌شود. ضربه‌گیرها را می‌توان به دو دسته بازگشت‌پذیر (مانند جریان سیال در میراکننده‌های هیدرولیک) و بازگشت‌ناپذیر (مانند تغییرشکل پلاستیک در مواد) تقسیم کرد. اغلب ضربه‌گیرهای دسته اول برای برخورد با انرژی کم و فقط با احتمال آسیب سازه استفاده می‌شوند، در صورتی که ضربه‌گیرهای دسته دوم برای برخورد با انرژی بالا و با احتمال آسیب اجزای مهم و خطر جانی طراحی شده‌اند. سازه‌های جدارنازک یکی از انواع رایج ضربه‌گیرها هستند که به طور معمول در هندسه‌های ساده استوانه‌ای و مخروطی ساخته شده‌اند. این سازه‌ها تحت اثر نیروی محوری کماتش کرده و انرژی جنبشی تجهیزات صرف فروریزش آن‌ها خواهد شد. وزن و حجم کم، در دسترس بودن و صرفه‌ی اقتصادی مزیت‌های اصلی است که سبب شده رفتار این سازه‌ها تحت انواع مختلف بارگذاری در سال‌های متمادی مورد بررسی قرار گیرد.

الکساندر [۱] اولین کسی بود که یک طرح تئوری برای لهیدگی محوری لوله‌های جدارنازک در حالت متقارن محوری ارائه نمود. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، می‌توان فرض نمود که زمان شکل گرفتن یک چین، سه لولای پلاستیک محیطی به وجود آمده و کار انجام شده توسط نیروی خارجی، توسط خمش پلاستیک سه لولا و کشش محیطی ماده بین آن‌ها، تلف خواهد شد. این

مورد بحث قرار داد زیرا آن‌ها متداول‌تر از فولاد نرم و آلیاژ آلومینیوم برای جذب انرژی سازه‌ها و دیگر قطعات پیشنهاد شده بودند. او تاثیر بارگذاری محوری ضربه‌ای برای لوله-های جدارنازک با چندین شکل مقطع و ساخته شده از مواد مختلف را توسط نرم‌افزار اجزاء محدود Ls-Dyna بررسی و جذب انرژی آن‌ها را با نتایج تجربی مقایسه کرد.

سان و هو [۹] به بررسی لوله‌های جدارنازک مخروطی در سه حالت توخالی، پر شده از فوم و دو لوله داخل هم پرداختند. آن‌ها از روش‌های مختلف بهینه‌سازی استفاده کرده و این سه حالت را در زمینه جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی برخورد با یکدیگر مقایسه نمودند. در جذب انرژی مخصوص لوله پر شده از فوم بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد اما بیشینه نیروی آن خیلی بالاتر از دو مورد دیگر است. در مقایسه مقطع توخالی و دو مقطع داخل هم، حالت دو مقطع داخل هم در هر دو ویژگی جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی برخورد عملکرد بهتری نسبت به مقطع توخالی دارد.

قمریان و ابدی [۱۰] فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای سربسته تقویت شده با فوم را تحت بارگذاری محوری و به صورت آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که پوسته‌های استوانه‌ای درپوش‌دار با کاهش نیروی اولیه، جذب انرژی بهتری نسبت به پوسته‌های استوانه‌ای بدون درپوش هستند.

قمریان و همکاران [۱۱] ضربه‌گیرهای مخروطی سربسته توخالی و تقویت شده با فوم پلی یورتان تحت اثر بارگذاری محوری را به صورت آزمایشگاهی و تحلیل عددی مطالعه نمودند. در این تحقیق، نتایج شبیه‌سازی با آزمایشگاهی مقایسه و اثر دانسیته فوم بر فروریزش پوسته‌های مخروطی سربسته بررسی شد.

صرف نظر از نوع و همچنین دانسیته فوم استفاده شده در لوله جدارنازک پر شده با فوم تغییر می‌کند.

گوپتا و ونکاش [۵] فروریزش پوسته‌ی مخروطی جدارنازک تحت اثر برخورد محوری را به صورت آزمایشگاهی و تحلیل عددی مطالعه کردند. نحوه تغییر شکل پوسته، نمودار نیرو- جابه جایی، نمودار انرژی - جابه جایی و متوسط بار فروریزش از آزمایش نمونه‌های مخروطی به دست آمد. رفتار ویسکوپلاستیک صلب برای ماده در شبیه‌سازی اجزاء محدود انتخاب شد که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت.

اولابی و همکاران [۶] چیدمانی از لوله‌های تودرتوی دایره‌ای از جنس فولاد نرم را که در اثر بارگذاری دینامیکی دچار له‌شدگی جانبی شده‌اند مورد بررسی قرار دادند. آزمایشی همراه با محدوده سرعت‌های ضربه‌ای بین ۳ تا ۵ متر بر ثانیه با استفاده از برخورد جرم ثابت سقوط کننده بر روی نمونه انجام گرفت و رفتار لهیدگی و قابلیت جذب انرژی آن‌ها به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار ال اس داینا تحلیل شد.

زهانگ و هو [۷] به بررسی جذب انرژی مقطع‌های مربعی با شیارهای طولی پرداختند. آن‌ها حالت‌های مختلف شیار در دو وجه و چهار وجه را به وسیله نرم افزار ال اس داینا مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تاثیر پارامترهایی نظیر تعداد شیار، پهنای لوله و طول شیار را مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج نشان داد که با استفاده از شیارهای طولی می‌توان جذب انرژی را ۸۲ درصد افزایش داد و بیشینه نیروی اولیه را ۲۲ درصد نسبت به پروفیل بدون شیار کاهش داد.

جونز [۸] بر روی جذب انرژی سازه‌ها و قطعات تحت بارگذاری شدید که می‌توانند از ضربه‌ی انفجار و سایر رویدادهای دینامیکی مختلف بوجود بیایند، تمرکز کرد. او خواص دینامیکی فولادهای با استحکام بالا را به طور خلاصه

لوله‌ی داخلی  $20 \pm 0.5$  میلی‌متر و با ضخامت ۱ میلی‌متر و قطر لوله‌ی خارجی  $50 \pm 0.5$  میلی‌متر و با ضخامت ۱ میلی‌متر انتخاب شده است. ارتفاع نمونه‌ها نیز توسط فرآیند ماشین‌کاری برابر  $55 \pm 0.1$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، برای نام‌گذاری نمونه‌ها از ترکیب  $Cj$  و  $CFj$  استفاده می‌شود. حرف  $C$  بیانگر لوله‌های استوانه‌ای توخالی و  $CF$  بیانگر لوله‌های تقویت شده با فوم و متغیر  $j$  مرتبه تکرار آزمایش است. مهم‌ترین پارامترها برای اندازه‌گیری پوسته‌های موازی شامل قطر خارجی، طول، ضخامت و جرم پوسته است که در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱) مشخصات هندسی پوسته‌های موازی (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

نام نمونه	$C_1$	$C_2$	$CF_1$	$CF_2$
قطر لوله داخلی	۱۹/۷۰	۱۹/۶۶	۱۹/۵۸	۱۹/۶۴
قطر لوله خارجی	۴۹/۵۸	۴۹/۶۱	۴۹/۴۲	۴۹/۳۴
ضخامت لوله داخلی	۰/۹۳	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۷
ضخامت لوله خارجی	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۱	۰/۹۴
طول لوله داخلی	۵۵/۱۳	۵۵/۱۸	۵۵/۲۲	۵۵/۰۷
طول لوله خارجی	۵۵/۰۸	۵۵/۱۴	۵۵/۱۵	۵۵/۱۲
جرم کل (گرم)	۹۷/۸	۹۷/۷۵	۱۲۱	۱۲۰

از آن‌جا که شرایط مرزی انتخاب شده در این مطالعه، دوسرگیردار است، از دو فیکسچری استفاده می‌شود که دارای یک شیار هم‌قطر با لوله‌ی خارجی و به ارتفاع ۳ میلی‌متر و برآمدگی هم‌قطر با لوله‌ی داخلی و به ارتفاع ۳ میلی‌متر است. شکل (۲) نمایی از فیکسچر و لوله‌های دوجداره توخالی و پر شده از فوم را نشان می‌دهد.

تعیین خواص مکانیکی لوله‌ی برنجی و فوم پلی‌یورتان مرحله‌ی دیگری از انجام آزمایش تجربی محسوب می‌شود که در این مطالعه برای انجام شبیه‌سازی، مشخص کردن رفتار برنج و فوم ضروری است. نمودار تنش - کرنش پلاستیک حقیقی ماده‌ی برنجی لوله‌های دوجداره مطابق شکل (۳) با استفاده از آزمایش کشش (استاندارد ASTM E8) تعیین شد. مدول الاستیسیته و ضرایب پواسون با نصب

تارلوچان و رامش [۱۲] بررسی تجربی جامعی روی پاسخ سازه‌های ساندویچی مرکب<sup>۱</sup> در برابر فشار شبه‌استاتیکی انجام دادند. آن‌ها پارامترهای له‌شدگی یعنی بیشینه نیرو، جذب انرژی لهیدگی، نیروی متوسط لهیدگی و بازده لهیدگی انواع گوناگون سازه‌های ساندویچی کامپوزیت را در یک سری آزمون‌های فشار محوری مورد بررسی قرار دادند.

قمریان و همکاران [۱۳] به تحلیل آزمایشگاهی و عددی فروریزش لوله‌های مخروطی با درپوش کروی در حالت خالی و پر شده با فوم پلی‌یورتان<sup>۲</sup> پرداختند. همچنین پارامترهای موثر بر فروریزش از قبیل ضخامت و چگالی فوم توسط آن‌ها بررسی شد.

درباره رفتار مکانیکی لوله‌های جدارنازک کارهای بسیار زیادی در داخل و خارج انجام شده است، اما درباره فروریزش لوله‌های برنجی تودرتو قبلاً کاری انجام نشده است. در این مقاله به بررسی جذب انرژی و شیوه فروریزش سازه‌های جدارنازک ساندویچی توخالی و پر شده با فوم پلی‌یورتان با شرایط مرزی دوسرگیردار که تحت بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی قرار گرفته‌اند از دو روش تجربی و تحلیل نرم افزار عددی پرداخته شده است.

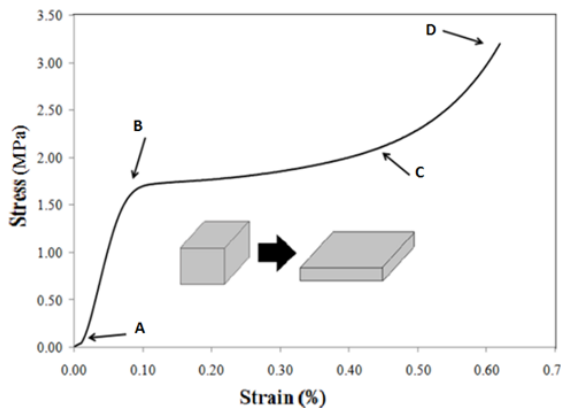
## ۲- مطالعه‌ی آزمایشگاهی

نحوه‌ی آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی و ساخت تجهیزات تأمین‌کننده‌ی شرایط مرزی، اندازه‌گیری دقیق هندسی و تعیین خواص مکانیکی لوله‌های برنجی و فوم پلی‌یورتان از جمله مراحل است که باید قبل از انجام آزمایش فروریزش محوری مورد توجه قرار گیرند. لوله‌های برنجی مورد نظر برای آزمایش فروریزش محوری به روش اکستروژن تهیه شده است. در مطالعه‌ی آزمایشگاهی قطر

1- Composite Sandwich Structures

2- polyurethane foam

می‌دهد. بر طبق این نمودار، مقدار تنش تسلیم و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر ۱/۶۸ مگاپاسکال و ۲۸/۳ مگاپاسکال استخراج گردید.



شکل (۴) نمودار تنش - کرنش مهندسی فوم پلی‌یورتان سخت با چگالی ۱۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب

همان‌طور که مشاهده می‌شود منحنی از سه ناحیه تشکیل شده است:

الف- ناحیه‌ی الاستیسیته خطی (مسیر AB): در کرنش کم، رفتار فوم به‌صورت الاستیک خطی است که شیب آن برابر با مدول الاستیسیته فوم است.

ب- ناحیه‌ی مسطح (مسیر BC): وقتی بار افزایش می‌یابد سلول‌ها به‌وسیله‌ی تسلیم پلاستیک یا به‌بیان دیگر تشکیل لولای پلاستیک تخریب می‌شوند، این ناحیه با افزایش مقدار بار تا زمانی که دیواره‌ی سلول‌ها با هم تماس پیدا می‌کند، ادامه دارد. در این ناحیه افزایش کرنش و تخریب سلول‌ها تقریباً در یک تنش ثابت صورت می‌گیرد.

ج- ناحیه‌ی تراکم (مسیر CD): منحنی تنش-کرنش با افزایش بار و تماس دیواره‌های سلول‌ها وارد ناحیه‌ی تراکم شده می‌شود که این ناحیه با رشد سریع تنش همراه است و در نتیجه منحنی در این ناحیه با شیب تند، افزایشی خواهد شد.

شکل (۵) لوله‌ی دوجداره به‌همراه دو فیکسچر را تحت آزمایش فشار محوری توسط دستگاه زویک ۶۰ تی نشان می‌دهد.

کرنش سنج به نمونه‌های آزمایشگاهی به‌ترتیب ۹۷ گیگا پاسکال و ۰/۳۱ تعیین شد. بر طبق این نمودار، مقدار تنش تسلیم برابر ۲۴۶ مگاپاسکال استخراج گردید.

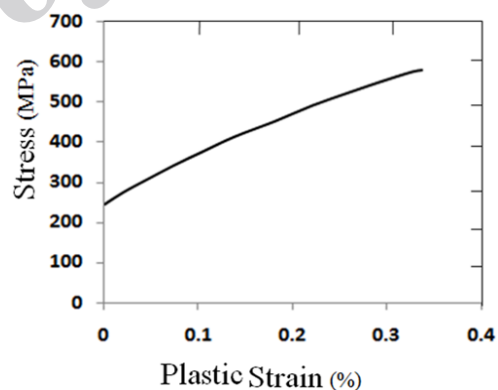


الف



ب

شکل (۲) الف) فیکسچر ب) لوله‌های دوجداره توخالی و پر شده از فوم



شکل (۳) نمودار تنش-کرنش پلاستیک حقیقی ماده‌ی برنجی

برای تعیین خواص مکانیکی فوم پلی‌یورتان از آزمایش فشار محوری استفاده می‌شود. آزمایش فشار براساس استاندارد  $DI621/69ASTM$  و به‌صورت فشردن نمونه‌های مکعبی شکل بین دو صفحه مسطح و موازی است. آزمایش فوم با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت و حدود ۶۵ درصد ضخامت اولیه، فشرده شد. شکل (۴) نمودار تنش - کرنش مهندسی فوم پلی‌یورتان سخت با چگالی ۱۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب را تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی فشاری نشان

### ۳- نحوه‌ی شبیه‌سازی

در این تحقیق از نرم‌افزار اجزای محدود اباکوس برای تحلیل فروریزش لوله‌های دوجداره‌ی برنجی تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری استفاده شده است. شکل (۷) هندسه و بارگذاری لوله‌ی دوجداره را در تحلیل عددی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج آزمایش، برای تحلیل تغییرشکل لوله‌های دوجداره، هندسه‌ی این سازه به صورت سه‌بعدی در نظر گرفته می‌شود. بهترین روش برای ایجاد عیوب هندسی در مدل عددی استفاده از مدهای کماتش است. برای به‌دست آوردن مدهای کماتش و مقادیر ویژه، لوله‌ی استوانه‌ای برنجی با شرایط مرزی دوسرگیردار تحت اثر نیروی واحد در جهت محور قرار داده می‌شود. ضریب نقش هر مد، بیشینه جابه‌جایی اولیه لوله‌ی استوانه‌ای در هر نقص (مد کماتش) است. به عبارت دیگر برای هندسه‌ی اولیه‌ی لوله‌ها به مقدار ۲ درصد ضخامت (یعنی ۲ صدم میلی‌متر) عیوب هندسی در نظر گرفته شده است که این عیوب هندسی (یا برآمدگی سطحی) مطابق مد اول کماتش لوله‌ها به آنها اعمال می‌شود. به‌طور کلی بیشینه مقدار جابه‌جایی اولیه‌ی لوله‌ی دوجداره‌ی برنجی برای مد اول کماتش و برابر دو صدم ضخامت لوله است. رفتار غیرخطی مواد در تغییرشکل‌های بزرگ و اثر برخورد چروک‌های لوله‌های دوجداره با یکدیگر یا با سطح فوقانی و تحتانی ابزار، مدل‌سازی شده تا شرایط تحلیل با شرایط آزمایشگاهی کاملاً منطبق باشد. شبیه‌سازی فروریزش با فرض صلب بودن سطوح مسطح ابزار در مقایسه با نمونه‌ی آزمایشگاهی ارائه شده است.



شکل (۵) آزمایش فشار محوری لوله‌های دوجداره برنجی

در این آزمایش لوله‌های دو جداره به‌همراه فیکسچرها بین دو فک تخت قرار داده می‌شوند، به‌طوری‌که فک تحتانی ثابت و فک فوقانی با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه به‌صورت کاملاً محوری حرکت می‌کند. نمودار نیرو- جابه‌جایی و انرژی جذب شده به‌همراه نحوه‌ی فروریزش از جمله خروجی‌های آزمایشگاهی رفتار لوله‌های دوجداره تحت بارگذاری محوری محسوب می‌شوند.

شکل (۶) فروریزش محوری لوله‌های برنجی (خالی و پر شده با فوم) را نشان می‌دهد که بعد از کاهش ارتفاع ۷۸ درصدی طول اولیه به‌دست آمده‌اند.



شکل (۶) فروریزش نهایی پوسته‌های استوانه‌ای موازی الف) توخالی و ب) پر شده با فوم

با توجه به فروریزش نمونه‌ها مشخص شد که لوله‌ها دارای عیوب هندسی (شامل تغییر غیرخطی ضخامت و یا ایجاد برآمدگی سطحی) می‌باشند بنابراین تغییرشکل نامتقارنی از خود نشان دادند.



کرنش پلاستیک نمونه‌ی کشش ساده استفاده می‌شود (شکل ۳).

در این شبیه‌سازی تنش حقیقی و کرنش پلاستیک از روابط زیر حاصل شده‌اند:

$$\sigma_{tru} = \sigma_{eng} (1 + \varepsilon_{eng}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{tru} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{tru} - \frac{\sigma_y}{E} \quad (3)$$

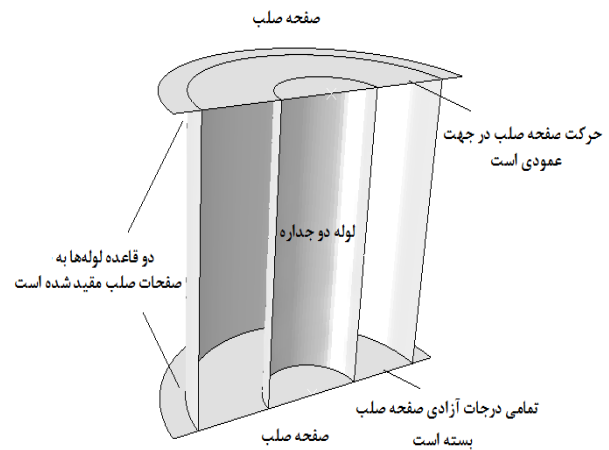
در این معادلات  $\sigma_{tru}$  و  $\varepsilon_{tru}$  به ترتیب تنش و کرنش حقیقی،  $\sigma_{eng}$  و  $\varepsilon_{eng}$  به ترتیب تنش و کرنش مهندسی،  $\varepsilon_{pl}$  کرنش پلاستیک،  $\sigma_y$  تنش تسلیم و  $E$  مدول الاستیسیته است. باید توجه شود که تنش متناظر با کرنش پلاستیک صفر بیانگر حد تسلیم است.

در این شبیه‌سازی از مدل فوم تغییرشکل‌یافته برای فوم پلی‌یورتان استفاده می‌شود. برای مدل فوم تغییرشکل‌یافته با توجه به چگالی کم فوم پلی‌یورتان، نسبت تنش تسلیم و نسبت ضریب پواسون پلاستیک صفر در نظر گرفته شده است. نقاط نمودار تنش حقیقی - کرنش پلاستیک نمونه برنج در جدول (۲) آورده شده است. این مقادیر به‌عنوان ورودی تحلیل اجزای محدود در نظر گرفته می‌شوند.

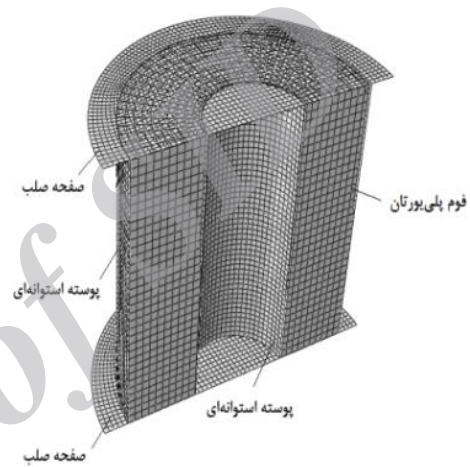
جدول (۲) نقاط نمودار تنش حقیقی - کرنش پلاستیک برنج

$\sigma_{tru} (MPa)$	۲۴۶	۳۰۹	۴۵۳	۴۹۲	۵۵۶	۵۸۰
$\varepsilon_p$	۰	۰/۰۵	۰/۱۸	۰/۲۲	۰/۳۰۴	۰/۳۴

هر صفحه صلب ممکن است شش درجه آزادی شامل سه مؤلفه جابه‌جایی و سه مؤلفه دوران داشته باشد. از آن‌جا که سطح صلب زیرین در تحلیل آزمایشگاهی به فک ثابت دستگاه متصل است، در نتیجه، تمامی درجات آزادی آن مقید شده‌اند. از طرف دیگر، تمامی درجات آزادی غیر از جابه‌جایی در راستای محوری سطح صلب بالایی (که به



الف



ب

شکل (۷) هندسه لوله دو جداره در مدل‌سازی سه‌بعدی در دو حالت (الف) توخالی و (ب) پر شده از فوم

از آن‌جا که شرط مرزی تماسی برای جلوگیری از نفوذ نقاط مختلف لوله‌ی دو جداره به داخل قطعات صلب و امکان لغزش لوله‌ی دو جداره بر روی سطوح صلب تعریف می‌شود، در این مطالعه بین سطح خارجی لوله‌ی دو جداره با سطح صلب بالایی شرط تماس تعریف شده و مقدار ضریب اصطکاک آن ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است [۶].

همچنین رفتار الاستیک - پلاستیک ماده‌ی برنجی لوله‌های دو جداره که با استفاده از آزمایش کشش تعیین شد، در مدل عددی تعریف می‌شود. یعنی برای معرفی ناحیه‌ی الاستیک ماده، مدول یانگ، ضریب پواسون و چگالی تعریف می‌شود و برای تعریف ناحیه‌ی پلاستیک، منحنی تنش حقیقی -

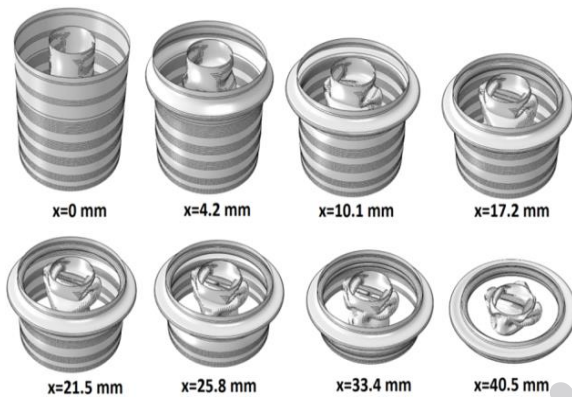
#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- بارگذاری شبه‌استاتیکی

##### ۴-۱-۱- فروریزش محوری لوله‌های ساندویچی

##### توخالی

شکل (۸) مراحل فروریزش پوسته استوانه‌ای موازی برنجی توخالی را تحت شرایط مرزی دوسرگیردار نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، فروریزش پوسته استوانه‌ای موازی با شرایط مرزی دوسرگیردار از ناحیه فوقانی به‌صورت تاخوردگی شروع می‌شود و پشت سرهم ادامه می‌یابد.



شکل (۸) مراحل فروریزش پوسته استوانه‌ای موازی توخالی در جابجایی‌های مختلف.

شکل (۹) نمونه‌ای از مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی فروریزش محوری لوله‌های برنجی را نشان می‌دهد که از کاهش ارتفاع نمونه مشابه با شرایط آزمایشگاهی محاسبه شده است (۷۸ درصد طول اولیه). همان‌طور که ملاحظه می‌شود در هر دو حالت شبیه‌سازی و تجربی نحوه‌ی فروریزش مشابه است.

همان‌طور که دیده می‌شود، شیوه‌ی فروریزش لوله‌ی با قطر خارجی بزرگتر برخلاف لوله به قطر کوچکتر به دلیل متقارن بودن هندسه‌ی آزمایشگاهی آن متقارن محوری است. در این حالت، مقطع لوله کوچکتر از شکل دایره‌ای خارج می‌شود و به‌صورت گوشه‌دار یا اصطلاحاً الماسی تبدیل می‌شود، این شیوه را شیوه مرکب نیز می‌نامند که ترکیبی از

فک متحرک متصل است) مقید شده است. نوع المان‌ها برای تحلیل اجزای محدود وابسته به هندسه نمونه و روش تحلیل است. برای شبیه‌سازی لوله‌ی دوجداره، صفحات صلب و فوم پلی‌یورتان به ترتیب از المان‌های پوسته‌ای چهارگوش با چهار گره (S4R)، المان صلب (R3D4) و المان شش‌گوش با هشت گره (C3D8R) استفاده شده است.

##### ۳-۱- معیارهای مقایسه عملکرد فروریزش ضربه‌گیرها

به‌طور کلی برای بررسی و کارایی جاذب‌های انرژی چند تعریف عمومی وجود دارد که بدین صورت تعریف می‌شوند:

**انرژی ویژه:** یکی از معیارهای مقایسه‌ی بازده جاذب‌ها، انرژی ویژه است که نسبت انرژی جذب‌شده به کل جرم وسیله‌ی جاذب انرژی تعریف می‌شود.

**بازده لهیدگی:** نسبت طول لهیده شده جاذب به طول اولیه‌ی آن است.

##### متوسط نیروی فروریزش: نیروی فروریزش جاذب از

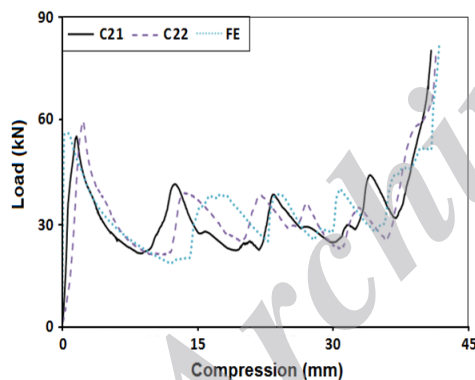
مشخصه‌های ضربه‌گیر است و عکس‌العمل آن موجب ایجاد شتاب‌کاهنده در وسیله‌ای می‌شود که ضربه‌گیر به آن متصل است. حداکثر شتاب توقف وسیله‌ای که سرعت آن توسط جاذب انرژی کاهش می‌یابد را می‌توان توسط نیروی فروریزش تعیین کرد. ضربه‌گیری ایده‌آل است که مقدار متوسط نیروی فروریزشی آن در زمان ضربه ثابت و کوچکتر یا مساوی مقدار مجاز آن باشد.

##### بیشینه نیرو: حداکثر نیرو در جاذب‌های فروریزشی معمولاً

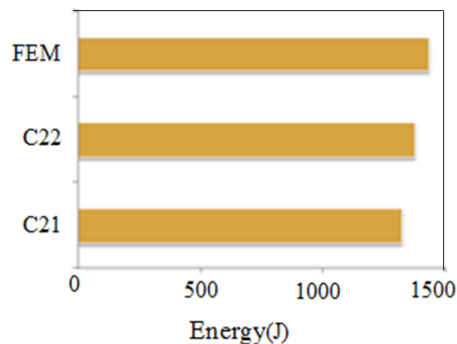
مربوط به تغییر شکل الاستیک است که پس از آغاز تغییر شکل پلاستیک به سرعت کاهش می‌یابد. در طراحی جنس ضربه‌گیرها یک مقدار بیشینه مجاز برای نیرو تعیین می‌شود که نیروی ماکزیمم ضربه‌گیرها باید کوچکتر یا مساوی با آن باشد.



ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد و در نتیجه منحنی نیرو - جابه‌جایی فروریزش متقارن محوری همواره به صورت تناوبی است. میزان افزایش اولین بیشینه‌ی نیروی فروریزش لوله‌های دوجداره در مقایسه با سایر بیشینه‌ی نیروها قابل توجه است که علت این امر پایداری و مقاومت اولیه‌ی لوله‌های دوجداره در برابر بارگذاری محوری است. این درحالی است که با افزایش جابه‌جایی و کماتش لوله‌ها، پایداری آنها در برابر بارگذاری محوری کاهش می‌یابد. در نتیجه منحنی نیرو - جابه‌جایی فروریزش متقارن محوری بدون در نظر گرفتن اولین بیشینه‌ی نیرو همواره به صورت تناوبی است. به طور کلی اختلافی که در بیشینه‌ی نیروها و میزان انرژی جذب شده‌ی لوله‌ی دوجداره‌ی برنجی مشاهده می‌شود را می‌توان به دلیل وجود عیوب و نقص اولیه (شامل تغییر غیرخطی ضخامت، برآمدگی سطح و غیره) حاصل از اکستروژن نمونه‌ها دانست.



شکل (۱۰) مقایسه‌ی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش لوله‌های دوجداره برنجی توخالی



شکل (۱۱) مقایسه‌ی مقدار انرژی فروریزش لوله‌های دوجداره برنجی در حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی

فروریزش چین‌دار و الماسی است. معمولاً در فروریزش متقارن محوری با صرف نظر کردن از اولین بیشینه نیرو که مربوط به واکنش لوله‌های جدارنازک در محدوده‌ی الاستیک است، بهترین شیوه‌ی فروریزش برای جذب انرژی ضربه است. متوسط نیرو در این شیوه‌ی فروریزش یک مقدار تقریباً ثابت است که از ویژگی‌های اساسی یک ضربه‌گیر ایده‌آل است.

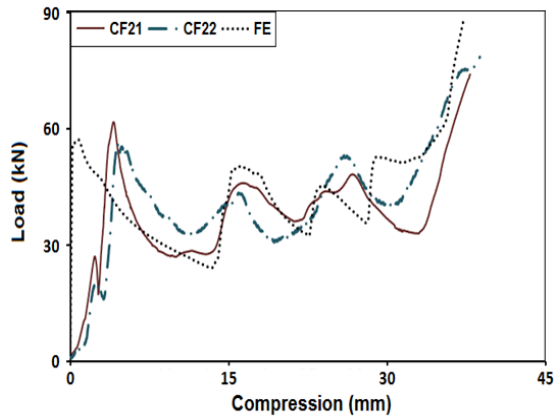


شکل (۹) مقایسه‌ی الف) آزمایشگاهی و ب) شبیه‌سازی هندسه‌ی فروریزش نهایی لوله‌های دوجداره‌ی برنجی توخالی

شکل (۱۰) نمودار نیرو - جابه‌جایی و شکل (۱۱) مقایسه‌ی میزان انرژی فروریزش لوله‌های دوجداره‌ی برنجی را براساس نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، ضمن تشابه روند تغییر نیرو در هر نمونه، تطابق قابل توجهی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی وجود دارد.

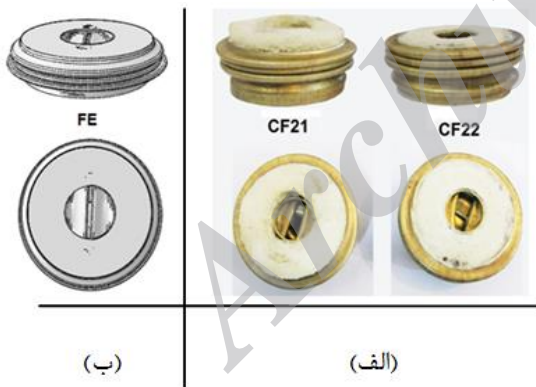
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در شروع بارگذاری، نیرو به طور تقریباً خطی تا یک مقدار افزایش می‌یابد. این روند تغییر نیرو ناشی از رفتار الاستیک لوله‌های دوجداره تحت اثر بار فشاری، قبل از آغاز کماتش است. با شروع فروریزش سطح فوقانی لوله‌های دوجداره و تشکیل چین خارجی نیرو افت می‌کند. سپس نیرو با تشکیل چین داخلی و تکمیل اولین چین خوردگی افزایش می‌یابد که با تشکیل چین خارجی دوباره کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، در حین فرآیند فروریزش، نیرو با تشکیل چین خارجی و داخلی به

می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روند تغییر نیروی نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مشابه است.



شکل (۱۳) مقایسه‌ی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نمودار نیرو-جابجایی فروریزش لوله‌های دوجداره برنجی پرشده با فوم

شکل (۱۴) فروریزش نهایی نمونه استوانه‌ای موازی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان را تحت شرایط مرزی دوسرگیردار نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در حین فروریزش به دلیل کم بودن استحکام کششی فوم پلی‌یورتان، این نوع فوم‌ها در بین چین‌های پوسته استوانه‌ای موازی برنجی نفوذ نمی‌کنند.



شکل (۱۴) مقایسه‌ی الف) آزمایشگاهی و ب) شبیه‌سازی هندسه‌ی فروریزش نهایی لوله‌های دوجداره‌ی برنجی پرشده با فوم

شکل (۱۵) نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای موازی توخالی و تقویت‌شده با فوم را در حالت تجربی تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی با شرایط مرزی دوسرگیردار نشان می‌دهد. آنچه منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی این نمونه‌ها را از یکدیگر متفاوت می‌کند، بیشینه

مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی پوسته استوانه‌ای موازی توخالی در جدول (۳) نشان داده شده است. مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد، نتایج تجربی و شبیه‌سازی فروریزش پوسته استوانه‌ای موازی توخالی تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی به یکدیگر نزدیک است.

جدول (۳) مقایسه نتایج مدل‌سازی و تجربی پوسته‌ی استوانه‌ای موازی

توخالی		
هندسه نمونه	شبیه‌سازی	آزمایشگاهی
طول لهیدگی (میلی متر)	۴۳/۰۶	۴۱/۴
اولین بیشینه نیرو (کیلو نیوتن)	۵۶	۵۹
انرژی جذب‌شده (ژول)	۱۵۴۵	۱۳۷۵
انرژی ویژه (ژول بر گرم)	۱۵/۷۰	۱۴/۰۱

برای تحقیق حاضر اثر تعداد المان‌های لوله‌ی دوجداره‌ی برنجی بررسی شده است که با توجه به همگرایی پاسخ فروریزش، تعداد المان‌های لوله‌ی دوجداره‌ی برنجی در حدود ۱۶ هزار المان در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۱-۲- فروریزش محوری لوله‌های ساندویچی پرشده با فوم

شکل (۱۲) مراحل فروریزش پوسته استوانه‌ای موازی تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان با چگالی ۱۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب را تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی نشان می‌دهد.



شکل (۱۲) مراحل فروریزش پوسته استوانه‌ای موازی پرشده با فوم در جابجایی‌های مختلف.

شکل (۱۳) نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش سه‌بعدی نمونه استوانه‌ای موازی تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان را در حالت تجربی و مدل‌سازی برای شرایط مرزی دوسرگیردار نشان

انرژی جذب شده لوله‌ی توپر بیشتر است، بنابراین طبیعی است که میزان انرژی ویژه‌ی آن نسبت به لوله‌ی توخالی کمتر باشد. این امر برای مرجع [۱۴] نیز تکرار شده است.

#### ۴-۲- بررسی پارامتری

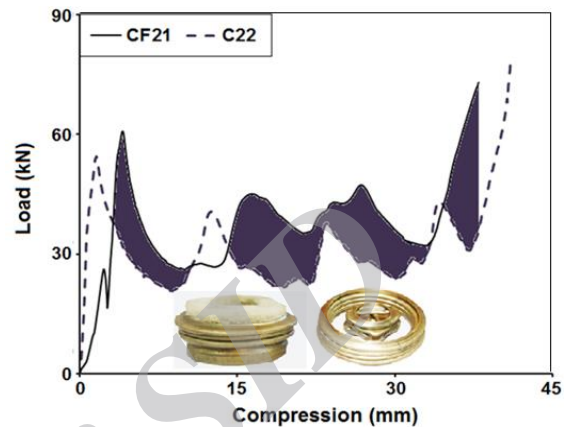
پس از اطمینان از صحت مدل ارائه شده برای تحلیل فرآیند فروریزش لوله‌های دوجداره‌ی برنجی، لازم است با استفاده از این مدل‌ها اثر عیوب هندسی، اثر چگالی فوم و اثر خواص مکانیکی لوله بر بیشینه نیروی فروریزش و میزان انرژی جذب شده آن‌ها تحت بارگذاری محوری بررسی شود.

#### ۴-۲-۱- اثر عیوب هندسی

شیوه‌ی فروریزش الماسی یک حالت ناپایدار به شمار می‌رود؛ زیرا با ایجاد شرایطی مثل افزایش ضخامت لوله‌ی برنجی و عدم نقص اولیه در مدل می‌توان از به وجود آمدن شکل الماسی جلوگیری کرد. همان‌طور که در شکل (۱۶) ملاحظه می‌شود، فروریزش متقارن محوری (بدون لحاظ عیوب هندسی) علاوه بر افزایش مقدار نیروهای بیشینه از سطح انرژی بیشتری نسبت به دیگر نوع فروریزش‌ها برخوردار است. در مقاله حاضر، میزان تأثیر عیوب هندسی بر مقدار انرژی جذب شده در حدود ۵ درصد است. این نتایج نشان می‌دهد، عیوب هندسی بر میزان انرژی جذب شده تأثیر چندانی ندارد. اما بیشترین اختلاف مربوط به اختلاف بیشینه نیروها است که در تحقیق حاضر، بیشینه اختلاف نیروها (در جابه‌جایی ۲۵ میلی‌متر) برابر ۲۲ درصد است.

شکل (۱۷) نیز اثر عیوب هندسی بر نحوه‌ی فروریزش لوله‌های دوجداره‌ی دو سرگردار توخالی را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، عدم لحاظ عیوب هندسی سبب فروریزش متقارن محوری در مدل اجزای محدود می‌شود.

و کمینه نیروهای هر تغییر شکل است به طوری که با وجود فوم، بیشینه و کمینه نیروهای منحنی نیرو - جابه‌جایی افزایش می‌یابد. این امر به معنای افزایش سطح زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی و یا به عبارت دیگر افزایش قابلیت جذب انرژی در نمونه‌های استوانه‌ای موازی است.



شکل (۱۵) نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای موازی توخالی و تقویت شده با فوم در حالت آزمایشگاهی.

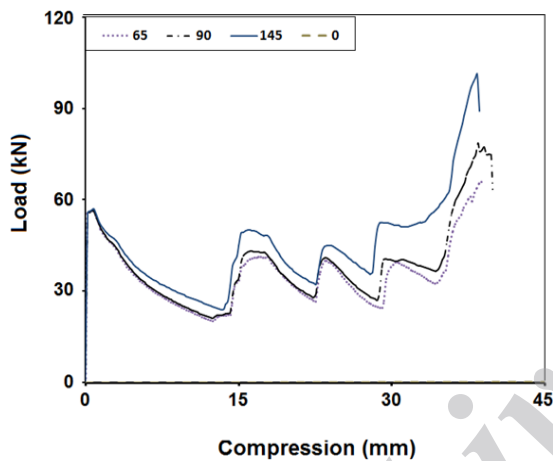
نیروی متوسط فروریزش و میزان انرژی جذب شده نمونه‌های استوانه‌ای موازی توخالی و تقویت شده با فوم با چگالی ۱۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب، برای بازده لهیدگی ۶۰ درصد (طول لهیدگی برابر ۳۳ میلی‌متر) در جدول (۴) برای مقایسه آورده شده است.

جدول (۴) مقایسه پارامترهای فروریزش نمونه‌های استوانه‌ای توخالی و تقویت شده با فوم پلی‌پورتان با طول لهیدگی یکسان

[۱]	نام نمونه	[۲]	C <sub>2</sub>	[۳]	CF <sub>2</sub>
[۴]	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	[۵]	۰	[۶]	۱۴۵
[۷]	جرم سازه (گرم)	[۸]	۹۷/۷۵	[۹]	۱۲۰
[۱۰]	انرژی جذب شده (ژول)	[۱۱]	۱۰۴۶	[۱۲]	۱۲۱۵
[۱۳]	متوسط نیروی فروریزش (کیلونیوتن)	[۱۴]	۳۱/۶۹	[۱۵]	۳۶/۸۱
[۱۶]	انرژی ویژه (ژول بر گرم)	[۱۷]	۱۰/۷۰	[۱۸]	۱۰/۱۱

همان‌طور که از جدول (۴) مشاهده می‌شود میزان افزایش انرژی جذب شده لوله‌های توپر نسبت به توخالی در حدود ۱۴ درصد است. این درحالیست که میزان افزایش وزن سازه‌ی توپر به توخالی در حدود ۱۹ درصد است. از آنجا که میزان افزایش وزن سازه‌ی توپر نسبت به میزان افزایش

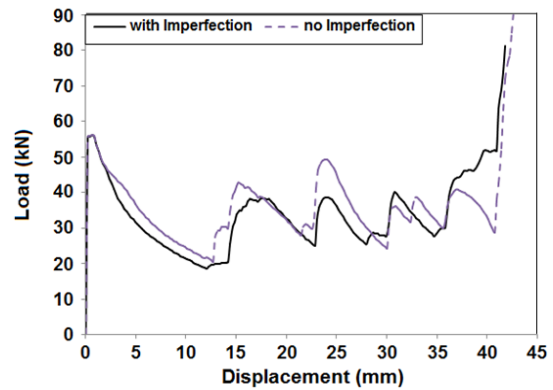
مطالعات نشان می‌دهند شیوه فروریزش و تعداد چین‌های طرح منتخب تقویت‌شده با فوم پلی‌یورتان با دانسیته‌های متفاوت مشابه‌اند. آنچه این منحنی‌ها را از یکدیگر متفاوت می‌کند، کمینه نیروهای هر چین است به طوری که با افزایش دانسیته فوم، کمینه نیروهای منحنی نیرو - جابه‌جایی افزایش می‌یابد. این امر به معنای افزایش سطح زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی و یا به عبارت دیگر افزایش قابلیت جذب انرژی در نمونه‌های استوانه‌ای است. شکل (۱۹) به ترتیب نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته استوانه‌ای دو جداره برنجی با شرایط مرزی دوسرگیردار را تحت اثر چگالی فوم نشان می‌دهد.



شکل (۱۹) نمودار نیرو - جابه‌جایی جاذب استوانه‌ای دو جداره تحت تأثیر چگالی‌های مختلف فوم پلی‌یورتان

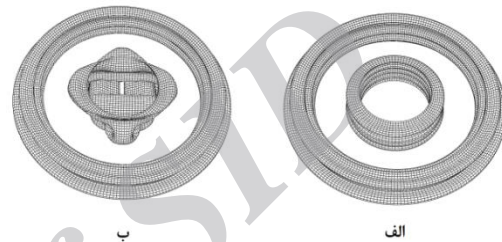
#### ۴-۲-۳- اثر خواص مکانیکی لوله

نمودار نیرو - جابه‌جایی برای لوله‌های با اندازه و ضخامت دیواره یکسان ولی با مواد گوناگون در شکل (۲۰) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. لوله‌های دو جداره از برنج (تحقیق حاضر) و ورق فولادی ساخته شده‌اند و دارای ضخامت ثابت (۱ میلی‌متر) و قطرهای (۲۰ میلی‌متر و ۵۰ میلی‌متر) یکسان هستند. لازم به توضیح است که لوله‌های فولادی دارای تنش تسلیم ۳۰۰ مگاپاسکال و ضریب پلاستیسیته (شیب ناحیه‌ی پلاستیک) ۱۰۰۰ مگاپاسکال هستند و از مرجع [۱۵] انتخاب شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد، میزان جذب انرژی در لوله‌های فولادی به دلیل افزایش ۱۸ درصدی



شکل (۱۶) مقایسه‌ی نمودار نیرو - جابه‌جایی فروریزش لوله‌های

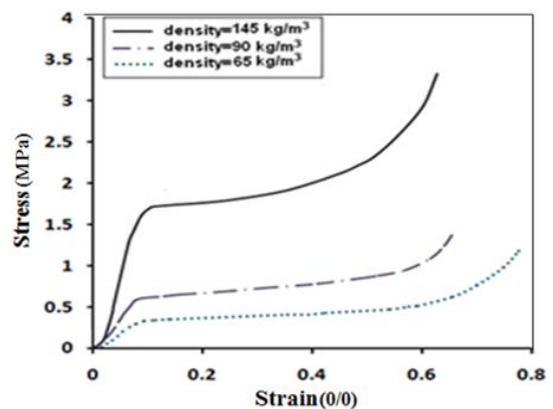
دو جداره‌ی برنجی توخالی دوسرگیردار



شکل (۱۷) مقایسه‌ی هندسی فروریزش نهایی لوله‌های دو جداره‌ی توخالی دوسرگیردار در حالت (الف) بدون لحاظ عیوب هندسی (ب) با لحاظ عیوب هندسی

#### ۴-۲-۴- اثر چگالی فوم پلی‌یورتان بر رفتار فروریزش

در تحلیل عددی اثر فوم پلی‌یورتان با چگالی‌های ۶۵، ۹۰ و ۱۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب بر فروریزش نمونه‌های استوانه‌ای موازی تقویت شده با فوم پلی‌یورتان با شرایط مرزی دوسرگیردار انجام شده است. خواص مکانیکی هریک از فوم‌ها در شکل (۱۸) آورده شده است.



شکل (۱۸) نمودار تنش - کرنش فوم پلی‌یورتان با چگالی‌های

مختلف [۸].

### ۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، فروریزش لوله‌های دوجداره تحت بارگذاری محوری به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. با توجه به نتایج آزمایش (تغییر شکل الماسی لوله با قطر کوچکتر) برای تحلیل تغییر شکل سازه جدارنازک از مدل سه بعدی برای شبیه سازی استفاده شد. نتایج طراحی نشان می‌دهد، نمودار نیرو- جابه‌جایی، میزان انرژی جذب شده و نحوه ی فروریزش محوری لوله‌های دوجداره برنجی تحت شرایط مرزی دوسرگیردار برابری خوبی با نتایج تجربی دارد. از بررسی فروریزش این نوع سازه‌ها نتایج زیر بدست می‌آیند:

- در صورتی که عیوب اولیه در ساخت پوسته‌های متقارن محوری زیاد باشد، پوسته تحت بارگذاری محوری به صورت الماسی فروریزش می‌کند.

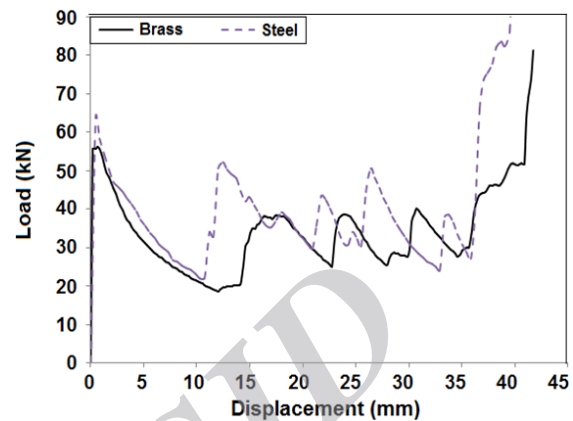
- با افزایش ضخامت لوله، انرژی جذب شده توسط نمونه افزایش یافته و چین خوردن نمونه از نحوه الماسی به متقارن تغییر می‌یابد.

- عیوب هندسی در این مطالعه بر انرژی جذب شده لوله‌های دوجداره ی برنجی تأثیر چندانی ندارد اما سبب کاهش نیروهای بیشینه نسبت به عدم لحاظ عیوب هندسی در مدل می‌شود.

- با افزایش دانسیته فوم، کمینه نیروهای منحنی نیرو- جابه‌جایی افزایش می‌یابد. این امر به معنای افزایش سطح زیر نمودار نیرو- جابه‌جایی و یا به عبارت دیگر افزایش قابلیت جذب انرژی در نمونه‌های استوانه‌ای است.

- از آن جا که افزایش چشمگیر بیشینه نیروی فروریزش باعث خسارت‌های جبران ناپذیر می‌شود، این مطالعه نشان داد که با افزایش تنش تسلیم ماده میزان نیروهای بیشینه افزایش محسوسی دارند.

تنش تسلیم ماده ی آن نسبت به برنج به میزان ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تمامی بیشینه نیروهای ماده ی فولادی از ماده ی برنجی به دلیل تغییر نمودار ماده تغییر می‌کند.



شکل (۲۰) اثر نوع ماده بر نمودار نیرو- جابه‌جایی فروریزش نهایی لوله‌های دوجداره ی توخالی دوسرگیردار

### ۴-۲-۴- اثر ضخامت لوله بر میزان انرژی جذب شده

مطابق جدول (۵) اثر ضخامت لوله بر جذب انرژی نمونه‌های استوانه‌ای موازی توخالی و تقویت شده با فوم پلی‌یورتان با شرایط مرزی دوسرگیردار بررسی شده است.

جدول (۵) مقایسه جذب انرژی نمونه توخالی و تقویت شده با فوم در ضخامت‌های مختلف برای بازده لهیدگی ۷۰ درصد

ضخامت (میلی متر)			
۲	۱/۵	۱	
۴۱۲۰	۲۲۵۰	۱۲۵۶	انرژی جذب شده (J)
۱۰۶/۶۵	۵۸/۲۴	۳۲/۵	متوسط نیروی فروریزش (kN)
۴۶۱۸	۲۶۷۲	۱۷۴۴	انرژی جذب شده (J)
۱۱۹/۵۴	۶۹/۱۶	۴۵/۱۴	متوسط نیروی فروریزش (kN)

با افزایش ضخامت لوله ی برنجی از به وجود آمدن فروریزش الماسی در لوله داخلی جلوگیری شده و لوله به صورت متقارن دچار چین خوردگی می‌شود.



circular tube energy absorbers under lateral impact loading, *International Journal of Mechanical Sciences*, No. 50, 2008, pp. 104-116.

- [7] X Zhang, H Huh., Energy absorption of longitudinally grooved square tubes under axial compression, *Journal of Thin-Walled Structures*, 2009.
- [8] Jones, N., Dynamic energy absorption and perforation of ductile structures, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, No. 87, 2010, pp. 482-492.
- [9] S Hou, Xu Han, G Sun., Multiobjective optimization for tapered circular tubes, *Journal of Thin-Walled Structures*, 2011.
- [10] Ghamarian A, Abadi M.T., Axial crushing analysis of end-capped circular tubes, *Thin-Walled Structure*, Vol.49, 2011, pp. 743-752.
- [11] Ghamarian A, Zarei H.R, Abadi M.T., Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of Empty and Foam-filled End capped Conical Tubes, *Thin-walled Structure*, Vol. 49, 2011, pp.1312-1319.
- [12] Tarlochan F and Ramesh S., Composite sandwich structures whitnsted inserts for energy absorption application, *Composite Structures*, No. 94, 2012, pp. 904-9016.
- [13] Ghamarian A, Zarei H.R, Farsi M.A, Ariaeifar N., Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of the empty and foam-filled conical Tube with shallow spherical caps, doi:10.1111/str:12028 strain 49, 2013, pp.199-211.
- [14] Ahmad Z., Thambiratnam D.P., Crushing Response of Foam-Filled Conical Tubes under Quasi-Static Axial Loading, *Materials and Design*, Vol. 30, 2009, pp. 2393-2403.
- [15] Aljawi A. A. N., Numerical Simulation of Axial Crushing of Circular Tubes, *Engineering science*, Vol.14, No. 2, 2002, pp. 3-17.

- وجود فوم پلی‌یورتان در لوله‌های ساندویچی تاثیر ناچیزی در افزایش اولین بیشینه نیرویی دارد و انرژی ویژه جذب را کاهش می‌دهد.

### فهرست علائم

$\sigma_y$	تنش تسلیم
$E$	مدول الاستیسیته
$\sigma_{tru}$	تنش حقیقی
$\epsilon_{tru}$	کرنش حقیقی
$\sigma_{eng}$	تنش مهندسی
$\epsilon_{eng}$	کرنش مهندسی
$\epsilon_{pi}$	کرنش پلاستیک

### مراجع

- [1] Alexander J.M., An Approximate Analysis of the Collapse of Thin Cylindrical Shells under Axial Loading, *Quart Journal of Mechanical Application Mathematics*, Vol. 13, 1960, pp.10-15.
- [2] Yamasaki K, Han J., Maximization of Crushing Energy Absorption of Cylindrical Shells, *Advanced Engineering Software*, 2000, pp.425-34.
- [3] Aktay L, Toksoy A.K, Guden M., Quasi-static Axial Crushing of Extruded Polystyrene Foam-Filled Thin-Walled Aluminum Tubes: Experimental and Numerical Analysis, *Materials and Design*, Vol. 27, 2006, pp.556-565.
- [4] Kavi Halit, Toksoy Kaan, Guden Mustafa., Predicting Energy Absorption in a Foam-Filled Thin-Walled Aluminum Tube Based on Experimentally Determined Strengthening Coefficient, *Journal of Material and Design*, Vol.27, 2006, PP.263-269.
- [5] Gupta N.K, Venkatesh., Experimental and Numerical Studies of Impact Axial Compression of Thin-Walled Conical Shells, *International Journal Impact Engineering*, Vol. 34, 2007, pp.708-720.
- [6] Olabi A.G, Morris E, Hashmi M.S.J. and Gilchrist M.D., Optimized design of nested