



مطالعه اثر افزودن فوم پلی‌یورتان بر قابلیت جذب انرژی لوله‌های هیبریدی با ضخامت‌های مختلف لایه کامپوزیتی

وحید زال^{۱*}، حسین طالبی قادیکلایی^۲، صادق میرزامحمدی^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: Zal@qut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۰ دی ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

جذب انرژی

فشار شبه استاتیک

لوله هیبریدی

کامپوزیت

فوم پلی‌یورتان

چکیده

در این مقاله به بررسی نحوه تاثیر افزودن پرکننده فومی بر قابلیت جذب انرژی لوله‌های هیبریدی با ضخامت‌های مختلف لایه کامپوزیتی پرداخته شده است. برای این منظور ۱۰ لوله هیبریدی از نوع آلومینیوم/الیاف شیشه بافته شده/رزین پلی‌استر با ۵ ضخامت مختلف لایه کامپوزیتی بین ۰ تا ۱/۷۵ میلی‌متر با فرایند لایه‌چینی دستی بر روی لوله آلومینیومی به قطر بیرونی ۴۲ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر، تولید شد و ۵ مورد از آن‌ها با فوم پلی‌یورتان با چگالی آزاد ۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب پر شدند. در ادامه این نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه تست فشار یونیورسال، تحت آزمون فشار محوری شبه‌استاتیکی با نرخ جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه تا لهیدگی کامل قرار گرفتند و میزان جذب انرژی ویژه، بهره‌وری نیروی لهیدگی و شکل مود لهیدگی هر کدام از آن‌ها استخراج شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در ضخامت‌های پایین لایه کامپوزیتی، افزودن فوم پلی‌یورتان موجب بهبود موثر جذب انرژی ویژه و بهره‌وری نیروی لهیدگی لوله هیبریدی می‌شود، با این وجود، در ضخامت‌های بالای لایه کامپوزیتی این روند مثبت از بین رفته و حتی تاثیر فوم بر قابلیت جذب انرژی ویژه منفی می‌گردد.

Investigating the effect of polyurethane foam filling on the energy absorption of hybrid tubes with different thickness of composite layer

Vahid Zal^{1*}, Hossein Talebi-Ghadikolaee², Sadegh Mirzamohammadi³

1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

3- Assistant Professor, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: Zal@qut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 31 December 2023

Accepted: 6 May 2024

Keywords:

Energy Absorption

Quasi-Static Compression

Hybrid Tubes

Composite

Polyurethane Foam

Abstract

In this article, the effect of filling foam on the energy absorption capability of hybrid tubes with different thicknesses of the composite layer has been investigated experimentally. For this purpose, 10 aluminum/woven glass fiber/polyester resin hybrid tubes with 5 different thicknesses of the composite layer between 0 and 1.75 mm were produced by manual tape winding on an aluminum tube with an outer diameter of 42 mm and a thickness of 1 mm, then, 5 of these tubes were filled with polyurethane foam with free density of 40 kg/m³. Afterwards, the hybrid tubes were subjected to the quasi-static axial compression test using a universal pressure testing machine with a constant displacement rate of 10 mm/min until their complete crushing, and the specific energy absorption, crushing force efficiency, and crushing mode shapes were extracted for each tube. The results show that in the low thicknesses of the composite layers, filling the tubes with polyurethane foam effectively improves the specific energy absorption and the crushing force efficiency. However, the role of the foam becomes less effective and even negative in the high thicknesses of the composite layers.

Please cite this article using:

Zal V, Talebi-Chadikolaee H, Mirzamohammadi S. Investigating the effect of polyurethane foam filling on the energy absorption of hybrid tubes with different thickness of composite layer. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 April 20;11(2):58-68. doi: 10.22034/IJME.2024.433178.1893 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

در سیستم‌های حمل و نقل و به طور ویژه در خودروسازی، برای جلوگیری از آسیب رسیدن به سرنشینان در شرایط وقوع تصادف، از سازه‌های جاذب انرژی استفاده می‌کنند تا بتواند انرژی جنبشی حاصل از تصادف را از طریق له شدن در یک بازه جابه‌جایی محدود جذب کند [۱]. هرچقدر نسبت جذب انرژی به وزن این سازه‌ها که به عنوان جذب انرژی ویژه شناخته می‌شود، بالاتر باشد مطلوب‌تر است. بنابراین مواد و ساختارهای مختلفی برای افزایش قابلیت جذب انرژی ویژه این سازه‌ها به کار گرفته شده است. از جمله مواد متداول برای این منظور، پروفیل‌های توخالی فلزی از جنس آلومینیوم و یا فولاد استحکام متوسط هستند که در آن‌ها، انرژی عمدتاً از طریق تغییر شکل پلاستیک فلز جذب می‌شود [۲، ۳]، جذب انرژی لوله‌های مختلف فلزی با مقاطع و هندسه‌های مختلف مورد مطالعه گسترده‌ای قرار گرفته است [۴]. مقاطع کامپوزیتی نیز از جمله مواد پرکاربرد به عنوان جاذب انرژی هستند که با توجه به نسبت استحکام به وزن بالای آن‌ها، قابلیت جذب انرژی ویژه بالایی دارند [۵]. بر خلاف فلزات، جذب انرژی کامپوزیت‌ها به جای تغییر شکل پلاستیک، از طریق سه مکانیزم جدا شدن لایه‌ها، شکست الیاف و زمینه اتفاق می‌افتد [۶].

با ادغام لایه‌های فلزی و کامپوزیتی، مواد هیبریدی ایجاد می‌شود که دارای مزایای هر دو جنس می‌باشد به گونه‌ای که صلبیت و ضربه پذیری آن را لایه فلزی فراهم می‌کند و استحکام به وزن بالا و مقاومت خستگی را لایه کامپوزیتی ایجاد می‌کند و با توجه به این مزایا، به شکل روزافزونی در صنایع مختلف و به طور ویژه در صنعت خودروسازی و حمل و نقل هوایی به کار گرفته می‌شوند [۷، ۸]. یکی از کاربردهای این مواد برای ایجاد سازه‌های جاذب انرژی است، زیرا در این مواد هر دو مکانیزم جذب انرژی درگیر شده و موجب بهبود موثر جذب انرژی ویژه می‌شود. با توجه به این مسئله، پژوهش‌های مختلفی بر روی بهبود قابلیت جذب انرژی مواد هیبریدی متشکل از لوله و یا پروفیل‌های فلزی با لایه تقویتی بیرونی کامپوزیتی انجام گرفته است. منصور و همکاران [۹] به بررسی جذب انرژی و لهیدگی لوله‌های هیبریدی آلومینیوم/کامپوزیت الیاف شیشه با تعداد لایه‌ها و چیدمان‌های مختلف لوله آلومینیومی پرداختند و نتیجه گرفتند که لوله آلومینیومی نقش غالب را در مکانیزم جذب انرژی لوله‌های هیبریدی دارند. هوانگ و همکاران [۱۰] به بررسی جذب انرژی لوله‌های هیبریدی آلومینیومی با لایه بیرونی کامپوزیتی الیاف کربن/اپوکسی پرداخته و مکانیزم‌های جذب انرژی آن‌ها را به صورت عددی و تجربی مطالعه کردند. ژانگ و همکاران [۱۱] به مطالعه جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی تقویت شده با الیاف ترکیبی شیشه و کربن، تحت بارگذاری محوری پرداختند و اثر پارامترهایی نظیر نحوه چیدمان الیاف و ضخامت لایه‌ها بر روی جذب انرژی ویژه لوله‌ها را بررسی کردند. طیباتی و همکاران [۱۲] به بررسی عددی و تجربی جذب انرژی تحت بارگذاری شبه استاتیکی لوله‌های هیبریدی کامپوزیتی/آلومینیومی با چیدمان‌های مختلف لایه کامپوزیتی پرداختند و مودهای مختلف لهیدگی آن‌ها را مطالعه کردند. در یک پژوهش دیگر عسگری و همکاران [۱۳] به بررسی تاثیر اعمال سیکل‌های حرارتی بر روی قابلیت جذب انرژی لوله‌های هیبریدی آلومینیومی/کامپوزیتی پرداختند و نتیجه گرفتند که اعمال سیکل‌های حرارتی موجب تضعیف اتصال کامپوزیت به آلومینیوم شده و در نتیجه میزان جذب انرژی را می‌تواند کاهش دهد.

یکی دیگر از راه‌کارهای بهبود جذب انرژی در این پروفیل‌ها، پر کردن داخل لوله با موادی نظیر ساختارهای سلولی و یا انواع فوم‌های فلزی و پلیمری می‌باشد [۱۴]. با توجه به چگالی بسیار پایین این مواد و در عین حال تاثیر مثبت آن بر ایجاد تاخیر در کمانش موضعی لوله، می‌تواند نقش موثری بر بهبود جذب انرژی ویژه این لوله‌ها داشته باشد. مرت و همکاران [۱۵] تاثیر افزودن ساختارهای لانه زنبوری بر قابلیت جذب انرژی ویژه این لوله‌های هیبریدی، تحت بارگذاری فشاری محوری پرداختند و یا در یک پژوهش دیگر سان و همکاران [۱۶] به بررسی اثر افزودن فوم فلزی بر روی قابلیت جذب انرژی سازه‌های کامپوزیتی هیبریدی پرداختند. فوم‌های پلیمری و بویژه فوم پلی‌یورتان به دلیل فراوری ساده و قابلیت جذب انرژی بالایی که دارد، یکی از گزینه‌های بسیار پر کاربرد برای این منظور می‌باشد [۱۷]. یائو و همکاران [۱۸] ساختارهای هیبریدی فلزی/کامپوزیتی را با فوم‌های پلی‌یورتان پر کردند و تحت آزمون فشار شبه‌استاتیکی به بررسی قابلیت جذب انرژی آن‌ها پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزودن فوم موجب تغییر مود تغییر شکل، پایداری بهتر سازه و جذب انرژی بهتر آن می‌شود. حسین و همکاران [۱۹] به مطالعه جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی مربعی پر شده با فوم پلی‌یورتان و ساختارهای لانه زنبوری پرداختند و بهبود موثر قابلیت جذب انرژی را مشاهده کردند. با مطالعه تحقیقات پیشین مشاهده می‌شود که استفاده از پرکننده‌های سبک نظیر ساختارهای سلولی و فوم تاثیر گسترده‌ای بر قابلیت جذب انرژی لوله‌های هیبریدی دارد. ولی باید در نظر گرفت که در این لوله‌ها، نقش مثبت پرکننده‌ها عمدتاً از طریق برهم‌کنش

آنها با لایه‌های آلومینیومی و کامپوزیتی حاصل می‌شود و گرنه میزان جذب انرژی خود پرکننده‌ها معمولاً بسیار کم می‌باشد. با توجه به این مسئله، می‌توان گفت که تاثیر مثبت این پرکننده‌ها وابسته به مشخصات هندسی و مکانیکی خود لوله هیبریدی خواهد بود که این مساله کم‌تر مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. بنابراین برای مطالعه عمیق‌تر این مسئله، در این مقاله به بررسی نحوه تاثیر افزودن پرکننده فوم پلی‌یورتان بر مشخصات جذب انرژی لوله‌های هیبریدی با ضخامت‌های مختلف لایه کامپوزیتی پرداخته شده است.

۲- روند تجربی

۲-۱- مواد

در این پژوهش به بررسی میزان جذب انرژی لوله‌های هیبریدی آلومینیومی/کامپوزیتی توخالی و پرشده با فوم، تحت بارگذاری شبه استاتیکی محوری پرداخته شده است. برای ساخت لایه کامپوزیتی این لوله‌ها از الیاف شیشه گرید E، بافت ساده متقارن با چگالی سطحی ۲۲۵ گرم بر مترمربع به عنوان تقویت کننده، و همچنین رزین پلی‌استر غیراشباع RS-2110 تولید شرکت راستین رزین باهر، به عنوان زمینه به کار رفته است. پخت این رزین در دمای محیط و به کمک متیل اتیل کتون پراکسید (۲ درصد) به عنوان آغازگر و با شتاب‌دهنده کبالت (۰/۲ درصد) انجام گرفته است. لوله فلزی به کار رفته نیز از جنس آلومینیوم با قطر بیرونی ۴۲ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر و با مدول الاستیک ۶۹ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳۳ می‌باشد.

همچنین برای تولید فوم پلی‌یورتان نیز از ایزوسیانات و پلی‌یول با نسبت ۱/۲ به ۱ استفاده شده است که منجر به فوم با چگالی آزاد ۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌شود.

۲-۲- تولید نمونه‌ها

برای ساخت لوله‌های هیبریدی، در ابتدا لوله‌های آلومینیومی به طول ۲۰ سانتی‌متر بریده شده و سطح بیرونی آن به صورت مکانیکی، مطابق شکل ۱-الف خشن‌کاری و زبر شد. خشن‌کاری مکانیکی سطح ورق یک روش بسیار مناسب برای بهبود استحکام اتصال لایه کامپوزیت به آلومینیومی در این محصولات می‌باشد [۲۰]. برای پیچیدن یکپارچه الیاف شیشه بر روی لوله، یک فیکسچر دورانی مناسب مطابق شکل ۱-ب ساخته شد تا لوله آلومینیومی بر روی آن سوار شده و بوسیله یک دستگیره، به صورت دستی چرخانده شود. در ادامه الیاف شیشه با عرض ۲۰ سانتی‌متر و طول مورد نظر بریده شده و همزمان با اعمال و آغشته‌سازی دستی رزین، مطابق شکل ۱-پ به دور لوله آلومینیومی پیچیده شد. برای جلوگیری از ایجاد تخلخل در نمونه، حباب‌های موجود در رزین زمینه با استفاده از یک غلتک مناسب، به صورت پیوسته در طول فرایند آغشته‌سازی حذف گردید. در ادامه لوله‌های هیبریدی حاصل در دمای محیط و به مدت ۴۸ ساعت به صورت کامل پخت شدند. نکته با اهمیت راجع به رزین پلی‌استر، انقباض بالای آن در طول فرایند پخت است که منجر به فشرده شدن لایه‌های کامپوزیتی به سطح آلومینیوم شده و به دلیل زبری مکانیکی سطح این لوله‌ها، منجر به اتصال مکانیکی مستحکم بین آلومینیوم و کامپوزیت می‌گردد. باید در نظر گرفت که برای اینکه مقایسه بین لوله‌های توخالی و پرشده با فوم پلی‌یورتان به صورت دقیق‌تری انجام گیرد، لوله‌ها در طول بزرگ‌تری ساخته شدند (شکل ۱-ت) و در ادامه با برش مناسب، دو نمونه ۸ سانتی‌متری از هر کدام برای حالت آزمون توخالی و پرشده با فوم بدست آمد (شکل ۱-ج) که لایه کامپوزیتی آن‌ها دارای مشخصات دقیقاً یکسان می‌باشد.

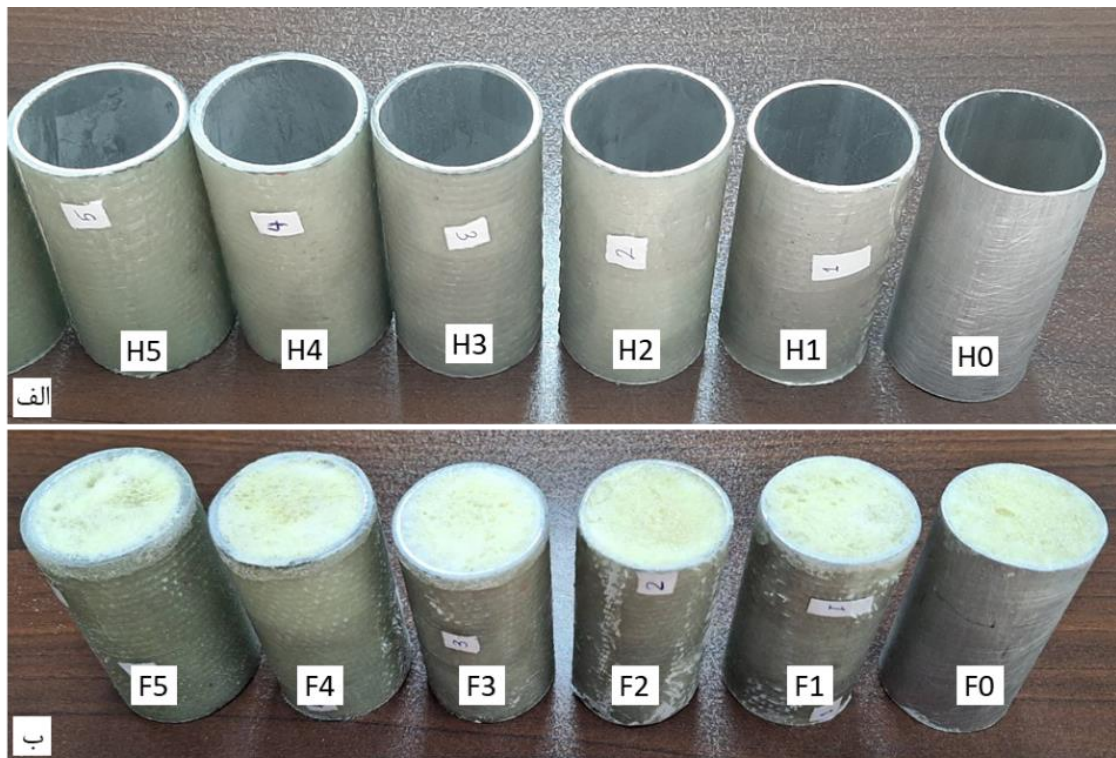
برای ایجاد نمونه‌های پرشده با فوم، پلی‌یول و ایزوسیانات با نسبت‌های ۱ به ۱/۲ باهم دیگر ترکیب شده و به مدت ۲۰ ثانیه هم‌زده شدند و سپس به داخل لوله‌های هیبریدی تخلیه شدند. فرایند فوم‌سازی بلافاصله شروع شده و بعد از گذشت ۴۸ ساعت در دمای محیط تکمیل شد.

برای بررسی تاثیر نسبت ضخامت لایه کامپوزیتی به لایه آلومینیومی، شش نمونه شامل یک نمونه آلومینیومی بدون لایه کامپوزیتی و پنج نمونه هیبریدی با ضخامت‌های لایه کامپوزیتی مختلف بین ۰/۵ تا ۱/۷۵ میلی‌متر بر روی لوله آلومینیومی به ضخامت ۱ میلی‌متر ایجاد شد. برای هر کدام از این حالت‌ها دو نمونه ساخته شد تا میزان جذب انرژی در شرایط لوله توخالی و پرشده با فوم پلی‌یورتان مقایسه گردد. در شکل ۲ شش نمونه توخالی و شش نمونه پر شده با فوم پلی‌یورتان نشان داده شده است.

برای نام‌گذاری نمونه‌ها، از حرف H برای نمونه‌های خالی و حرف F برای نمونه‌های پر شده با فوم استفاده شده است. در طول فرایند آزمون فشار، نمونه‌های H5 و F5 معیوب شدند و لذا در بررسی‌های انجام گرفته از این دو نمونه صرف نظر شده است. مشخصات ابعادی و وزنی ۱۰ نمونه باقی‌مانده در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱ مراحل ساخت نمونه‌ها، الف) زبرسازی سطح لوله آلومینیومی، ب) فیکسچر دوران لوله و الیاف پیچی، پ) آغشته‌سازی الیاف شیشه با رزین پلی‌استر، ت) لوله هیبریدی ساخته شده به طول ۲۰ سانتی‌متر و ج) دو نمونه ۸ سانتی‌متری با مشخصات کاملاً یکسان برای آزمون توخالی و پر شده با فوم



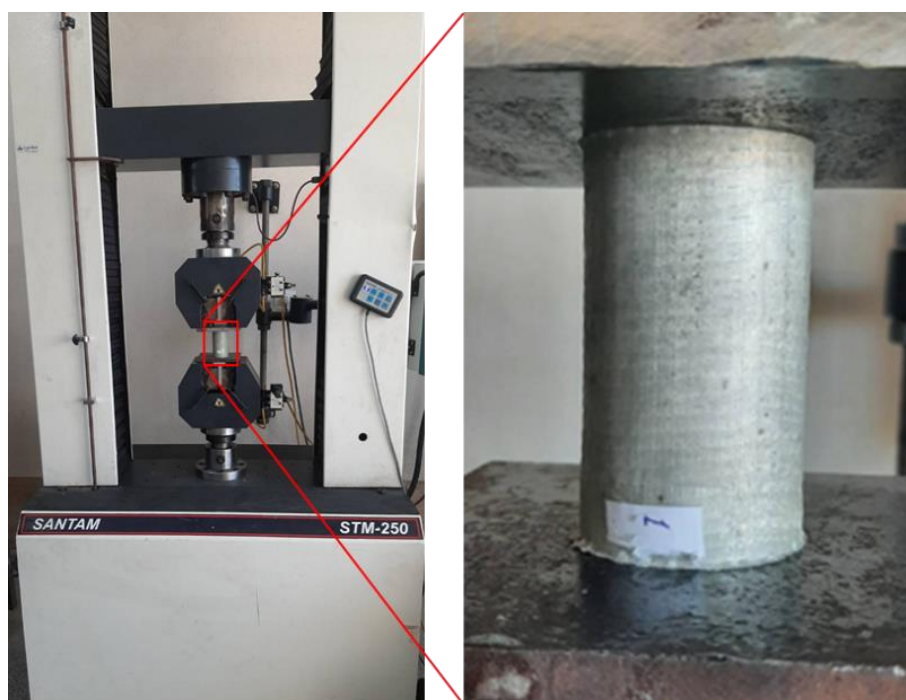
شکل ۲ نمونه‌های آماده شده برای آزمون فشار شبه استاتیکی به صورت الف) توخالی و ب) پر شده با فوم پلی‌یورتان

جدول ۱ مشخصات لوله‌های هیبریدی ساخته شده

نمونه	وزن نمونه (گرم)	تعداد لایه‌های الیاف شیشه	پرشدن داخل لوله	ارتفاع لوله (میلی‌متر)	ضخامت کامپوزیت به آلومینیوم (TR)
H0	۲۶/۴۳	۰	توخالی	۷۸/۷۵	۰
H1	۳۵/۱۵	۲	توخالی	۷۷/۶	۰/۵
H2	۴۴/۹۷	۴	توخالی	۸۱/۷	۱
H3	۴۸/۷۳	۵	توخالی	۸۰/۸	۱/۲۵
H4	۶۱/۹۴	۷	توخالی	۷۹/۷۵	۱/۷۵
F0	۳۲/۶	۰	پلی‌یورتان	۷۸	۰
F1	۴۳/۷۷	۲	پلی‌یورتان	۸۰/۱	۰/۵
F2	۵۱/۴۶	۴	پلی‌یورتان	۷۹/۷	۱
F3	۵۳/۶۳	۵	پلی‌یورتان	۷۸/۷۵	۱/۲۵
F4	۶۹/۱۵	۷	پلی‌یورتان	۷۹/۸	۱/۷۵

۳- پارامترهای جذب انرژی نمونه‌ها

برای بررسی قابلیت جذب انرژی و ضربه‌پذیری هر کدام از نمونه‌ها، از آزمون فشار شبه استاتیکی استفاده شده است. این آزمون با استفاده از یک دستگاه تست فشار یونیورسال ۲۵ تنی و با نرخ اعمال بار ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفته و نمونه‌ها تحت لهیدگی محوری قرار گرفته و نمودار جابه‌جایی-نیرو برای هر کدام از نمونه‌ها استخراج شد. برای اجرای آزمون، نمونه‌ها به صورت آزاد در میان دو صفحه فولادی نسبتاً ضخیم مطابق شکل ۳ قرار گرفته و با دستگاه فشار یونیورسال فشرده شده‌اند. هدف از به‌کارگیری این ورق‌ها، توزیع یکنواخت نیروی فشاری در مقطع لوله و همچنین ایجاد امکان تغییر شکل شعاعی در دو انتهای نمونه می‌باشد. در طول آزمون فک پایین دستگاه ثابت نگه داشته شده و جابه‌جایی اعمالی از طریق حرکت فک بالایی انجام گرفته است.



شکل ۳ دستگاه آزمون فشار شبه استاتیکی و نحوه قرارگیری نمونه در آن

میزان جذب انرژی نمونه^۱ برابر است با مساحت زیر نمودار جابه‌جایی-نیرو در بازه جابه‌جایی صفر تا طول موثر لهیدگی، که از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$EA = \int_{x=0}^{x=a} F(x) \cdot dx \quad (1)$$

در این رابطه F بیانگر نیروی لهیدگی به عنوان تابعی از جابه‌جایی x می‌باشد و a برابر است با طول موثر لهیدگی. همچنین جذب انرژی ویژه^۲ که به صورت انرژی جذب شده در واحد جرم جاذب انرژی تعریف می‌شود، پارامتر با اهمیت دیگری است که مطابق رابطه ۲ به دست می‌آید و در آن m برابر جرم نمونه می‌باشد.

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (2)$$

طول موثر لهیدگی (a) برابر است با جابه‌جایی در آخرین ماکزیمم نسبی تابع بهره‌وری جذب انرژی (رابطه ۳).

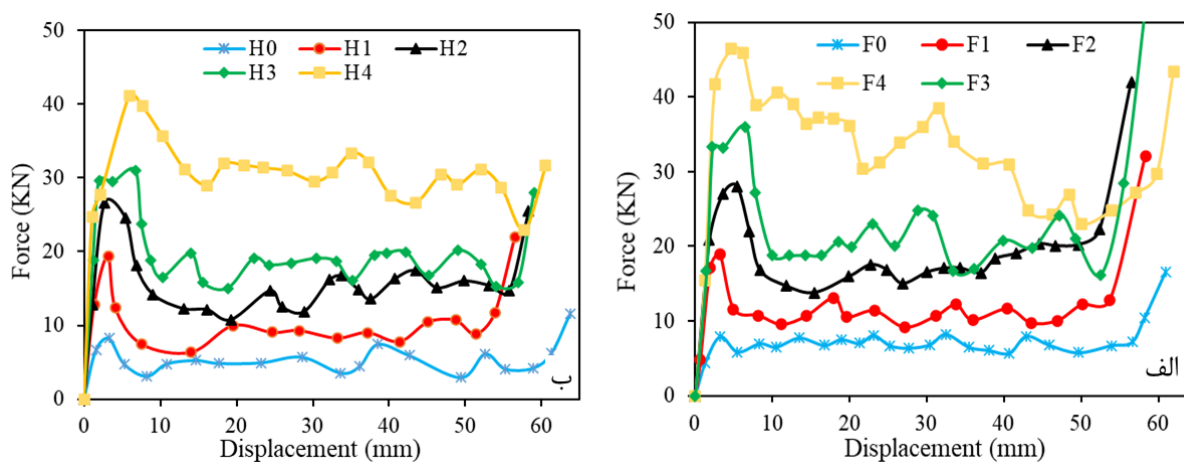
$$EAE(x) = \frac{1}{F(x)} \cdot \int_0^x F(x) \cdot dx \quad (3)$$

هرچقدر میزان SEA و همچنین طول موثر لهیدگی بالاتر باشد، سازه از بابت جذب انرژی مطلوب‌تر است. پارامتر دیگری که برای بررسی قابلیت جذب انرژی یک سازه معمولاً استفاده می‌شود، بازدهی نیروی لهیدگی^۳ (CFE) است که به صورت نسبت میانگین نیروی لهیدگی (در طول جابه‌جایی لهیدگی موثر) به بیشینه نیروی شروع لهیدگی تعریف می‌شود. مقدار CFE زیاد به این معنی است که جاذب انرژی می‌تواند مقدار زیادی انرژی را جذب کند و در عین حال صدمه به سرنشینان را در هنگام تصادفات به حداقل برساند. این پارامترها برای هر کدام از نمونه‌ها استخراج شده و با هم‌دیگر مقایسه شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- جذب انرژی نمونه‌ها

با انجام تست فشار شبه‌استاتیکی بر روی نمونه‌ها، نمودارهای جابه‌جایی-نیروی لهیدگی استخراج شد. در شکل ۴ نتایج حاصل ارائه شده است (توجه شود که برای بهبود کیفیت نمایش نمودارها، اندکی از نوسان آن‌ها در این شکل حذف شده است ولی در محاسبات انجام گرفته لحاظ شدند). مشاهده می‌شود که بر روی هر دو نوع نمونه توخالی و پرشده با فوم پلی‌یورتان، در ابتدا نیروی فشاری به صورت الاستیک افزایش می‌یابد و بعد از رسیدن به نیروی بیشینه که معادل است با شروع کمانش موضعی لایه آلومینیومی و همچنین جدایش بین آلومینیوم/کامپوزیت، نیرو افت کرده و در ادامه بعد از نوسان‌های مختلف نیرو که معمولاً به دلیل کمانش و خم شدن موضعی لایه آلومینیومی و یا پارگی الیاف کامپوزیت روی می‌دهد، کل لوله به لهیدگی کامل رسیده و سازه دچار تراکم کامل می‌شود که در این حالت نیرو شدیداً در اثر جابه‌جایی جزئی افزایش می‌یابد و جذب انرژی بیشتر دیگر ممکن نمی‌باشد.



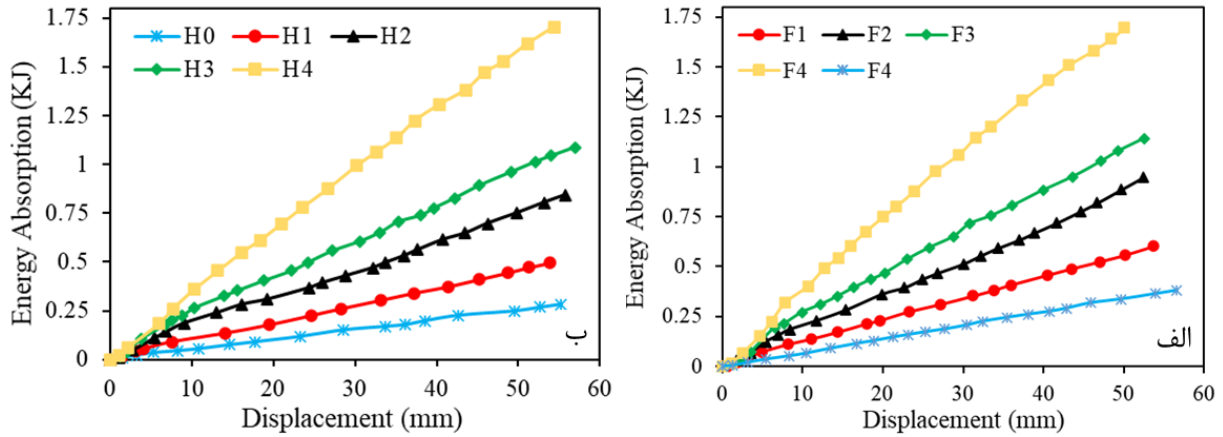
شکل ۴ نمودارهای جابه‌جایی-نیروی لهیدگی برای نمونه‌های هیبریدی الف) پرشده با فوم پلی‌یورتان و ب) توخالی

¹ Energy Absorption

² Specific Energy Absorption

³ Crushing Force Efficiency

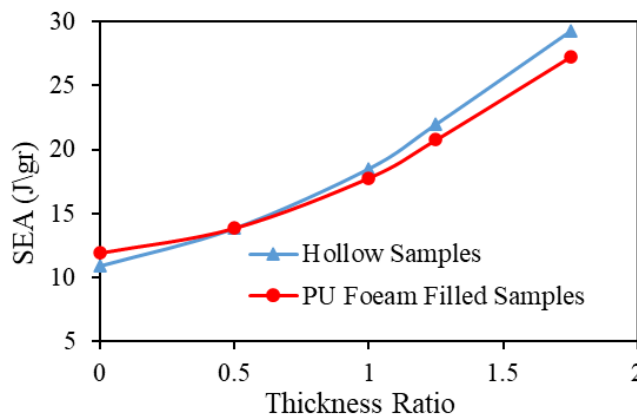
برای درک بهتر قابلیت جذب انرژی هر کدام از نمونه‌ها و نحوه تاثیر متغیرها بر آن، جذب انرژی نمونه‌ها برای جابه‌جایی‌های مختلف مطابق رابطه ۱ محاسبه شده و در قالب نمودارهای جابه‌جایی-جذب انرژی در شکل ۵ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که برای همه نمونه‌ها میزان جذب انرژی تقریباً به صورت خطی، تابعی از طول لهیدگی (جابه‌جایی) می‌باشد.



شکل ۵ نمودارهای جابه‌جایی- جذب انرژی نمونه‌های هیبریدی (الف) پرشده با فوم پلی یورتان و (ب) توخالی

نکته‌ای که از این نمودارها برداشت می‌شود، نحوه تاثیر فوم پلی‌یورتان داخل لوله بر روی نیروی لهیدگی و جذب انرژی آن است، مشاهده می‌شود که برای لوله آلومینیومی بدون لایه کامپوزیتی (نمونه H0)، افزودن فوم موجب افزایش چشم‌گیر میزان نیروی لهیدگی و در نتیجه جذب انرژی می‌شود، این روند برای نمونه با نسبت ضخامت لایه کامپوزیتی به آلومینیومی ۰/۵ نیز تقریباً مشاهده می‌شود و در ادامه با بیشتر شدن ضخامت لایه کامپوزیتی، این افزایش کم‌تر می‌شود.

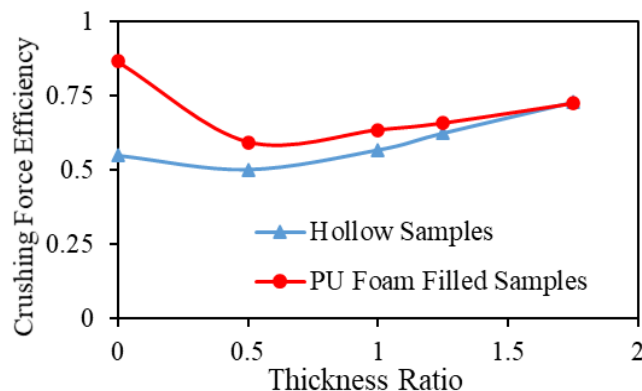
در واقع می‌توان دو مکانیزم را برای تاثیر افزودن فوم بر روی افزایش جذب انرژی مطرح کرد، اول اینکه خود فوم بخشی از نیروی اعمالی را تحمل می‌کند و در نتیجه انرژی جذب می‌کند و مکانیزم دوم که اهمیت بیشتری دارد، از طریق تاثیر این فوم بر نحوه کمانش موضعی و خم شدن لایه آلومینیومی اتفاق می‌افتد، بدین شکل که تعداد خم‌های ایجاد شده در لوله آلومینیومی و تغییر شکل‌های پلاستیک آن که جذب کننده انرژی هستند، افزایش می‌یابد. در بخش بعد با بررسی شکل مقطع بعد از لهیدگی نمونه‌ها، این مکانیزم بیشتر بحث خواهد شد. حال آن‌که برای نمونه‌هایی که نقش غالب جذب انرژی با لایه کامپوزیتی است، این تاثیر کمتر اهمیت می‌یابد. البته افزودن فوم به داخل نمونه‌ها موجب افزایش وزن آن می‌شوند و لذا بررسی میزان جذب انرژی ویژه نمونه‌ها اهمیت می‌یابد که بعد از محاسبه مطابق رابطه ۲، نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶ جذب انرژی ویژه نمونه‌های توخالی و فوم‌دار برای نسبت‌های مختلف ضخامت لایه کامپوزیتی به آلومینیومی

همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، برای لوله آلومینیومی بدون لایه کامپوزیتی، افزودن فوم با چگالی آزاد موجب بهبود جذب انرژی ویژه در حدود ۹ درصد می‌شود، در واقع در این نمونه در کنار اینکه خود فوم بخشی از نیرو را تحمل می‌کند، نیروی مورد نیاز برای کماتش موضعی لوله آلومینیومی را نیز بیشتر می‌کند و در نتیجه جذب انرژی لوله به شکل ملموسی افزایش می‌یابد که با وجود افزایش وزن آن، جذب انرژی ویژه نیز بیشتر شده است. این روند با افزودن لایه‌های کامپوزیتی کم‌تر شده است؛ به گونه‌ای که در نمونه‌های با ضخامت لایه کامپوزیتی ۰/۵ میلی‌متری جذب انرژی ویژه حالت توخالی و پر شده با فوم یکسان است و در ضخامت‌های بالاتر لایه کامپوزیتی، اثر افزودن فوم معکوس می‌شود به طوری که در نمونه‌های با ضخامت لایه کامپوزیتی ۱/۷۵ میلی‌متری، افزودن فوم به داخل آن موجب کاهش حدود ۷ درصدی جذب انرژی ویژه می‌شود. دلیل این مسئله، این است که در این نمونه‌ها لایه کامپوزیتی نقش غالب را در جذب انرژی لوله دارند و در نتیجه تاثیر فوم پلی‌یورتان که عمدتاً از طریق بهبود جذب انرژی لایه آلومینیومی است، کم‌رنگ‌تر می‌شود در حالی که وزن نمونه را بیشتر کرده است. همچنین این لایه فوم منجر به کاهش طول موثر لهیدگی می‌شود و از این طریق نیز موجب کاهش جذب انرژی می‌شود. البته باید در نظر گرفت که اگر چگالی فوم داخل لوله بیشتر شود، تاثیر آن بر افزایش جذب انرژی ویژه نیز بیشتر شده و در ضخامت‌های بالاتر لایه کامپوزیتی نیز همچنان موثر خواهد بود.

یکی دیگر از معیارهای با اهمیت جذب انرژی، نیروی اولیه لازم برای شروع جذب می‌باشد، در واقع اگر یک سازه‌ای در نیروهای بسیار بالایی شروع به جذب انرژی کند، نیروی اعمالی به صورت صلب منتقل خواهد شد و می‌تواند برای سایر اجزای سیستم آسیب‌رسان باشد؛ لذا در طراحی جاذب‌های انرژی ترجیح بر ایجاد سازه‌ای با جذب انرژی ویژه بالا و بیشینه نیروی شروع جذب کم می‌باشد. نسبت نیروی متوسط لهیدگی در طول جابه‌جایی موثر به بیشینه نیروی شروع لهیدگی، به عنوان معیاری برای این منظور ارائه شده است که هرچه قدر بزرگ‌تر باشد مطلوب‌تر است. برای نمونه‌های تست شده، این نسبت محاسبه و در شکل ۷ ارائه شده است.



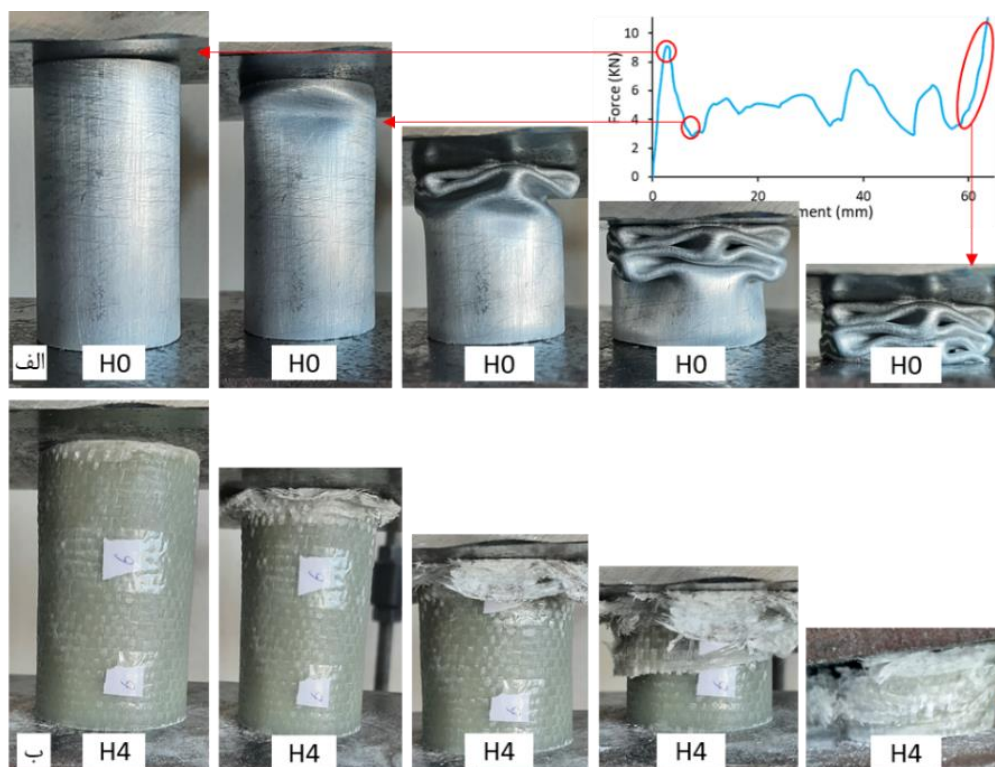
شکل ۷ بازدهی نیروی لهیدگی نمونه‌های توخالی و فوم‌دار برای نسبت‌های مختلف ضخامت لایه کامپوزیتی به آلومینیومی

برای لوله آلومینیومی بدون لایه کامپوزیتی، افزودن فوم بازدهی نیروی لهیدگی را شدیداً افزایش می‌دهد. باید در نظر گرفت که افزودن فوم معمولاً تاثیر خاصی بر روی نیروی بیشینه شروع جذب انرژی نمی‌گذارد زیرا در مراحل اولیه لهیدگی به دلیل اینکه فوم صلبیت بسیار پایینی دارد، عمده نیرو توسط لوله تحمل می‌شود ولی با پیشروی لهیدگی، تاثیر فوم ملموس‌تر شده و نیروی میانگین لهیدگی بیشتر می‌شود، لذا مشاهده می‌شود که با افزودن فوم پلی‌یورتان همواره بازدهی نیروی لهیدگی افزایش می‌یابد. نکته دیگر نحوه تاثیر لایه کامپوزیتی بر روی این بازدهی می‌باشد، افزودن لایه کامپوزیتی در ابتدا موجب کاهش بازدهی نیروی لهیدگی شده و در ادامه با افزایش ضخامت لایه کامپوزیتی، این بازدهی را بهبود می‌دهد.

در کل با ملاحظه هر دو پارامتر جذب انرژی ویژه و بازدهی نیروی لهیدگی نمونه‌های این پژوهش، می‌توان گفت که برای کاربرد صنعتی در صورتی که نیروی کم شروع لهیدگی مطلوب باشد باید از لوله آلومینیومی پر شده با فوم پلی‌یورتان (بدون لایه کامپوزیتی) استفاده شود ولی در شرایطی که بیشترین جذب انرژی ویژه مورد نظر باشد، باید از لوله‌های هیبریدی (با ضخامت لایه کامپوزیتی ۱/۷۵ میلی‌متری) و به صورت توخالی استفاده شود.

۴-۲- نحوه تغییر شکل نمونه‌ها

در شکل ۸ مراحل لهیدگی دو نمونه H0 و H4 نشان داده شده است. تفاوت این دو نمونه در لایه کامپوزیتی آن‌ها است. مشاهده می‌شود که برای لوله آلومینیومی بدون لایه کامپوزیت، با اعمال فشار محوری، کمانش موضعی با طول خم بسیار بزرگ در سمت فک متحرک شروع شده و با ایجاد خم‌های پیوسته این روند ادامه پیدا می‌کند. وجود لایه کامپوزیتی اندکی این روند را تغییر می‌دهد، بدین شرح که در این نمونه کمانش موضعی بسیار دیرتر روی داده و طول خم آن نیز بسیار کوچک‌تر است. در واقع در این نمونه، به دلیل اتصال مناسب بین کامپوزیت و آلومینیوم، صلبیت دیواره بیشتر شده و به دنبال آن کمانش دیرتر روی می‌دهد. مشاهده می‌شود که در این نمونه لایه کامپوزیت به صورت تدریجی و پیشرونده دچار شکست می‌شود و در ناحیه پایین‌تر از این شکست، لوله آلومینیومی شکل استوانه‌ای خود را حفظ کرده است. با توجه به این موارد می‌توان گفت که لایه کامپوزیتی نه تنها خود بخشی از انرژی را جذب می‌کند، بلکه به تغییر شکل پلاستیک بهتر در لوله آلومینیومی نیز کمک کرده و قابلیت جذب انرژی آن را هم بیشتر می‌کند.



شکل ۸ مراحل لهیدگی (الف) لوله آلومینیومی توخالی و (ب) لوله هیبریدی توخالی با ضخامت لایه کامپوزیت ۱/۷۵ میلی‌متر

در شکل ۹ نحوه تغییر شکل نمونه‌های مختلف تحت بارگذاری لهیدگی را نشان می‌دهد، باید در نظر گرفت که هرچقدر لوله آلومینیومی دارای چین‌خوردگی و تعداد خم‌های بیشتری باشد، به منزله بیشتر بودن جذب انرژی توسط آن می‌باشد. با توجه به این مسئله، مشخص می‌شود که برای لوله آلومینیومی توخالی و بدون لایه کامپوزیتی (شکل ۹-الف) بهره‌وری بسیار پایین است، چراکه در طول لوله کلا ۴ خم با پهناهای بسیار بزرگ ایجاد شده است. با افزودن فوم به داخل این لوله (شکل ۹-ب) شرایط بسیار مطلوب‌تر می‌شود به گونه‌ای که تعداد خم در لوله آلومینیومی به ۶ عدد افزایش می‌یابد. لذا حضور فوم در این نمونه نه تنها منجر به جذب انرژی توسط خود فوم می‌شود، بلکه قابلیت جذب انرژی لوله آلومینیومی را نیز به صورت ملموسی افزایش می‌دهد. این نتایج کاملاً منطبق بر نتایج ارائه شده در شکل ۶ است که نشان می‌داد افزودن فوم به این لوله میزان جذب انرژی ویژه آن را در حدود ۱۵ درصد بیشتر می‌کند. در واقع مود تغییر شکل لوله آلومینیومی توخالی در نمونه H0 به صورت الماسی می‌باشد ولی افزودن فوم به داخل آن مود تغییر شکل را به کونسرتینا^۱ و ترکیبی از آن‌ها تبدیل می‌کند که یک مود لهیدگی بهینه محسوب می‌شود.

^۱ Concertina Mode

با افزایش ضخامت لایه کامپوزیتی روند فوق کم‌تر دیده می‌شود، برای مثال در نمونه هیبریدی با $1/75$ میلی‌متر ضخامت لایه کامپوزیت، تفاوت محسوسی بین نمونه توخالی (شکل ۹-پ) و توپر (شکل ۹-ج) از بابت مود تغییر شکل دیده نمی‌شود و البته میزان جذب انرژی این نمونه‌ها نیز بیانگر همین مسئله است (شکل ۶). در این نمونه فوم پلی‌یورتان وزن را بیشتر کرده است بدون آن‌که تاثیر مثبتی بر جذب انرژی بگذارد و لذا جذب انرژی ویژه نمونه کم‌تر شده است. البته باید در نظر گرفت که در این نمونه‌ها، خود لایه کامپوزیتی مود تغییر شکل لوله آلومینیومی را اندکی بهبود داده است و از حالت مود الماسی نمونه H0 خارج کرده و طول خم‌ها را کمتر نموده است. لذا می‌توان گفت که لوله آلومینیومی توخالی و بدون لایه کامپوزیتی از نظر جذب انرژی شرایط بهینه‌ای محسوب نمی‌شود و افزودن فوم و یا لایه‌های کامپوزیتی به آن، موجب بهره‌وری بیشتر از بابت قابلیت جذب انرژی آن می‌شود.



شکل ۹ مود تغییر شکل نمونه‌های مختلف تحت لهدگی: الف) لوله آلومینیومی توخالی و ب) توپر بدون لایه کامپوزیتی، پ) لوله هیبریدی توخالی و ج) توپر با لایه کامپوزیتی به ضخامت $1/75$ میلی‌متر.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله قابلیت جذب انرژی لوله‌های هیبریدی با ضخامت‌های مختلف لایه کامپوزیتی در شرایط توخالی و پر شده با فوم پلی‌یورتان، به صورت تجربی و با استفاده از آزمون فشار شبه‌استاتیکی محوری مطالعه شدند. برای ارزیابی قابلیت جذب انرژی نمونه‌ها، کمیت‌های جذب انرژی ویژه و بازدهی نیروی لهدگی نمونه‌ها و همچنین مود تغییر شکل نمونه‌ها به کار گرفته شدند. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده به شرح زیر است:

- افزایش ضخامت لایه کامپوزیتی لوله هیبریدی، هم در شرایط لوله خالی و هم پر شده با فوم پلی‌یورتان، موجب افزایش مشهود جذب انرژی ویژه و همچنین بازدهی نیروی لهدگی آن می‌شود.
- افزودن فوم پلی‌یورتان با چگالی آزاد به داخل لوله آلومینیومی (بدون لایه کامپوزیتی)، به دلیل ایجاد تاخیر در کمانش موضعی و کوتاه شدن طول خم‌ها، موجب بهبود ۱۰ درصدی جذب انرژی ویژه و ۳۶ درصدی بازدهی نیروی لهدگی آن می‌شود؛ با این وجود در حضور لایه‌های کامپوزیتی ضخیم، این تاثیر کم اهمیت و حتی منفی می‌شود.
- مود تغییر شکل لوله آلومینیومی بدون لایه کامپوزیتی به صورت الماسی می‌باشد که با افزودن فوم به داخل آن، به مود کونسرتینا تبدیل می‌شود؛ همچنین افزایش ضخامت لایه کامپوزیتی موجب بهبود مود تغییر شکل آن از الماسی به کونسرتینا می‌شود. با این حال، افزودن فوم در ضخامت‌های بالای لایه کامپوزیتی تاثیر بر روی مود تغییر شکل ندارد.

References

- [1] Baroutaji A, Sajjia M, Olabi AG. On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. *Thin-Walled Structures*. 2017 Sep 1;118:137-63. doi: [10.1016/j.tws.2017.05.018](https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.05.018)
- [2] Elyasi M, Moradpour A, Montazeri S. Axial crushing in a novel technique of thin-walled tube. *Key Engineering Materials*. 2014 Oct 15;622:709-16. doi: [10.4028/www.scientific.net/KEM.622-623.709](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.622-623.709)
- [3] Moradpour A, Elyasi M, Montazeri S. Developing a new thin-walled tube structure and analyzing its crushing performance for aa 60601 and mild steel under axial loading. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2016 Jul;69:1107-17. doi: [10.1007/s12666-015-0629-2](https://doi.org/10.1007/s12666-015-0629-2)
- [4] Montazeri S, Elyasi M, Moradpour A. Investigating the energy absorption, SEA and crushing performance of holed and grooved thin-walled tubes under axial loading with different materials. *Thin-Walled Structures*. 2018 Oct 1;131:646-53. doi: [10.1016/j.tws.2018.07.024](https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.024)
- [5] Pol MH, Rezaei Golshan N. Experimental study on the parameters affecting behavior of glass/epoxy composite tubes under axial impact loading. *Modares Mechanical Engineering*. 2018 Aug 10;18(4):79-89. doi: [20.1001.1.10275940.1397.18.4.21.4](https://doi.org/20.1001.1.10275940.1397.18.4.21.4) [In Persian]
- [6] Liu Q, Ma J, He Z, Hu Z, Hui D. Energy absorption of bio-inspired multi-cell CFRP and aluminum square tubes. *Composites Part B: Engineering*. 2017 Jul 15;121:134-44. doi: [10.1016/j.compositesb.2017.03.034](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.034)
- [7] Zal V, Naeini HM, Bahramian AR, Sinke J. Investigation of the effect of temperature and layup on the press forming of polyvinyl chloride-based composite laminates and fiber metal laminates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017 Mar;89:207-17. doi: [10.1007/s00170-016-9075-5](https://doi.org/10.1007/s00170-016-9075-5)
- [8] Zal V, Naeini HM, Bahramian AR, Abbaszadeh B. Experimental evaluation of blanking and piercing of PVC based composite and hybrid laminates. *Advances in Manufacturing*. 2016 Sep;4:248-56. doi: [10.1007/s40436-016-0147-4](https://doi.org/10.1007/s40436-016-0147-4)
- [9] Mansor MA, Ahmad Z, Abdullah MR. Crashworthiness capability of thin-walled fibre metal laminate tubes under axial crushing. *Engineering Structures*. 2022 Feb 1;252:113660. doi: [10.1016/j.engstruct.2021.113660](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113660)
- [10] Hwang SF, Wu CY, Liu HK. Crashworthiness of aluminum-composite hybrid tubes. *Applied Composite Materials*. 2021 Apr;28:409-26. doi: [10.1007/s10443-020-09851-1](https://doi.org/10.1007/s10443-020-09851-1)
- [11] Zhang Z, Liu Q, Fu J, Lu Y. Parametric study on the crashworthiness of the Al/CFRP/GFRP hybrid tubes under quasi-static crushing. *Thin-Walled Structures*. 2023 Nov 1;192:111156. doi: [10.1016/j.tws.2023.111156](https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111156)
- [12] Tayyebati M, Ahmadi H, Liaghat G. Experimental and numerical investigation on crushing of metal-composite hybrid energy absorber under a quasi-static loading. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Jan 21;6(8):54-66. [In Persian]
- [13] Askari M, Javadi M, Eslami Farsani R, Geranmayeh A. The assessment of energy absorption capability of aluminum/epoxy-glass fibers laminates after exposure to the thermal cycling. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Apr 21;9(2):30-40. doi: [10.22034/IJME.2022.157560](https://doi.org/10.22034/IJME.2022.157560) [In Persian]
- [14] Sun G, Chen D, Zhu G, Li Q. Lightweight hybrid materials and structures for energy absorption: A state-of-the-art review and outlook. *Thin-Walled Structures*. 2022 Mar 1;172:108760. doi: [10.1016/j.tws.2021.108760](https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108760)
- [15] Mert SK, Güler MA, Altin M, Acar E, Çiçek A. Crashworthiness evaluation of hybrid tubes made of GFRP composite and aluminum tubes filled with honeycomb structures. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2023 Jun;45(6):291. doi: [10.1007/s40430-023-04180-3](https://doi.org/10.1007/s40430-023-04180-3)
- [16] Sun G, Wang Z, Yu H, Gong Z, Li Q. Experimental and numerical investigation into the crashworthiness of metal-foam-composite hybrid structures. *Composite structures*. 2019 Feb 1;209:535-47. doi: [10.1016/j.compstruct.2018.10.051](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.051)
- [17] Tomin M, Kmetty Á. Polymer foams as advanced energy absorbing materials for sports applications—A review. *Journal of Applied Polymer Science*. 2022 Mar 5;139(9):51714. doi: [10.1002/app.51714](https://doi.org/10.1002/app.51714)
- [18] Yao S, Chen Z, Xu P, Li Z, Zhao Z. Experimental and numerical study on the energy absorption of polyurethane foam-filled metal/composite hybrid structures. *Metals*. 2021 Jan 9;11(1):118. doi: [10.3390/met11010118](https://doi.org/10.3390/met11010118)
- [19] Hussein RD, Ruan D, Lu G, Guillow S, Yoon JW. Crushing response of square aluminium tubes filled with polyurethane foam and aluminium honeycomb. *Thin-Walled Structures*. 2017 Jan 1;110:140-54. doi: [10.1016/j.tws.2016.10.023](https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.10.023)
- [20] Zal V, Moslemi Naeini H, Bahramian AR, Abdollahi H. Evaluation of the effect of aluminum surface treatment on mechanical and dynamic properties of PVC/aluminum/fiber glass fiber metal laminates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2017 Dec;231(6):1197-205. doi: [10.1177/0954408916657371](https://doi.org/10.1177/0954408916657371)