

بررسی تجربی و شبیه سازی عددی جذب انرژی در لوله های مخروط شیاردار تحت بارگذاری

مورب

احمد ریاحینی^۱، محمد جواد رضوانی^{۲*}

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

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

* سمنان، صندوق پستی: ۳۵۱۴۱-۱۷۹، m.rezvani@semnaniau.ac.ir

چکیده

در این مقاله، جذب انرژی در لوله های مخروط شیاردار خارجی پر شده از فوم پلی اورتان تحت بارگذاری مورب بررسی می شود. 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 جذب انرژی لوله های مخروط پر شده از فوم بیشتر از لوله های خالی است و مطابقت خوبی بین نتایج شبیه سازی عددی و تجربی وجود دارد.

کلیدواژگان

جذب انرژی، شیارهای خارجی، بارگذاری مورب، فوم پلی اورتان

۱- مقدمه

امروزه، لوله های جدار نازک پر شده از فوم جهت بهبود جذب انرژی ویژه و تبدیل انرژی جنبشی به کار پلاستیک به کار گرفته می شوند. لذا تحقیقات گسترده ای بر روی لوله های آلومینیومی و فولادی پر شده از فوم انجام شده است [۱-۵].
نگال و همکارانش با شبیه سازی، لهیدگی محوری لوله های جدار نازک مربعی باریک شونده را بررسی کردند و نتایج به دست آمده را با نتایج لوله های جدار نازک مربعی مستقیم مورد مقایسه قرار دادند. آنها دریافتند که نیروی آغاز لهیدگی برای لوله های باریک شونده بیشتر می باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که تاثیر ضخامت دیواره روی مقدار انرژی جذب شده و نیروی متوسط لهیدگی، نسبت به [۱] زاویه باریک شدن لوله، بیشتر است.

ژانگ با ایجاد الگویی روی دیواره لوله های مربعی جدار نازک جذب انرژی را توسط نرم افزار LS-DAYNA شبیه سازی نمود [۶].
حسینی پور و همکارانشان استفاده از شیارهای حلقوی متناوب را به عنوان یکی از راه های جدار نازک معرفی های کنترل لهیدگی لوله کردند. یکی از نتایج مهم این پژوهش این است که با افزایش فاصله ها لهیدگی از حالت آکاردئونی و کاهش تعداد شیارها در نمونه شیار [۷] خارج و به حالت الماسی جابه جا می شود.

مختارنژاد و همکارانشان به بررسی اثر تغییر عمق و طول شیارها در لوله سازی و آزمایشگاهی های شیاردار پرداختند. آنها در نتایج شبیه به این نتیجه رسیدند که برای دست یافتن به فروریزش مناسب طول [۸] شیار یکی از معیارهای مهم در طراحی جذب انرژی است.
لی و همکارانش روی لوله های جدار نازک معمولی و دو جداره از تحقیقات خود را انجام دادند و اثر بار 6063 T6 جنس آلایز آلومینیوم های جدار نازک تک مایل را بررسی کردند. آنها نشان دادند که در لوله لایه پر شده با فوم و دو لایه با فوم با افزایش زاویه بار، جذب انرژی

تغییری ندارد ولی در اثر بار نوسانی با افزایش زاویه بارگذاری جذب [۹] انرژی به تدریج کاهش می یابد.

احمد و همکارانش به بررسی فروریزش و میزان جذب انرژی مخروط جدار نازک تحت بار مایل پرداختند. آنها اثر فوم را بر چگونگی فروریزش و جذب انرژی مورد مطالعه قرار دادند [۱۰].
سلیمی و همکارانش با بررسی لوله های باریک شونده پر شده از فوم با مقطع مستطیلی به صورت شبیه سازی عددی و تست آزمایشگاهی نشان دادند که با افزایش چگالی فوم می توان جذب انرژی را بالا برد [۱۱].

متدولوژی و روش تحقیق در این مقاله، شبیه سازی عددی در نرم افزار آباکوس به منظور بررسی اثر فوم پلی اورتان، تعداد شیارهای خارجی و تغییر زاویه بارگذاری بر روی جذب انرژی و نیروی اوج اولیه باشد. لوله های مخروط شیاردار می در لوله

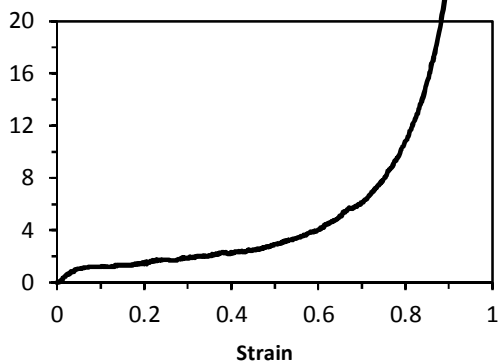
۲- خصوصیات مواد

۱-۲- فولاد

جنس لوله مخروط از نوع فولاد St 37 است که خصوصیات مکانیکی آن مطابق جدول (۱) می باشد.

جدول ۱- خصوصیات مکانیکی فولاد

| | |
|---------------------|------|
| چگالی (kg/m^3) | ۷۸۷۰ |
| مدول یانگ (GPa) | ۲۱۰ |
| ضریب پواسون | ۰/۳۳ |



شکل ۳ منحنی تنش- کرنش فوم پلی اورتان

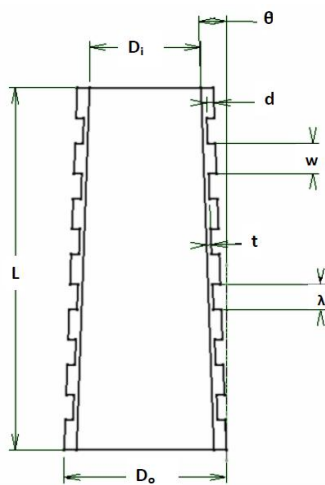
خصوصیات مکانیکی فوم پلی اورتان مطابق جدول (۲) می باشد.

جدول ۲ خصوصیات مکانیکی فوم

| | |
|------|---------------------|
| ۱۹۲ | چگالی (kg/m^3) |
| ۱۶/۵ | مدول یانگ (MPa) |
| ۰ | $U_{(elastic)}$ |
| ۰ | $U_{(plastic)}$ |

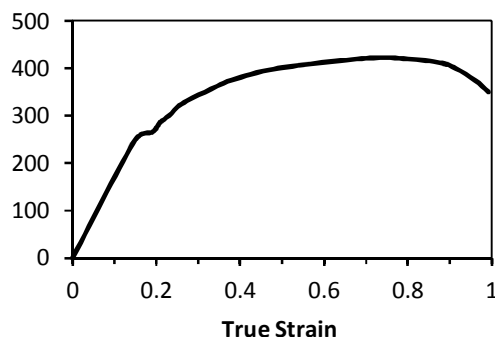
۳- تست تجربی

ضربه گیر شیاردار خارجی از آلیاژ فولاد St 37 ساخته شدند. همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، شیارهای خارجی با فاصله های مساوی با استفاده از دستگاه CNC ایجاد می شوند. با توجه به شکل (۵) D_i قطر داخلی، D_o قطر خارجی، t ضخامت جدار مخروط، W طول قسمت ضخیم، d عمق شیار، λ فاصله بین شیارها، L طول مخروط و θ زاویه مخروط است. جزئیات ابعاد نمونه ها در جدول (۳) لیست شده اند. در این پژوهش کلیه پارامترهای هندسی لوله ثابت در نظر گرفته شده و فقط فاصله شیارها تغییر می کند.



شکل ۵ هندسه نمونه مخروط شیاردار

شکل (۱) منحنی تنش برحسب کرنش رسم شده است. بنابراین، نقاط تنش-کرنش واقعی در نرم افزار آباکوس طبق شکل (۱) تقریب زده می شوند.

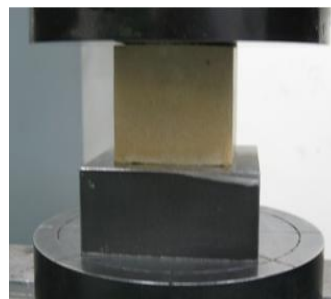


شکل ۱ تنش واقعی برحسب کرنش برای فولاد St 37 از تست تجربی

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 فیکسچری که شامل دو صفحه در بالا و پایین است محکم می شوند. نمونه در بین این دو صفحه به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفته و توسط پیچ دستی محکم می گردد.

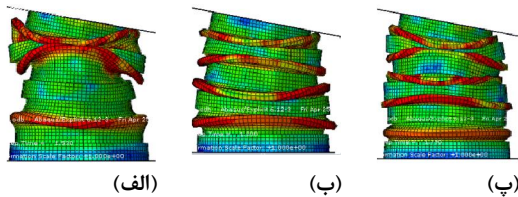
به منظور تعیین مشخصات مکانیکی فوم، نمونه مکعبی به ابعاد $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ مطابق استاندارد ASTM D1621-94 و با سرعت 10mm/min مطابق شکل (۲) تحت فشار محوری قرار داده می شود.



شکل ۲ نمونه مکعبی فوم پلی اورتان جهت تست فشار محوری

بعد از تست فشار محوری منحنی تنش-کرنش فوم پلی اورتان مطابق شکل (۳) بدست می آید.

اصطکاک بین اجزا مدل از فرمولاسیون اصطکاک پنالتی استفاده می‌شود که مقدار اصطکاک بین نمونه و صفحات صلب برابر 0.3 و در خود تماسی حین لهیدگی برابر 0.2 در نظر گرفته شد. شکل (۸)، شبیه‌سازی عددی نمونه‌ها تحت بارگذاری 10° درجه را نشان می‌دهد.



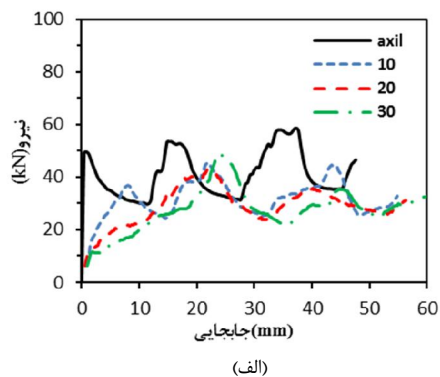
شکل ۸ نمونه های شبیه سازی شده با فوم و تحت بارگذاری 10° درجه (الف) ۳ شیار (ب) ۴ شیار (پ) ۵ شیار

جدول (۴) مقایسه ای بین نتایج تجربی و شبیه سازی عددی برای نمونه‌های پر شده با فوم تحت بارگذاری 10° درجه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی حاصل شده است. بنابراین، شبیه سازی عددی می‌تواند پارامترهای ضربه‌پذیری را برای مخروط شیاردار پر شده از فوم تحت بارگذاری مورب را به خوبی برآورد کند.

جدول ۴ مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه سازی عددی

| نمونه | شبیه سازی | | تست تجربی | | خطا (%) |
|--------|-----------|---------------|-----------|---------------|---------|
| | $E(kJ)$ | $P_{max}(kN)$ | $E(J)$ | $P_{max}(kN)$ | |
| شیار ۳ | ۱/۵۴۲ | ۳۵/۴۸ | ۱/۸۹۹ | ۳۴/۲۰ | ۱۸ |
| شیار ۴ | ۲/۰۰۹ | ۴۱/۲۳ | ۲/۰۹۲ | ۴۰/۹۰ | ۴ |
| شیار ۵ | ۱/۸۴۵ | ۴۰/۰۰ | ۱/۸۹۴ | ۳۸/۴۰ | ۲ |

شکل (۹) مقایسه‌ای از منحنی نیرو-جابجایی حاصل از تست تجربی برای نمونه‌های پر شده از فوم با ۳، ۴ و ۵ شیار را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود ماکزیمم نیروی لهیدگی با افزایش زاویه بارگذاری کاهش می‌یابد.



(الف)

جدول ۳ مشخصات ابعاد نمونه‌های تست

| نمونه | L (mm) | D_i (mm) | D_o (mm) | t (mm) | d (mm) | W (mm) | λ (mm) | θ |
|--------|----------|------------|------------|----------|----------|----------|----------------|-----------|
| شیار ۳ | ۱۰۰ | ۳۶ | ۵۵/۹۸ | ۱ | ۲ | ۷ | ۲۴ | 4° |
| شیار ۴ | ۱۰۰ | ۳۶ | ۵۵/۹۸ | ۱ | ۲ | ۷ | ۱۶/۲۵ | 4° |
| شیار ۵ | ۱۰۰ | ۳۶ | ۵۵/۹۸ | ۱ | ۲ | ۷ | ۱۱/۶ | 4° |

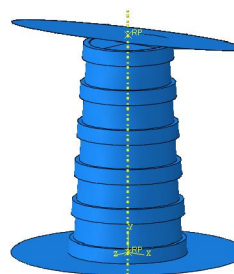
شکل نهایی نمونه‌ها بعد از تست در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶ نمونه های تست شده با فوم و تحت بارگذاری 10° درجه (الف) ۳ شیار ، (ب) ۴ شیار (پ) ۵ شیار

۴- شبیه‌سازی

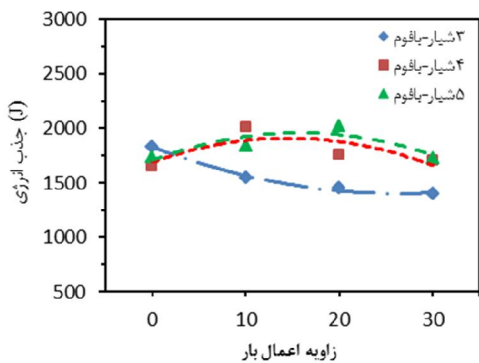
در این مطالعه، ضربه‌گیر مخروطی شیاردار خارجی و فوم پلی‌اورتان با المان‌ای سه بعدی مدل شدند و به صورت‌های هشت‌گانه شونده. برای مدل کردن صفحه بالا و پایین دینامیک صریح تحلیل می‌از جسم صلب استفاده شده است. صفحه پایینی در همه جهات مقید است. شکل (۷) جزئیات مدل سه بعدی را نشان می‌دهد.



شکل ۷ 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 (۲) نشان داده شده استفاده می‌شود.

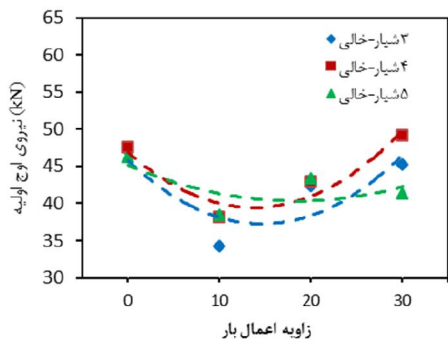
برای تعریف تماس بین صفحه‌های صلب با ضربه‌گیر از تماس "سطح به سطح" استفاده می‌شود. از آنجا که در زمان فروریزش نمونه‌ها، المان‌های دیواره مخروط با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند از خود تماسی استفاده شده است تا از نفوذ المان‌ها به داخل یکدیگر جلوگیری شود. اصطکاک یکی از مهمترین مشخصه‌هایی است که در فرآیند شبیه‌سازی باید مشخص گردد. در شبیه‌سازی برای اعمال



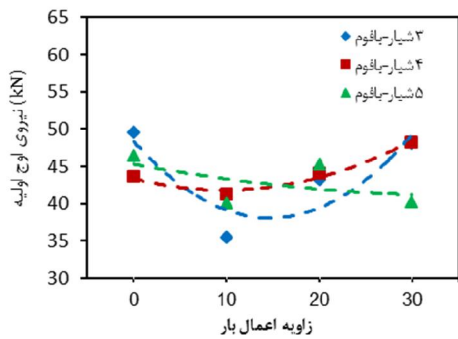
(ب)

شکل ۱۰ انرژی جذب شده برای نمونه های الف) بدون فوم، ب) با فوم

شکل (۱۱) نمودار نیروی اوج اولیه برحسب زاویه اعمال بار برای نمونه های خالی و پر شده از فوم با شیارهای مختلف نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، با افزایش زاویه بارگذاری در های ۳ و ۴ شیار تا زاویه ۱۰ درجه کاهش مقدار نیروی اوج اولیه نمونه و سپس افزایش آن را شاهد هستیم ولی در نمونه ۵ شیار همواره با باید. افزایش زاویه بارگذاری نیروی اوج اولیه کاهش می دهد.



(الف)

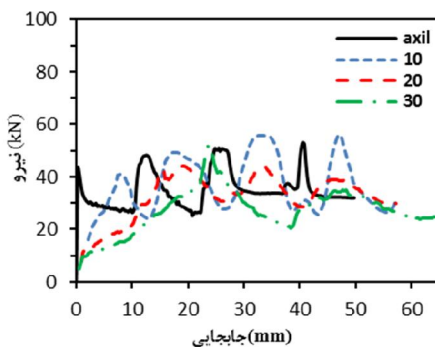


(ب)

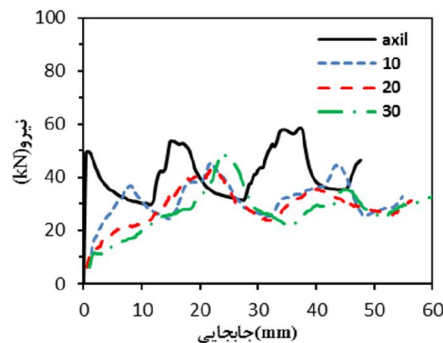
شکل ۱۱ نمودار نیروی اوج اولیه برای نمونه های الف) بدون فوم، ب) با فوم

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، پاسخ جذب انرژی و لهیدگی لوله های مخروطی شیاردار خارجی پر شده از فوم پلی اورتان تحت بارگذاری مورب به



(ب)

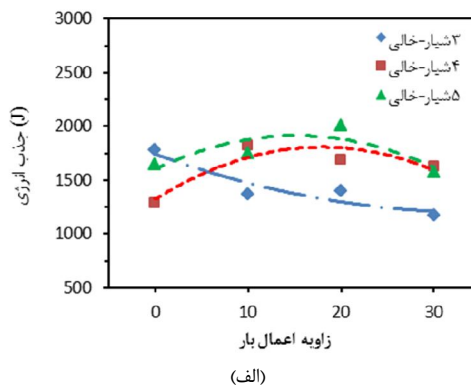


(ب)

شکل ۹ منحنی نیرو-جابجایی برای نمونه های الف) ۳ شیار ب) ۴ شیار ۵ شیار

۵- بحث و بررسی

شکل (۱۰)، نمودار جذب انرژی برای نمونه های با فوم و بدون فوم را نشان می دهد، با افزایش زاویه دهد. همانطور که مشاهده می بارگذاری در نمونه ۳ شیار مقدار جذب انرژی کاهش یافته است ولی در نمونه ۴ و ۵ شیار تا زاویه ۲۰ درجه افزایش جذب انرژی را شاهد هستیم.



(الف)

- International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 46, pp. 201-216, 2004.
- [2] B. Lampinen and R. Jeryan, "Effectiveness of polyurethane foam in energy absorbing structures," SAE Technical Paper 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] X. Zhang and G. Cheng, "A comparative study of energy absorption characteristics of foam-filled and multi-cell square columns," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 34, pp. 1739-1752, 2007.
- [7] 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.
- [8] F. Mokhtarneshad, S. Salehghaffari, M. Tajdari, "Improving the Crashworthiness Characteristics of Cylindrical Tubes Subjected to Axial Compression by Cutting Wide Grooves from Their Outer Surface" *International Journal of Mechanical Sciences*, 2009
- [9] Z. Li, J. Yu, and L. Guo, "Deformation and energy absorption of aluminum foam-filled tubes subjected to oblique loading," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 54, pp. 48-56, 2012.
- [10] Z. Ahmad, D. P. Thambiratnam, and A. C. C. Tan, "Dynamic energy absorption characteristics of foam-filled conical tubes under oblique impact loading," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, pp. 475-488, 2010.
- [11] 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.

صورت تجربی و شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. که نتایج آن به شرح زیر می باشد:

- با توجه به تطابق قابل قبول در نتایج بین شبیه سازی عددی و تست تجربی می توان گفت که شبیه سازی عددی می تواند پارامترهای ضربه پذیری ضربه گیرهای مخروطی شیاردار پر شده از فوم را به خوبی برآورد کند.
- جذب انرژی نمونه اورتان نسبت به های پر شده با فوم پلی بیشتر است. های خالی نمونه
- مقدار جذب انرژی برای نمونه ۳ شیار با افزایش زاویه بارگذاری کاهش یافته و مقدار جذب انرژی برای نمونه ۴ و ۵ شیار تا زاویه ۲۰ درجه افزایش و سپس کاهش می یابد.
- نیروی اوج اولیه در نمونه های ۳ و ۴ شیار تا زاویه ۲۰ درجه کاهش و مجدداً افزایش می یابد.
- نیروی اوج اولیه در نمونه ۵ شیار با افزایش زاویه بارگذاری کاهش می یابد.

۷- مراجع

- [1] G. Nagel and D. Thambiratnam, "A numerical study on the impact response and energy absorption of tapered thin-walled tubes,"