

جذب انرژی در ضربه گیرهای شیاردار پر شده از فوم پلی اورتان با استفاده از آغازگر

محسن عبدوس^۱

محمدجواد رضوانی^۲

m.rezvani@semnaniau.ac.ir

چکیده

در این مقاله، اثر آغازگر در پاسخ لهیدگی ضربه گیرهای شیاردار خارجی پر شده از فوم پلی اورتان بررسی می شود. به این منظور، یک آغازگر در بالای لوله استوانه‌ای شیاردار خارجی پر شده از فوم قرار می گیرد تا از اعمال نیروی ناگهانی به قسمت اصلی سازه جلوگیری کند. در این ایده جدید، برای مطالعه مشخصات ضربه پذیری، تعدادی شبیه سازی عددی در نرم افزار آباکوس به صورت شبه استاتیکی انجام شده و با نتایج تجربی مقایسه می شود. همچنین، منحنی های نیرو-جابجایی و مکانیزم تغییر شکل ضربه گیر با تغییر تعداد شیارها توصیف می شود. نتایج نشان می دهد که وجود آغازگر باعث کاهش شدت ضربه به سازه اصلی و سرنشینان می شود.

واژه های کلیدی: جذب انرژی، شیارهای خارجی، آغازگر، فوم پلی اورتان.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

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

مقدمه

امروزه، لوله‌های جدار نازک پر شده از فوم جهت بهبود جذب انرژی ویژه و تبدیل انرژی جنبشی به کار پلاستیک به کار گرفته می‌شوند. بنابراین 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. مطالعه‌ی 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 پلی‌اورتان دانسیته پایین را در لوله‌های جدار نازک با ابعاد $D/t = 600$ تحت شرایط شبه‌استاتیکی و دینامیکی بررسی کردند. آنها نشان دادند که پایداری لهیدگی در اثر وجود فوم نه تنها به دلیل پر شدن لوله با فوم بلکه به دلیل تغییر مد کمناش از حالت الماسی به آکاردئونی و به طور کلی ایجاد کمناش پیش‌رونده، بیشتر می‌شود [۳، 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 به‌سزائی داشته باشد [۷].

حسینی‌پور 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 کاهش نیروی اوج اولیه از جمله مهم‌ترین معیارها در طراحی جاذب‌های انرژی است. بنابراین، 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 اندازه‌ی بهینه باشد و اگر این طول بیشتر از حالت بحرانی باشد، دیگر آغازگر اثری بر نیروی اوج اولیه ندارد. از طرفی تعداد تسمه‌های متصل‌کننده‌ی آغازگر به لوله نیز، در مد کمناش 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 بسزایی دارد [۱۲].

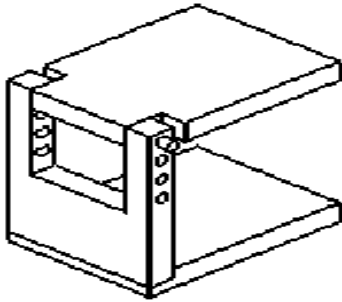
سلیمی و همکارانش در سال ۲۰۰۸ با بررسی لوله‌های باریک شونده پر شده از فوم با مقطع مستطیلی به صورت شبیه‌سازی عددی و تست آزمایشگاهی نشان دادند که با افزایش چگالی فوم می‌توان جذب انرژی را بالا برد [۱۳].

متدولوژی و روش تحقیق در این مقاله، شبیه‌سازی عددی در نرم افزار آباکوس به منظور بررسی اثر فوم پلی‌اورتان، تعداد شیارهای خارجی و وجود آغازگر بر روی جذب انرژی و نیروی اوج اولیه است.

۱- خصوصیات مواد

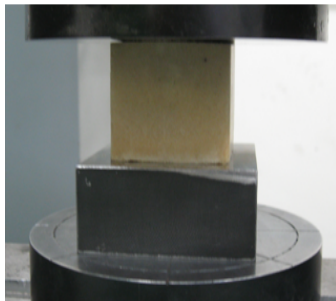
۱-۱ آلومینیوم

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 کارسختی غیرخطی در منطقه پلاستیک دنبال می‌شود، تعریف شده است.



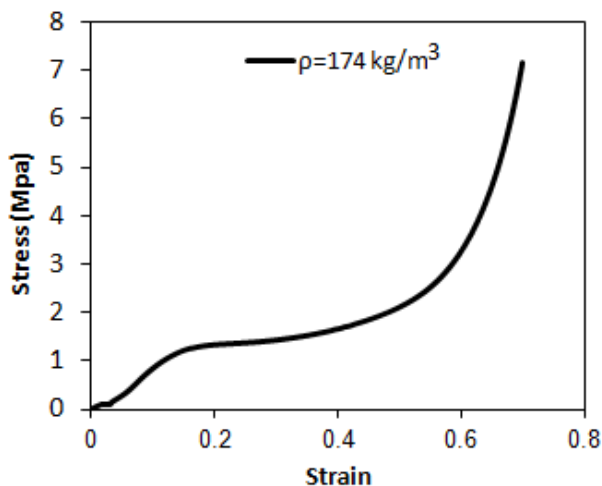
شکل ۲: نمایی از فیکسچر به منظور نگهداری ضربه گیرهای پر شده از فوم

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.



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 به دست می آید.



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

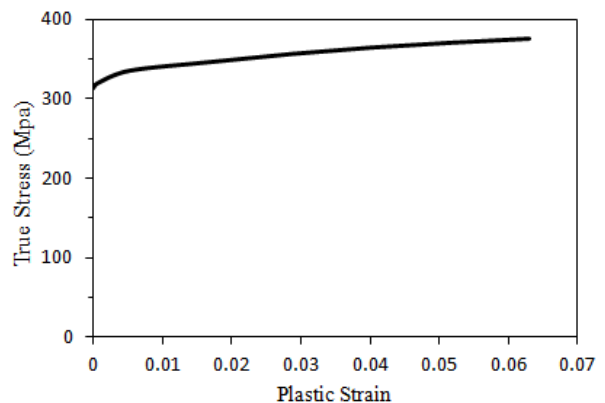
همان طور که دیده می شود، این منحنی دارای سه منطقه است: منطقه الاستیک خطی با مدول الاستیک $E = 1/5\text{ Mpa}$ ، منطقه مسطح با تنش تسلیم $\sigma_{pl} = 1/24\text{ Mpa}$ و منطقه چگالش.

بنابراین، منحنی تنش-کرنش مطابق استاندارد تست کشش ASTM B557M به دست می آید.

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 نرم افزار آباکوس گنجانیده می شود رسم شده است. بنابراین، نقاط تنش-کرنش واقعی در نرم افزار آباکوس طبق شکل ۱ تقریب زده می شوند.

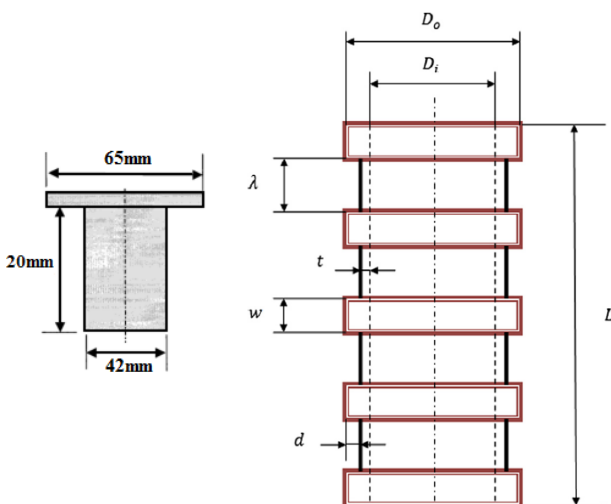


شکل ۱: تنش واقعی برحسب کرنش پلاستیک برای آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 از تست تجربی

۲-۱ 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. 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.

ضربه‌گیر شیاردار خارجی از آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 ساخته شدند. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، شیارهای خارجی با فاصله‌های مساوی با استفاده از دستگاه CNC ایجاد می‌شوند. با توجه به شکل ۵ D_i قطر داخلی، D_o قطر خارجی، t ضخامت جدار لوله، W عرض رینگ، d عمق شیار، λ فاصله بین شیارها و L طول لوله است. جزئیات ابعاد نمونه‌ها در جدول ۲ لیست شده‌اند هر نمونه دارای یک کد می‌باشد. هر کدی با دو حرف لاتین و یک عدد مشخص شده‌اند که اولین حرف مخفف سیلندر، دومین حرف مخفف رینگ و عدد مورد نظر نشان‌دهنده‌ی تعداد شیارها است. در این پژوهش کلیه پارامترهای هندسی لوله ثابت در نظر گرفته شده و فقط فاصله شیارها تغییر می‌کند.



شکل ۵: نحوه قرارگیری آغازگر بر روی لوله

جدول ۲: مشخصات ابعاد نمونه‌های تست

نمونه	D_i	D_o	L	t	W	d	λ
C-3R	۲۱	۲۵	۱۱۰	۱/۵	۷	۲/۵	۲۷/۳۳
C-4R	۲۱	۲۵	۱۱۰	۱/۵	۷	۲/۵	۱۸/۷۵
C-5R	۲۱	۲۵	۱۱۰	۱/۵	۷	۲/۵	۱۳/۶

کلیه ابعاد برحسب میلیمتر می‌باشند

شکل نهایی نمونه‌ها بعد از تست در شکل ۶ نشان داده شده است.

۲- معیارهای ارزیابی جاذب‌های انرژی

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

۱-۲ 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.

۲-۲ 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.

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

۳-۲ 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.

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

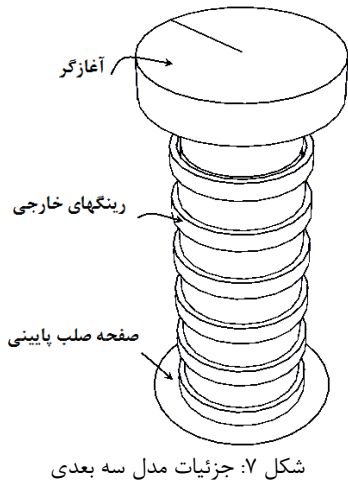
۴-۲ جذب انرژی ویژه

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

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

۳- تست تجربی

می‌شود. بنابراین هیچ اثر اینرسی در شکل‌گیری مکانیزم رخ نمی‌دهد و از اثرات دینامیکی نیز صرف‌نظر شده است. شکل ۷ جزئیات مدل سه بعدی را نشان می‌دهد.

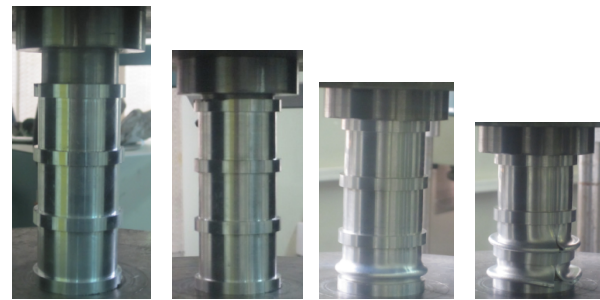


شکل ۷: جزئیات مدل سه بعدی

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.

جدول ۳: خصوصیات فوم قابل فروریزش با کار سختی ایزوتروپیک

برای تعریف تماس بین آغازگر صلب قابل حرکت و صفحه صلب مقید شده با ضربه‌گیر 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. با توجه به اینکه ضربه‌گیرهای 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 0.15 و در خود تماسی حین لهیدگی برابر 0.35 در نظر گرفته شد [۱۴، ۱۳، ۱۱].

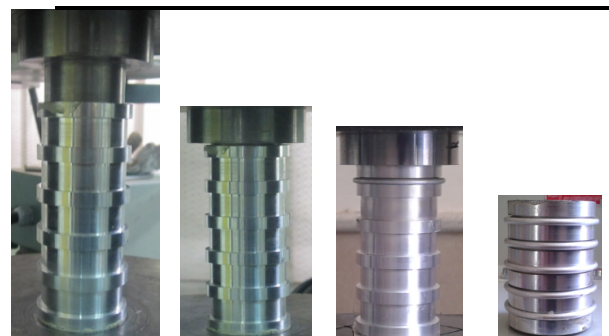


(الف)



(ب)

چگالی (kg/m^3)	خصوصیات الاستیک		خصوصیات پلاستیک	
	$E (Mpa)$	ν	k	ν_p
۱۷۴	۸/۵	۰	۱	۰



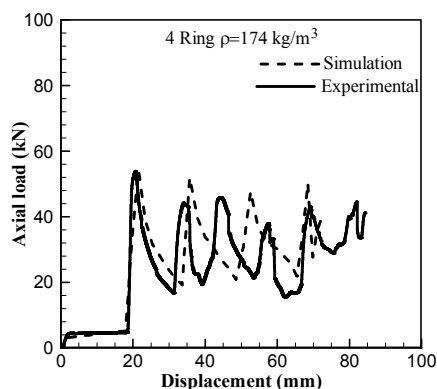
(پ)

شکل ۶: مراحل مختلف فروریزش نمونه‌ها: (الف) ۳ شیار، (ب) ۴ شیار و (پ) ۵ شیار

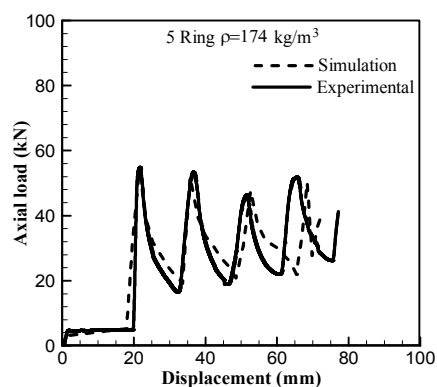
۴- شبیه‌سازی عددی

در این مطالعه، ضربه‌گیر استوانه‌ای شیاردار خارجی و فوم پلی‌اورتان با المان‌های چهارگوش با تغییر شکل غیر خطی مدل شدند و به صورت دینامیک صریح تحلیل می‌شوند. برای مدل کردن آغازگر و صفحه پایینی از جسم صلب 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

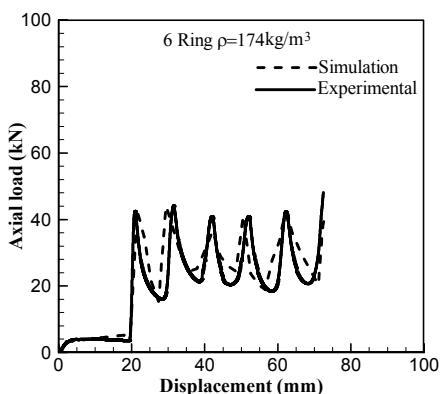
شکل ۸، شبیه‌سازی عددی نمونه‌ها با استفاده از آغازگر که مشخصات هندسی آنها در جدول ۲ داده شده است را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

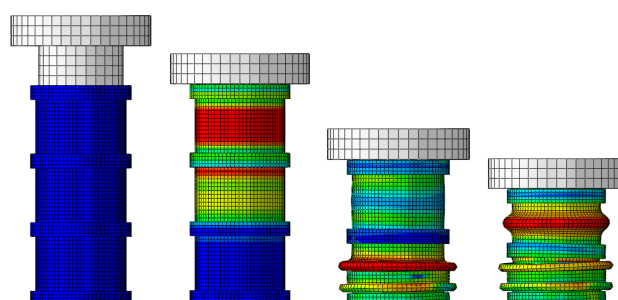


(پ)

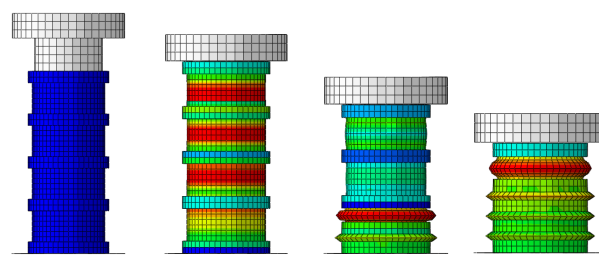
شکل ۹: مقایسه تجربی و شبیه‌سازی عددی منحنی نیرو-جابجایی برای نمونه‌های: (الف) ۳ شیار، (ب) ۵ رینگ و (پ) ۶ رینگ با چگالی فوم

۵- بحث و بررسی

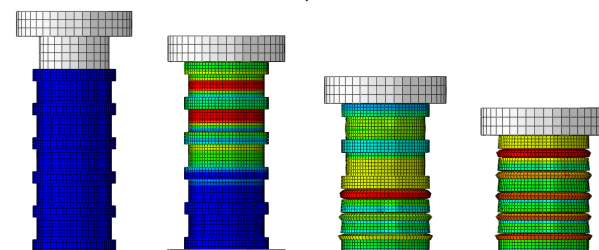
شکل ۶، اثر تعداد شیارها در چگونگی فروریزش ضربه‌گیرها نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش تعداد شیارها از ۳ شیار به ۴ شیار، علاوه بر ایجاد تقارن در شکل فروریزش و یک‌نواختی منحنی نیرو-جابجایی، نیروی



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۸: شبیه‌سازی عددی ضربه‌گیرهای پر شده از فوم پلی اورتان با استفاده از آغازگر: (الف) ۳ شیار، (ب) ۴ شیار و (پ) ۵ شیار

شکل ۹ مقایسه‌ای از منحنی نیرو-جابجایی حاصل از شبیه‌سازی عددی و تجربی برای نمونه‌های ۳، ۴ و ۵ شیار را نشان می‌دهد. بدیهی است که ارتباط خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی دیده می‌شود. بنابراین، شبیه‌سازی عددی می‌تواند پارامترهای ضربه‌پذیری لوله‌های استوانه‌ای شیاردار خارجی پر شده از فوم با آغازگر را به خوبی برآورد کند.

اولری داشته و از شدت ضربه ناگهانی به سازه اصلی جلوگیری می‌کند.

- انتخاب صحیح در تعداد شیارها به منظور افزایش جذب انرژی و ایجاد تغییر شکلی متقارن
- با توجه به تطابق قابل قبول در نتایج بین شبیه‌سازی عددی و تست تجربی می‌توان گفت که شبیه‌سازی عددی می‌تواند پارامترهای ضربه‌پذیری ضربه‌گیرهای استوانه‌ای شیاردار پرشده از فوم با آغازگر را به خوبی برآورد کند.

مراجع

- [1] P. Thornton, "Energy absorption by foam filled structures," 0148-7191, 1980.
- [2] B. Lampinen, "Effectiveness of polyurethane foam in energy absorbing structures," 1982.
- [3] S. Reid, T. Reddy, and M. Gray, "Static and dynamic axial crushing of foam-filled sheet metal tubes," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 28, pp. 295-322, 1986.
- [4] T. Reddy and R. Wall, "Axial compression of foam-filled thin-walled circular tubes," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 7, pp. 151-166, 1988.
- [5] W. Abramowicz and T. Wierzbicki, "Axial crushing of foam-filled columns," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 30, pp. 263-271, 1988.
- [6] S. Guillow, G. Lu, and R. Grzebieta, "Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 43, pp. 2103-2123, 2001.
- [7] M. Langseth, O. Hopperstad, and A. Hanssen, "Crash behaviour of thin-walled aluminium members," *Thin-walled structures*, vol. 32, pp. 127-150, 1998.
- [8] S. Hosseinipour and G. Daneshi, "Energy absorption and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression," *Thin-Walled Structures*, vol. 41, pp. 31-46, 2003.
- [9] X. Zhang, H. Su, and T. Yu, "Energy absorption of an axially crushed square tube with a buckling initiator," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, pp. 402-417, 2009.
- [10] X. Zhang, Q. Tian, and T. Yu, "Axial crushing of circular tubes with buckling initiators," *Thin-walled structures*, vol. 47, pp. 788-797, 2009.
- [11] A. Ghamarian and M. Tahaye Abadi, "Axial crushing analysis of end-capped circular tubes," *Thin-Walled Structures*, vol. 49, pp. 743-752, 2011.
- [12] W. Yan, E. Durif, Y. Yamada, and C. e. Wen, "Crushing simulation of foam-filled aluminium tubes," *Materials transactions*, vol. 48, pp. 1901-1906, 2007.
- [13] L. Mirfendereski, M. Salimi, and S. Ziaei-Rad, "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, 2008.
- [14] S. Y. Maaita, "Effects of constrained foam deformation in aluminium tubes under quasi-static and dynamic axial compression loading," 2004.

ماکزیمم لهیدگی و سطح زیر نمودار افزایش می‌کند. سپس لولای دیگر در شیار بعدی شکل گرفته و مجددا 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 است. البته در تعداد شیارهای کم یک‌سری ناپایداری در منحنی دیده می‌شود که برای نمونه‌های با تعداد شیار بالا (نمونه‌های ۴۵ شیار و ۵ شیار) به صورت پایدار بوده و فروریزی متقارن خواهند داشت. همچنین منحنی نیرو-جابجایی به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که این منحنی برای نمونه‌هایی که دارای فروریزش متقارن هستند، نتایج دقیق‌تری را با تست تجربی ایجاد می‌کنند. یافته و در نتیجه جذب انرژی زیاد می‌شود. اما با افزایش بیشتر شیارها (۵ شیار)، به دلیل کم شدن فاصله شیارها و کاهش کرنش سختی، منجر به کاهش سطح زیر نمودار شده و در نتیجه انرژی جذب شده کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، منحنی نیرو-جابجایی شامل دو مرحله است. مرحله اول: مربوط به جابجایی آغازگر و لهیدگی فوم. مرحله دوم: مربوط به لهیدگی ضربه‌گیر و فوم به طور هم‌زمان. در ماکزیمم نیروی لهیدگی، ماده در انتهای لوله تسلیم شده و با ایجاد اولین لولای پلاستیک در شیار نیرو به شدت کاهش می‌یابد. کاهش نیرو تا زمانی که یک چین به صورت کامل شکل بگیرد ادامه پیدا

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پاسخ جذب انرژی و لهیدگی ضربه‌گیرهای استوانه‌ای شیاردار خارجی پرشده از فوم پلی‌اورتان مجهز به آغازگر به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن به شرح زیر است:

- ماکزیمم نیروی لهیدگی با وجود آغازگر در ضربه‌گیرهای استوانه‌ای شیاردار پرشده 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 این نوع از ضربه‌گیرها ایجاد تاخیر به میزان طول آغازگر در رسیدن لوله به ناحیه الاستیک است. بنابراین، استفاده از آغازگر کمک شایانی در به حداقل رساندن کمانش ناخواسته