

بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی جذب انرژی در لوله استوانه‌ای پر شده از فوم پلی اورتان با استفاده از آغازگر

محمد جواد رضوانی^{۱*}، نگین نگهبان واشقانی^۲ و محمد دامغانی نوری^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: جذب انرژی ویژه، ماکزیمم نیروی لهیدگی، آغازگر، فوم پلی اورتان.</p>	<p>در این مقاله، جذب انرژی در لوله‌های استوانه‌ای پر شده از فوم پلی اورتان با آغازگر تحت نیروی محوری بررسی می‌شود. در این تحقیق، یک آغازگر در بالای لوله پر شده از فوم قرار می‌گیرد تا از اعمال نیروی ناگهانی به قسمت اصلی سازه جلوگیری کند. بدین منظور یک لوله استوانه‌ای پر شده از فوم پلی اورتان با آغازگر در نرم افزار آباکوس به صورت شبه استاتیک مدل می‌شود و اثر طول آغازگر در میزان جذب انرژی ویژه، نحوه تغییر شکل و منحنی نیرو-جابجایی مطالعه می‌گردد. همچنین، به منظور بررسی صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی تعدادی تست تجربی انجام شده که نتایج قابل قبولی را نشان می‌دهد.</p>

۱- مقدمه

پایین را در لوله‌های جدار نازک با ابعاد $D/t = 600$ تحت شرایط شبه استاتیکی و دینامیکی بررسی نمودند. آنها نشان دادند که پایداری لهیدگی در اثر وجود فوم نه تنها به دلیل پر شدن لوله با فوم بلکه به دلیل تغییر مد کمانش از حالت الماسی به آکاردئونی و به طور کلی ایجاد کمانش پیشرونده، بیشتر می‌شود [۳ و ۴]. لانگس و هنسن در سال ۱۹۹۹ نشان دادند که استفاده از فوم می‌تواند در کاهش وزن و ضخامت لوله‌های استفاده شده به عنوان جاذب انرژی نقش به سزایی داشته باشند [۷]. حسینی پور و همکارانشان در سال ۲۰۰۳، استفاده از شیارهای حلقوی متناوب را به عنوان یکی از راه‌های کنترل لهیدگی لوله‌های جدار نازک معرفی نمودند. یکی از نتایج مهم آنها این بود که با افزایش فاصله شیار و کاهش تعداد شیارها در نمونه‌ها لهیدگی از حالت آکاردئونی خارج و به حالت الماسی تبدیل می‌شود [۸]. با توجه به مطالبی که مطرح شد افزایش جذب انرژی ویژه و

امروزه، لوله‌های جدار نازک پر شده از فوم جهت بهبود جذب انرژی ویژه و تبدیل انرژی جنبشی به کار پلاستیک به کار گرفته می‌شوند. لذا تحقیقات گسترده‌ای بر روی لوله‌های آلومینیومی و فولادی پر شده از فوم انجام شده است [۱-۶]. تورنتون در سال ۱۹۸۱، رفتار سازه‌های جدار نازک پر شده با فوم در مقاطع مختلف را بررسی نمود. مطالعه وی نشان داد که بار متوسط لهیدگی لوله در این حالت به دلیل اثر تعامل لوله و فوم از بار متوسط لهیدگی فوم و لوله به تنهایی، بیشتر است [۱]. ردی و همکارانش در سال ۱۹۸۶، اثر فومهای پلی اورتان دانسیته

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

۱. استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی جذب انرژی در لوله استوانه‌ای پر شده از فوم پلی اورتان با استفاده از آغازگر

بالا می‌رود ولی تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی نیروی ماکزیمم لهیدگی ندارد [۱۴]. همچنین در سال ۲۰۱۳، رفتار لهیدگی لوله‌های مربعی به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی با یک آغازگر مخروطی خارجی انجام شد. در این تحقیق زاویه آغازگر مخروطی روی میزان جذب انرژی، راندمان نیروی لهیدگی و جذب انرژی ویژه بررسی گردید. نتایج نشان داد که استفاده از این نوع آغازگر باعث افزایش ضربه پذیری و کاهش ماکزیمم نیروی لهیدگی می‌شود [۱۵]. متدولوژی و روش تحقیق در این مقاله، شبیه‌سازی عددی در نرم افزار آباکوس و آزمایشگاهی به منظور بررسی اثر فوم پلی‌اورتان، وجود آغازگر و تغییر در طول آغازگر بر روی جذب انرژی ویژه و نیروی اوج اولیه می‌باشد.

۲- خصوصیات مواد

۲-۱- آلومینیوم

جنس لوله استوانه‌ای از نوع آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 است که خصوصیات مکانیکی آن مطابق جدول (۱) می‌باشد. خصوصیات ماده به صورت الاستیک خطی که با کار سختی غیرخطی در منطقه پلاستیک دنبال می‌شود تعریف شده است. لذا، منحنی تنش-کرنش مطابق استاندارد تست کشش ASTM B557M بدست می‌آید.

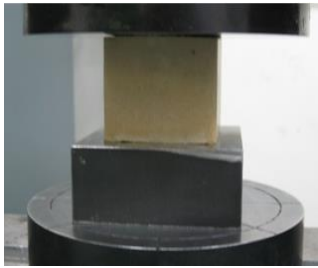
جدول ۱- خصوصیات مکانیکی آلیاژ آلومینیوم

نوع آلیاژ آلومینیوم	6061-T6
چگالی (kg/m^3)	۲۷۰۰
مدول یانگ (GPa)	۶۹
ضریب پواسون	۰/۳۳
تنش تسلیم (MPa)	۳۱۱
استحکام نهایی (MPa)	۳۴۸

شکل (۱) منحنی تنش برحسب کرنش پلاستیک که در نرم‌افزار آباکوس گنجانیده می‌شود رسم شده است. بنابراین، نقاط تنش-کرنش واقعی در نرم افزار آباکوس طبق شکل (۱) تقریب زده می‌شوند.

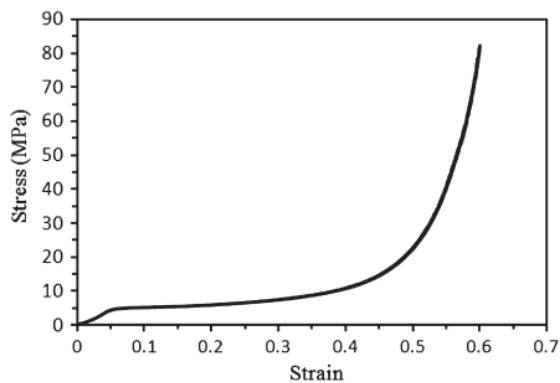
کاهش نیروی اوج اولیه از جمله مهمترین معیارها در طراحی جاذب‌های انرژی می‌باشند. لذا، در سال ۲۰۰۸، ژانگ و همکارانش ستون جدار نازک توخالی با مقطع مستطیلی مجهز به آغازگر را به صورت عددی و آزمایشگاهی مطالعه کردند. آنها، آغازگر را به کمک تعدادی تسمه به ستون متصل نمودند. آنها نشان دادند که نیروی اوج اولیه ۳۰٪-۲۰٪ کاهش می‌یابد ولی طول آغازگر نیز باید دارای اندازه بهینه باشد و اگر این طول بیشتر از حالت بحرانی باشد، دیگر آغازگر اثری بر نیروی اوج اولیه ندارد. از طرفی تعداد تسمه‌های متصل کننده آغازگر به لوله نیز، در مد کمانش تاثیر بسزایی دارد [۹].

در سال ۲۰۰۹ ژانگ و همکارانش مقطع جدار نازک دایره‌ای شکل توخالی مجهز به آغازگر را در شرایطی مشابه با کار قبلی به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی نمودند [۱۰]. علی قمریان و محمد عبدی در سال ۲۰۱۱، لوله‌های استوانه‌ای انتها بسته توخالی و پر شده از فوم پلی‌اورتان را به صورت شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی مطالعه نمودند. آنها نشان دادند که وجود فوم، جذب انرژی ویژه را بالا برده و به تبع آن ظرفیت جذب انرژی بالا می‌رود و در نهایت نیروی اوج اولیه کاهش می‌یابد [۱۱]. یان و همکارانش در سال ۲۰۰۷ اثر فوم را در جذب انرژی مقاطع جدار نازک استوانه‌ای به صورت شبیه‌سازی عددی انجام دادند. آنها نشان دادند وجود فوم در این مقاطع در افزایش جذب انرژی نقش به سزایی دارد [۱۲]. سلیمی و همکارانش در سال ۲۰۰۸ با بررسی لوله‌های باریک شونده پر شده از فوم با مقطع مستطیلی به صورت شبیه‌سازی عددی و تست آزمایشگاهی نشان دادند که با افزایش چگالی فوم می‌توان جذب انرژی را بالا برد [۱۳]. در سال ۲۰۱۳، مطالعه‌ای بر روی لوله‌های جدار نازک خالی و پر شده از فوم با در پوش‌های کروی کم عمق به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی انجام شد. در این تحقیق تاثیر در پوش‌های کروی روی رفتار لهیدگی دو سازه استوانه‌ای و مخروط بررسی گردید. نتایج نشان داد که هر چند با افزایش چگالی میزان جذب انرژی



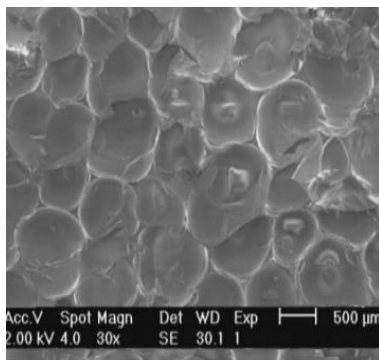
شکل ۳- نمونه مکعبی فوم پلی اورتان جهت تست فشار محوری

بعد از تست فشار محوری منحنی تنش- کرنش فوم پلی اورتان مطابق شکل (۴) بدست می آید.

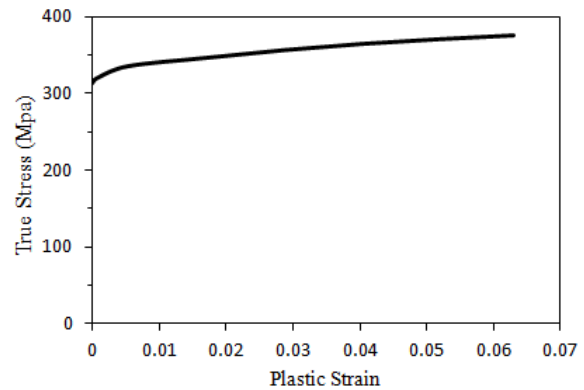


شکل ۴- منحنی تنش-کرنش فوم پلی اورتان با چگالی 266 kg/m^3

همانطور که دیده می شود، این منحنی دارای سه منطقه می باشد: منطقه الاستیک خطی با مدول الاستیک Mpa $E = 82$ ، منطقه مسطح با تنش تسلیم $\sigma_{pl} = 4/8 \text{ Mpa}$ و منطقه چگالش. همچنین شکل (۵) سلول های فوم پلی اورتان با چگالی 266 kg/m^3 را نشان می دهد که با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی بدست آمده است.



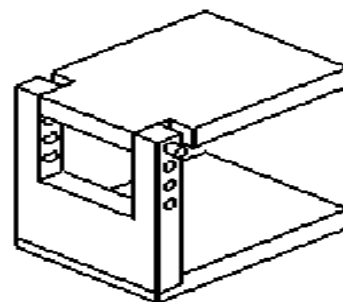
شکل ۵- ساختار سلول های فوم پلی اورتان



شکل ۱- تنش واقعی برحسب کرنش پلاستیک برای آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 از تست تجربی

۲-۲- فوم پلی اورتان

فوم پلی اورتان از ترکیب دو ماده پلی آل و پلی ایزوسیانات ساخته می شود. بعد از ترکیب این دو مایع به مدت ۶۰ ثانیه، درون لوله ها تزریق شده و برای رسیدن به چگالی مورد نظر توسط فیکسچر محکم می شوند. شکل (۲) نمایی از فیکسچر ساخته شده به منظور نگهداری نمونه ها را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود، این فیکسچر شامل دو صفحه در بالا و پایین است که نمونه در بین این دو صفحه به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفته و توسط پیچ دستی محکم می گردد.



شکل ۲- نمایی از فیکسچر به منظور نگهداری لوله های استوانه ای پر شده از فوم

به منظور تعیین مشخصات مکانیکی فوم، نمونه مکعبی به ابعاد $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ مطابق استاندارد ASTM D1621-94 و با سرعت 10 mm/min مطابق شکل (۳) تحت فشار محوری قرار داده می شود.

۳- معیارهای ارزیابی جاذب‌های انرژی

پارامترهای مورد نظر در این مقاله که از منحنی‌های نیرو-جابجایی به دست می‌آیند به شرح ذیل هستند:

۳-۱- انرژی جذب شده

این پارامتر کل انرژی صرف شده جهت تغییر شکل سازه را نشان می‌دهد و برابر با مساحت زیر منحنی نیرو جابجایی می‌باشد.

$$E_{abs} = \int Pd\delta \quad (1)$$

که P و δ به ترتیب نیرو و طول لهیدگی می‌باشند.

۳-۲- نیروی متوسط لهیدگی

نیروی متوسط لهیدگی (P_m) برای یک تغییر شکل معین به صورت زیر تعریف می‌شود. که در آن کل انرژی جذب شده (E_{abs}) بر کل تغییر شکل (δ) تقسیم می‌گردد.

$$P_m = \frac{E_{abs}}{\delta} \quad (2)$$

۳-۳- راندمان نیروی لهیدگی

این پارامتر به منظور مقایسه کارایی جاذب‌های انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد و به صورت نسبت نیروی متوسط لهیدگی به ماکزیمم نیروی لهیدگی تعریف می‌شود.

$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (3)$$

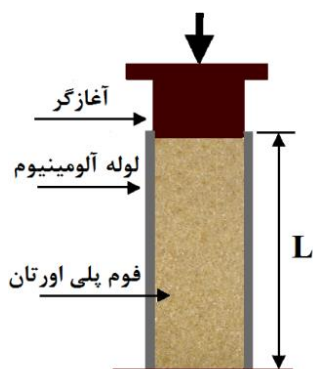
۳-۴- جذب انرژی ویژه

جذب انرژی ویژه به صورت نسبت انرژی جذب شده بر واحد جرم تعریف می‌شود:

$$SEA = \frac{E_{abs}}{m} \quad (4)$$

۴- تست تجربی

در این مقاله فرآیند لهیدگی محوری پنج نمونه لوله استوانه‌ای پر شده از فوم با آغازگر مورد آزمایش قرار گرفته است. آزمایشات فشار محوری شبه استاتیک در دستگاه پرس هیدرولیکی با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. به این منظور نمونه‌های آلومینیومی بدون درز به قطر d ، ضخامت t و طول لوله L ساخته شدند. شکل (۶) نحوه قرارگیری آغازگر بر روی لوله پر شده از فوم را نشان می‌دهد. همچنین، جزئیات ابعاد نمونه‌ها و طول آغازگر l در جدول (۲) آورده شده است.

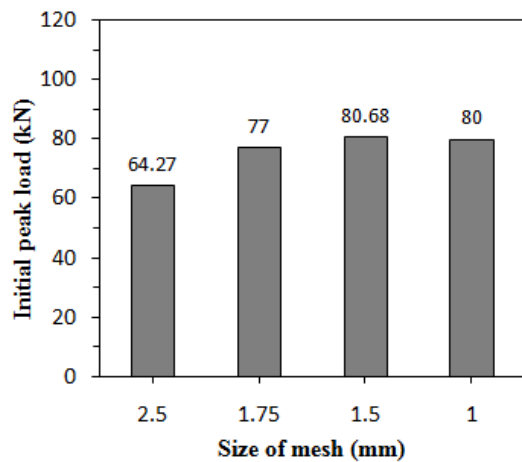


شکل ۶- نحوه قرارگیری آغازگر بر روی لوله

جدول ۲- مشخصات ابعاد نمونه‌های تست

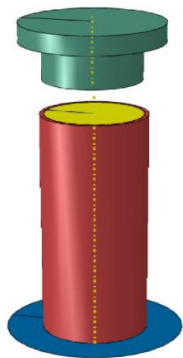
نمونه‌ها	$d(mm)$	$L(mm)$	$t(mm)$	$l(mm)$
C-F	۴۳/۷	۱۲۰	۲	-
C-F-20	۴۳/۷	۱۲۰	۲	۲۰
C-F-30	۴۳/۷	۱۲۰	۲	۳۰
C-F-40	۴۳/۷	۱۲۰	۲	۴۰

با توجه به جدول (۲) نمونه‌ها با حروف لاتین و یک عدد نامگذاری شده‌اند. حروف لاتین اول و دوم به ترتیب مربوط به استوانه و فوم می‌باشند و عدد بعد از حرف لاتین دوم نشان دهنده طول آغازگر است. شکل نهایی نمونه‌ها بعد از تست در شکل (۷) نشان داده شده است.



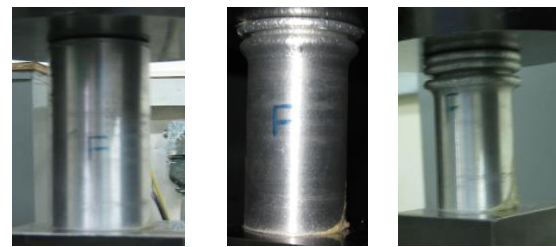
شکل ۸- همگرایی نیروی پیک اولیه برحسب اندازه مش برای لوله استوانه‌ای پر شده از فوم با آغازگر ۲۰mm

بنابراین هیچ اثر اینرسی در شکل‌گیری مکانیزم رخ نمی‌دهد و از اثرات دینامیکی نیز صرف‌نظر شده است. شکل (۹) جزئیات مدل سه بعدی را نشان می‌دهد.

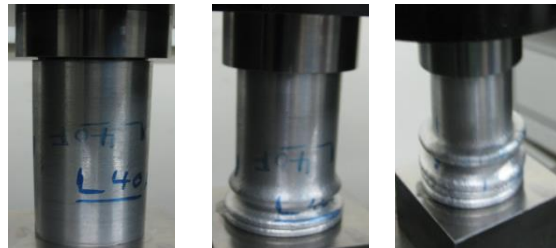


شکل ۹- جزئیات مدل سه بعدی

به منظور دستیابی به مش‌بندی با کیفیت بالا از تکنیک ALE، که به مفهوم دو تحلیل لاگرانژی و اویلری به طور همزمان می‌باشد، استفاده شده است. لازم به ذکر است، این تکنیک امکان دستیابی به مش‌هایی با کیفیت عالی، در مسائلی که امکان جدا شدن ماده از جسم یا احتمال جابه‌جایی ماده وجود دارد را می‌دهد. برای مدل کردن فوم و تعریف خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن که از نتایج تجربی حاصل شده است از مدل فوم قابل فروریزش با کار سختی ایزوتروپیک که مشخصات آن در جدول (۳) نشان داده شده استفاده می‌شود.



(الف)



(ب)

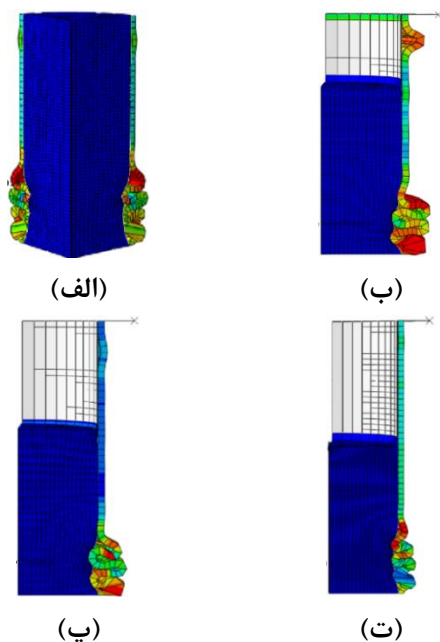


(پ)

شکل ۷- مراحل فروریزش نمونه‌ها: الف) C-F، ب) C-F-20، پ) C-F-40

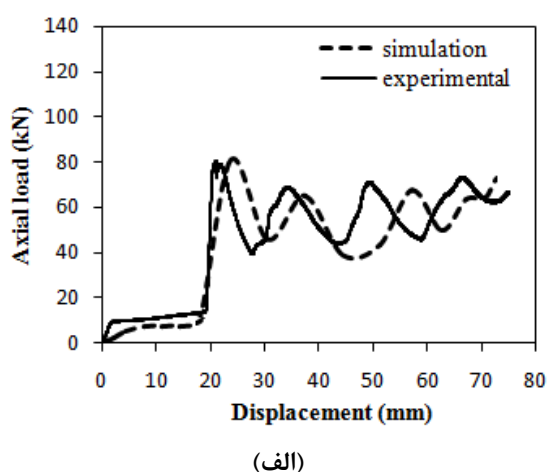
۵- شبیه‌سازی عددی

در این مطالعه، لهیدگی محوری لوله‌های استوانه‌ای پر شده از فوم پلی‌اورتان با استفاده از نرم افزار آباکوس ۱۱-۶ شبیه‌سازی شده‌اند. ابتدا، لوله آلومینیومی و فوم پلی‌اورتان با المانهای پیوسته متقارن چهار گره‌ای مش زده شدند، که برای تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ مناسب هستند [۱۶]. بعد از همگرایی حل اندازه بهینه مش برای لوله پر شده از فوم با آغازگر بدست آمد. شکل (۸) نیروی پیک اولیه برحسب اندازه مش را نشان می‌دهد. با توجه به شکل واضح است که اندازه مش ۱/۵ میلی‌متر نتایج قابل قبولی را می‌دهد. برای مدل کردن آغازگر و صفحه پایینی از جسم صلب تحلیلی استفاده شده است. صفحه پایینی در همه جهات مقید است، در حالی که آغازگر با جابجایی در امتداد محور با سرعت 10 mm/min توصیف می‌شود.



شکل ۱۰- شبیه‌سازی عددی نمونه‌ها بعد از لهیدگی محوری:
الف- C-F، ب- C-F-20، پ- C-F-30، ت- C-F-40

در شکل (۱۱)، نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های با آغازگر نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، بین شبیه‌سازی عددی و تجربی مطابقت خوبی وجود دارد. بنابراین، شبیه‌سازی عددی می‌تواند پارامترهای ضربه‌پذیری لوله‌های استوانه‌ای با آغازگر را به خوبی برآورد کند. علاوه بر این، به منظور درک اثر آغازگر در چگونگی فرآیند نمودار نیرو-جابجایی، نمونه بدون آغازگر (C-F) تحت فشار محوری قرار داده شده که نمودار آن در شکل (۱۲) ملاحظه می‌شود.



جدول ۳- خصوصیات فوم قابل فروریزش با کار سختی ایزوتروپیک

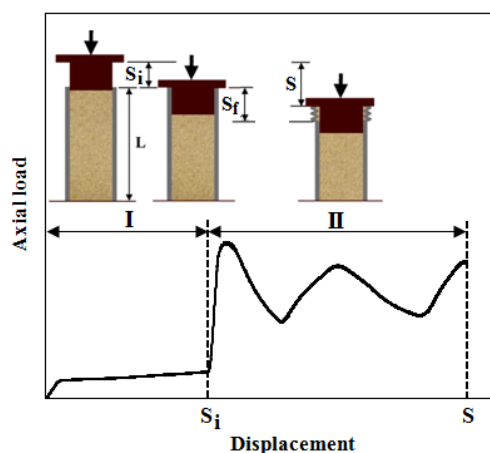
چگالی (kg/m^3)	خصوصیات الاستیک		خصوصیات پلاستیک	
	E (MPa)	ν	k	ν_p
۲۶۶	۸۲	۰	۰/۷	۰

برای تعریف تماس بین آغازگر صلب قابل حرکت و صفحه صلب مقید شده با لوله از تماس "سطح به سطح" استفاده می‌شود. از آنجا که در زمان فروریزش نمونه‌ها، المان‌های دیواره لوله با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند از خود تماسی استفاده شده است تا از نفوذ المان‌ها به داخل یکدیگر جلوگیری شود. از آنجایی که لوله‌های استوانه‌ای پر شده از فوم شامل دو نوع مواد با سختی‌های مختلف می‌باشند (لوله آلومینیوم و فوم پلی‌اورتان) و لوله بین آغازگر و صفحه صلب قرار دارد، وضعیت تماس به طور کامل شبیه‌سازی شده است. اصطکاک یکی از مهمترین مشخصه‌هایی است که در فرآیند شبیه‌سازی باید مشخص گردد. در شبیه‌سازی برای اعمال اصطکاک بین اجزا مدل از فرمولاسیون اصطکاک پنالتی استفاده می‌شود که مقدار اصطکاک بین نمونه و صفحات صلب برابر ۰/۱۵ و در خود تماسی حین لهیدگی و تماس آغازگر با دیواره لوله برابر ۰/۳۵ در نظر گرفته شد.

شکل (۱۰)، شبیه‌سازی عددی نمونه‌ها برای بدون آغازگر و با استفاده از آغازگر با طول‌های مختلف که مشخصات هندسی آنها در جدول (۲) داده شده است را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه نمونه‌ها دارای فروریزشی متقارن بوده، لذا، به منظور تسریع در حل، نمونه‌ها به صورت تقارن محوری و در گام دینامیک صریح، به ترتیب مدل‌سازی و تحلیل می‌شوند.

۶- محاسبه جذب انرژی ویژه برای لوله‌های با آغازگر

مراحل فروریزش و چگونگی روند تشکیل چین‌ها در نمودار نیرو-جابجایی برای یک لوله پر شده از فوم پلی‌اورتان با آغازگر در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۳- مراحل فروریزش لوله پر شده از فوم با آغازگر

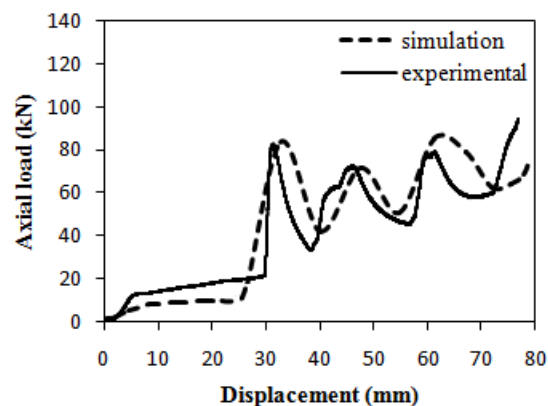
با توجه به تعریف جذب انرژی ویژه، انرژی جذب شده در لوله استوانه‌ای پر شده از فوم به صورت زیر بدست می‌آید:

$$E_{t,f} = E_t + E_f + E_{int} \quad (5)$$

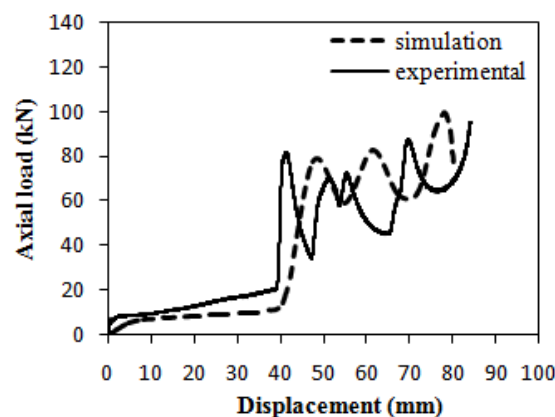
در رابطه (۵)، E_t ، E_f و E_{int} به ترتیب میزان انرژی جذب شده توسط لوله، فوم و اثر تقابل دیواره لوله با فوم می‌باشد. همچنین جرم قسمت له شده ضربه‌گیر عبارت است از:

$$m_{t,f} = m_t + m_f = \rho_t A_t S_f + \rho_f A_f \frac{S}{\epsilon_d} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، m_f و m_t به ترتیب جرم لوله و جرم فوم له شده هستند. بنابراین، ρ_t ، A_t و S_f به ترتیب چگالی لوله، سطح مقطع لوله و میزان لهیدگی لوله، ρ_f ، A_f و S به ترتیب چگالی فوم، سطح مقطع فوم و میزان جابجایی کل لوله و فوم از ابتدای آغازگر و ϵ_d کرنش چگالش فوم می‌باشد و از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۷].

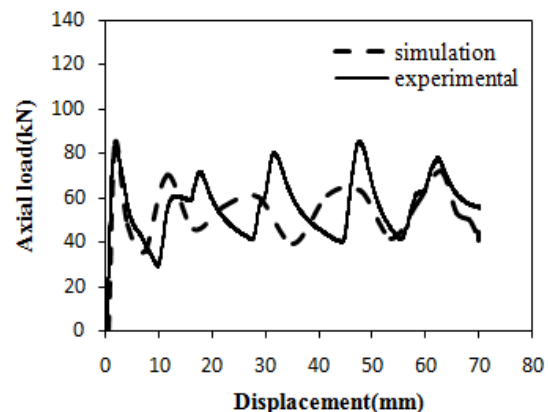


(ب)



(پ)

شکل ۱۱- نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های با آغازگر: الف- C-F-20، ب- C-F-30 و پ- C-F-40



شکل ۱۲- نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه بدون آغازگر

در نمودار نیرو-جابجایی شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، مطابقت خوبی بین شبیه‌سازی عددی و تست تجربی دیده می‌شود.

۷-۲- جذب انرژی ویژه

جدول (۴) مقایسه نتایج بین تست تجربی و شبیه‌سازی عددی برای جذب انرژی ویژه را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، جذب انرژی ویژه در لوله‌هایی که از آغازگر استفاده شده بیشتر از لوله بدون آغازگر است و این نتیجه بیانگر بهینه شدن جذب انرژی ویژه در هنگام استفاده از آغازگر می‌باشد. بنابراین آغازگر علاوه بر ایجاد تاخیر در نیروی اوج اولیه منجر به افزایش جذب انرژی ویژه می‌شود.

۷-۳- سایر پارامترهای ضربه پذیر

جدول (۵) مقایسه نتایج بین تست تجربی و شبیه‌سازی عددی برای نیروی متوسط لهیدگی، ماکزیمم نیروی لهیدگی و راندمان نیروی لهیدگی می‌باشند. همانطور که دیده می‌شود، با افزایش طول آغازگر نیروی متوسط لهیدگی کاهش می‌یابد، که علت آن به خاطر کاهش مساحت سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی است. از طرفی با توجه به جدول (۵) دیده می‌شود که نیروی ماکزیمم لهیدگی در نمونه‌های بدون آغازگر و با آغازگر در محدوده نسبتاً ثابتی بوده که متوسط ماکزیمم نیروی لهیدگی در همه نمونه‌ها $11/15 \text{ kN}$ می‌باشد. لذا با توجه به تعریف راندمان نیروی لهیدگی، این امر منجر به کاهش آن شده است. از آنجا که استفاده از آغازگر یک تاخیری به اندازه طول آن در لهیدگی لوله‌های پر شده از فوم ایجاد می‌کند، لذا این امر منجر به کاهش میزان جذب انرژی در نمونه‌های با آغازگر نسبت به نمونه‌های بدون آغازگر شده است. شکل (۱۴)، میزان درصد کاهش انرژی برای طول‌های مختلف آغازگر را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، برای نمونه C-F-40، ۲۴٪ انرژی نسبت به نمونه بدون آغازگر کاهش یافته است. بنابراین، نتیجه می‌شود که با انتخاب صحیح طول آغازگر می‌توان کمترین کاهش در میزان جذب انرژی را ایجاد نمود.

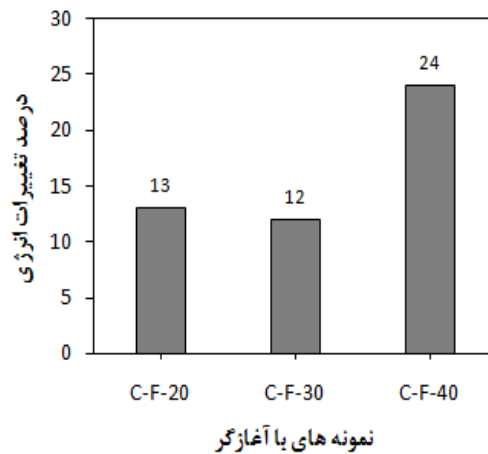
$$\varepsilon_d \approx 1 - 1.4 \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right) \quad (7)$$

۷- بحث و بررسی

در این قسمت به بررسی منحنی نیرو-جابجایی و پارامترهای ضربه‌پذیر برای لوله‌های استوانه‌ای پر شده از فوم با آغازگر می‌پردازیم.

۷-۱- منحنی نیرو-جابجایی

همانطور که در شکل‌های (۱۱) و (۱۳) دیده می‌شوند، نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌هایی که از آغازگر استفاده شده است شامل دو مرحله می‌باشد: مرحله اول حرکت آغازگر به داخل لوله به اندازه طول آن که منجر به فشردگی فوم می‌شود. مرحله دوم مربوط به لهیدگی لوله و فوم به طور همزمان است. فرآیند تغییر نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های با آغازگر به این صورت است که ابتدا فوم توسط آغازگر وارد ناحیه الاستیک و سپس وارد ناحیه تنش ثابت می‌شود. زمانی که آغازگر به طور کامل وارد پوسته آلومینیومی شد، لوله آلومینیومی با افزایش خطی نیرو وارد ناحیه الاستیک شده، و چین‌ها به ازای هر بیشینه بار تشکیل می‌شوند. در ماکزیمم نیروی لهیدگی، ماده در انتهای باریک لوله تسلیم شده و با ایجاد اولین لولای پلاستیک نیرو به شدت کاهش می‌یابد. کاهش نیرو تا زمانی که یک چین به صورت کامل شکل بگیرد ادامه پیدا می‌کند. سپس لولای بعدی شکل گرفته و مجدداً کاهش و افزایش نیرو در منحنی دیده می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که هر یک از قله‌های ایجاد شده در منحنی نیرو-جابجایی معرف تشکیل یک چین هستند. لذا، از مزیت اصلی استفاده از آغازگر در لوله‌های پر شده از فوم، ایجاد تاخیر به میزان طول آغازگر در رسیدن لوله به ناحیه الاستیک است. بنابراین استفاده از آغازگر کمک شایانی در به حداقل رساندن کماتش ناخواسته اولری شده و از شدت ضربه ناگهانی به سازه اصلی جلوگیری می‌کند.



شکل ۱۴- میزان درصد کاهش جذب انرژی نمونه‌های با آغازگر نسبت به نمونه بدون آغازگر

جدول ۴- مقایسه نتایج بین شبیه‌سازی عددی و تجربی برای جذب انرژی ویژه

نمونه	شبیه‌سازی عددی			تجربی			خطا (%)
	$m_{i,f}$ (g)	E_{abs} (kJ)	SEA (kJ / kg)	$m_{i,f}$ (g)	E_{abs} (kJ)	SEA (kJ / kg)	
C-F	۹۶	۳/۷۶۵	۳۹/۲۲	۹۶	۳/۹۵۱	۴۱/۱	۴
C-F-20	۷۹	۳/۳۲۰	۴۲/۰۳	۷۹	۳/۴۵۰	۴۳/۶	۳/۷
C-F-30	۷۹/۲	۳/۶۲۲	۴۵/۷۳	۷۹/۲	۳/۵۴۷	۴۴/۷	۲/۲
C-F-40	۷۲/۶	۲/۹۸۲	۴۱/۰۷	۷۲/۶	۲/۹۹۱	۴۱/۳	۰/۵

جدول ۵- مقایسه نتایج بین شبیه‌سازی عددی و تجربی برای ماکزیمم نیروی لهیدگی، متوسط نیروی لهیدگی و راندمان نیروی لهیدگی

نمونه	شبیه‌سازی عددی			تجربی			متوسط خطا (%)
	P_{max} (kN)	P_m (kN)	CFE (%)	P_{max} (kN)	P_m (kN)	CFE (%)	
C-F	۸۴/۴۷	۵۳/۷۹	۶۳	۸۰/۳۶	۵۶/۴۱	۷۰	۶/۵
C-F-20	۸۰/۶۸	۴۵/۱۹	۵۶	۷۹/۹۹	۴۵/۹۹	۵۷	۱/۱
C-F-30	۸۳/۳۲	۴۵/۲۷	۵۴	۸۲/۵۹	۴۴/۳۳	۵۴	۰/۶
C-F-40	۸۲/۵۲	۳۷/۲۸	۴۵	۸۱/۶۹	۳۷/۳۸	۴۶	۱

۸- نتیجه گیری

نیروی لهیدگی، نیروی متوسط لهیدگی و ماکزیمم نیروی لهیدگی بدست آمد. نتایج مهم حاصل از این تحقیق به صورت زیر می‌باشند:

- میزان جذب انرژی ویژه در لوله استوانه‌ای پر شده از فوم پلی‌اورتان با آغازگر به میزان ۱۵٪ نسبت به حالت بدون آغازگر افزایش یافت.

در این مقاله، ضربه‌پذیری لوله‌های استوانه‌ای پر شده از فوم پلی‌اورتان با استفاده از آغازگر به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی با نرم افزار آباکوس مطالعه شد. به منظور دستیابی به این هدف، بررسی جامع روی لوله‌های استوانه‌ای آلیاژ آلومینیوم تحت بارگذاری شبه-استاتیک انجام گرفت و نحوه فروریزش، میزان جذب انرژی، راندمان

- ماکزیمم نیروی لهیدگی با وجود آغازگر در لوله‌های استوانه‌ای پر شده از فوم با تاخیری به اندازه طول آغازگر ایجاد شد. در واقع ابتدا فوم با توجه به طول آغازگر له شد و سپس جداره لوله شروع به فروریزش کرد. بنابراین، مزیت اصلی استفاده از آغازگر در لوله‌های پر شده از فوم، ایجاد تاخیر به میزان طول آغازگر در رسیدن لوله به ناحیه الاستیک است. لذا، استفاده از آغازگر کمک شایانی در به حداقل رساندن کماتش ناخواسته اولری یا گلوبال شده و از شدت ضربه ناگهانی به سازه اصلی جلوگیری می‌کند.
- ماکزیمم نیروی لهیدگی در نمونه‌های با آغازگر در مقایسه با نمونه بدون آغازگر کاهش یافت و در محدوده نسبتاً ثابتی باقی ماند.
- با توجه به تطابق قابل قبول در نتایج بین شبیه‌سازی عددی و تست تجربی می‌توان گفت که، شبیه‌سازی عددی می‌تواند پارامترهای ضربه‌پذیری لوله‌های استوانه‌ای پر شده از فوم با آغازگر را به خوبی برآورد کند.

۹- مراجع

- [1] Thornton, P. (1980). "Energy absorption by foam filled structures". 0148-7191.
- [2] Lampinen, B. (1982). "Effectiveness of polyurethane foam in energy absorbing structures".
- [3] Reid, S., Reddy, T., Gray, M. (1986). "Static and dynamic axial crushing of foam-filled sheet metal tubes". *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 28, pp. 295-322.
- [4] Reddy, T., Wall, R. (1988). "Axial compression of foam-filled thin-walled circular tubes". *International Journal of Impact Engineering*, vol. 7, pp. 151-166.
- [5] Abramowicz, W., Wierzbicki, T. (1988). "Axial crushing of foam-filled columns". *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 30, pp. 263-271.
- [6] Guillow, S., Lu, G., Grzebieta, R. (2001). "Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes". *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 43, pp. 2103-2123.
- [7] Langseth, M., Hopperstad, O., Hanssen, A. (1998). "Crash behaviour of thin-walled aluminium members". *Thin-walled structures*, vol. 32, pp. 127-150.
- [8] Hosseini-pour, S., Daneshi, G. (2003). "Energy absorption and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression". *Thin-Walled Structures*, vol. 41, pp. 31-46.
- [9] Zhang, X., Su, H., Yu, T. (2009). "Energy absorption of an axially crushed square tube with a buckling initiator". *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, pp. 402-417.
- [10] Zhang, X., Tian, Q., Yu, T. (2009). "Axial crushing of circular tubes with buckling initiators". *Thin-walled structures*, vol. 47, pp. 788-797.
- [11] Ghamarian A., Tahaye Abadi, M. (2011). "Axial crushing analysis of end-capped circular tubes". *Thin-Walled Structures*, vol. 49, pp. 743-752.
- [12] Yan, W., Durif, E., Yamada, Y., Wen, C. (2007). "Crushing simulation of foam-filled aluminium tubes". *Materials transactions*, vol. 48, pp. 1901-1906.
- [13] Mirfendereski, L., Salimi, M., Ziaei-Rad, S. (2008). "Parametric study and numerical analysis of empty and foam-filled thin-walled tubes under static and dynamic loadings". *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 50, pp. 1042-1057.
- [14] Zarei, H., Ghamarian, A. (2014) "Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of Empty and Foam-Filled Thin-Walled Tubes with Shallow Spherical Caps". *Experimental Mechanics*, vol. 54, pp. 115-126.
- [15] Ghani A. R., Hassan, M. (2013) " Axial crush behaviour of square column with external tapered plunger ". *Journal of engineering sciences*, vol. 41, pp. 1498-1517.
- [16] Aljawi, A. (2002). "Numerical simulation of axial crushing of circular tubes". *JKAU: Engineering Science*, vol. 14, pp. 3-17.
- [17] Avalle, M., Belingardi, G., Ibba, A. (2007). "Mechanical models of cellular solids: parameters identification from experimental tests". *International Journal of Impact Engineering*, vol. 34, pp. 3-27.