



ارزیابی عملکرد جذب انرژی لوله‌های جدار نازک پلیمری تولید شده به روش چاپ سه بعدی در مقایسه با لوله‌های فلزی در کاربردهای ایمنی

رزگار حسن‌زاده^{۱*}، وحید مدانلو^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: r.hasanzadeh@kut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۳ اردیبهشت ۱۴۰۴

پذیرش: ۲۶ مرداد ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

لوله‌های جدار نازک

چاپ سه بعدی

جذب انرژی

پلیمر

مقاومت در برابر تصادف

لوله‌های جدار نازک پلیمری تولید شده به روش چاپ سه بعدی از جنس پلی‌لاکتیک اسید به دلیل مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی توانایی جایگزینی لوله‌های فلزی را در صنایع مختلف از جمله حمل‌ونقل و هوافضا دارا هستند. تحقیق حاضر به بررسی خواص جذب انرژی تحت بار فشاری محوری لوله‌های جدار نازک پلیمری تولید شده به روش چاپ سه بعدی در ضخامت‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با لوله‌های جدار نازک آلومینیومی می‌پردازد. به این منظور، لوله‌های پلیمری با ضخامت‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر به روش لایه نشانی ذوبی، چاپ سه بعدی شده و سپس خواص جذب انرژی آن‌ها از جمله نیروی بیشینه اولیه، جذب انرژی ویژه، نیروی لهیدگی میانگین و بازده نیروی لهیدگی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که لوله‌های پلیمری با ضخامت ۴ میلی‌متر در مقایسه با لوله‌های آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر عملکرد بهتری در جذب انرژی ویژه و نیروی لهیدگی میانگین داشتند. لوله‌های جدار نازک پلیمری با ضخامت ۴ میلی‌متر، نیروی لهیدگی میانگین ۳۲/۹۵ کیلو نیوتن را نشان دادند که ۳۶٪ نسبت به لوله‌ی جدار نازک آلومینیومی بیشتر بود. همچنین، بازده نیروی لهیدگی لوله‌های جدار نازک پلیمری ۷۵/۰۱٪ بود که از لوله آلومینیومی با بازده نیروی لهیدگی ۵۸/۴۸٪ بالاتر بود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که لوله‌های جدار نازک پلیمری می‌توانند به‌عنوان جایگزینی مناسب برای لوله‌های فلزی در کاربردهای جذب انرژی استفاده شوند، به‌ویژه در مواردی که نیاز به کاهش وزن و افزایش عملکرد در برابر نیروهای فشاری و تصادف‌ها باشد.

Evaluation of energy absorption performance of 3D printed thin-walled polymer tubes and comparison with metal tubes in safety applications

Rezgar Hasanzadeh^{1*}, Vahid Modanloo²

1- Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

* Corresponding Author's Email: r.hasanzadeh@kut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 3 May 2025

Accepted: 17 August 2025

Keywords:

Thin-Walled Tubes

3D Printing

Energy Absorption

Polymers

Crashworthiness

Abstract

Thin-walled polymeric tubes made from polylactic acid (PLA) via 3D printing have the potential to replace metallic tubes in various industries, including transportation and aerospace, due to their environmental and economic advantages. This study investigates the mechanical properties and energy absorption performance of 3D-printed thin-walled polymeric tubes with different thicknesses and compares them with aluminum thin-walled tubes of similar thicknesses. The aim is to evaluate the energy absorption capability and crushing parameters of the polymeric tubes in comparison with metallic tubes and to assess the effect of thickness on their performance. For this purpose, polymeric tubes with thicknesses of 2, 3, and 4 mm were fabricated using 3D printing, and their properties, including initial peak force, absorbed energy, crushing force, and crushing force efficiency, were examined. The results showed that the 4 mm thick polymeric tubes exhibited better performance in energy absorption and mean crushing force compared to 2 mm thick aluminum tubes. The 4 mm thick polymeric tubes demonstrated an absorbed energy of 0.36 kJ and a mean crushing force of 32.95 kN, which were 36% higher than those of the aluminum thin-walled tubes. Moreover, the crushing force efficiency of the polymeric thin-walled tubes was 75.01%, which was higher than the 58.48% crushing force efficiency in the aluminum tubes. These results indicate that polymeric thin-walled tubes can serve as a suitable alternative to metallic tubes in energy absorption applications, especially where weight reduction and enhanced performance under compressive forces and crushing conditions are critical.

Please cite this article using:

Hasanzadeh R, Modanloo V. Evaluation of energy absorption performance of 3D printed thin-walled polymer tubes and comparison with metal tubes in safety applications. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Aug 23;12(6):19-30. doi: 10.22034/ijme.2025.520995.2076 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

ایمنی در صنایع حمل‌ونقل از جمله خودروسازی، راه‌آهن و هوافضا، همواره یکی از دغدغه‌های اصلی طراحان و مهندسان بوده است [۱]. در این راستا، استفاده از سازه‌های جذب انرژی به منظور کاهش شدت ضربه و محافظت از جان سرنشینان، به یک ضرورت بدل شده است. یکی از پرکاربردترین این سازه‌ها، لوله‌های جدار نازک هستند که با طراحی مناسب، قادرند مقدار قابل توجهی از انرژی ناشی از برخورد را از طریق تغییرشکل پلاستیک جذب کنند [۲]. این لوله‌ها به دلیل ویژگی‌هایی مانند نسبت استحکام به وزن بالا، رفتار مکانیکی قابل پیش‌بینی و قابلیت تغییر شکل کنترل‌شده، به طور گسترده‌ای در ساخت جعبه‌های تصادف^۱، میله‌های ضد ضربه و سازه‌های جذب انرژی در وسایل نقلیه زمینی و هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳، ۴]. در میان مواد مختلف مورد استفاده برای ساخت این لوله‌ها، فلزاتی نظیر آلومینیوم به دلیل سبکی، مقاومت بالا و رفتار مطلوب در برابر ضربه، بیشترین کاربرد را داشته‌اند [۵]. با این حال، نیاز به بهبود عملکرد جذب انرژی، کاهش وزن و ارتقای قابلیت‌های تولید باعث شده است که پژوهش‌ها به سمت توسعه‌ی مواد و فناوری‌های نوین سوق پیدا کنند.

با وجود عملکرد قابل قبول لوله‌های جدار نازک فلزی در جذب انرژی، این مواد محدودیت‌هایی نیز به همراه دارند. وزن نسبتاً بالای فلزات، خطر خوردگی در محیط‌های مرطوب یا خورنده و هزینه‌های بالای تولید و شکل‌دهی، از جمله مشکلات رایج در استفاده از این لوله‌ها هستند. همچنین، انعطاف‌پذیری محدود در طراحی و ساخت قطعات سفارشی با هندسه‌های پیچیده، یکی دیگر از موانعی است که در استفاده گسترده‌تر از فلزات سنتی در سیستم‌های جذب انرژی مشاهده می‌شود. در سال‌های اخیر، به منظور غلبه بر این چالش‌ها، تمرکز تحقیقات به سمت استفاده از مواد پلیمری و ترکیبات کامپوزیتی با وزن سبک‌تر، قابلیت مقاومت مکانیکی مناسب و انعطاف در تولید معطوف شده است [۶، ۷]. پلیمرها به دلیل ویژگی‌هایی مانند وزن پایین، عدم خوردگی و قابلیت شکل‌دهی ساده، گزینه‌ای جذاب برای جایگزینی مواد فلزی به شمار می‌آیند [۸، ۹]. علاوه بر این، فناوری‌های نوظهور ساخت مانند چاپ سه‌بعدی، امکان تولید سازه‌های سفارشی، بهینه‌شده و مقرون‌به‌صرفه را فراهم کرده‌اند که می‌تواند گام مهمی در ارتقاء سیستم‌های جذب انرژی باشد [۱۰-۱۲].

فناوری چاپ سه‌بعدی، در سال‌های اخیر به عنوان یک ابزار نوآورانه برای تولید قطعات پلیمری با هندسه‌های پیچیده، کنترل ساختاری دقیق و هزینه‌ی پایین مطرح شده است [۱۳-۱۵]. این فناوری به‌ویژه در طراحی و ساخت سازه‌های سبک‌وزن با قابلیت جذب انرژی بالا، نظیر ضربه‌گیرها و اجزای ایمنی در صنایع حمل‌ونقل، هوافضا و تجهیزات پزشکی، کاربرد گسترده‌ای یافته است [۱۶، ۱۷]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که با انتخاب مناسب پارامترهای فرآیند و مواد مصرفی، می‌توان خواص مکانیکی از جمله مقاومت فشاری و ظرفیت جذب انرژی قطعات چاپ‌شده را به‌طور چشمگیری بهبود بخشید.

هدایت و همکاران [۱۸] به بررسی تأثیر پارامترهای چاپ (قطر نازل، ارتفاع لایه، دمای نازل و سرعت چاپ)، ابعاد (ضخامت دیوار) و جنس رشته بر عملکرد ایمنی تصادفی لوله‌های جدار نازک چندسولوی پلیمری پرداخته‌اند. در این تحقیق از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌ها و تحلیل اثرات پارامترهای مختلف استفاده شده است. این تحقیق با ارزیابی پارامترهای مختلف به دنبال بهینه‌سازی ساختارهای سبک‌تر با قابلیت جذب انرژی بالاتر است که می‌تواند ایمنی مسافران را بهبود بخشد و سیستم‌های حمل‌ونقل را ایمن‌تر کند. عبد‌ال-حلیم و همکاران [۱۹] در راستای بهبود عملکرد جذب انرژی در ساختارهای جدار نازک پلیمری، به بررسی نقش ویژگی‌های هندسی و طراحی موضعی این سازه‌ها پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از یک رویکرد نوین در این زمینه که استفاده از برش‌ها و حفره‌های طراحی‌شده در بدنه لوله‌ها است، سعی داشتند به طور مؤثری بر شاخص‌های ایمنی تصادفی از جمله کاهش نیروی بیشینه اولیه و افزایش انرژی جذب‌شده تأثیرگذار باشند. تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که عواملی همچون قطر، تعداد و محل قرارگیری این حفره‌ها تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد جذب انرژی دارند. به طور خاص، انتخاب مناسب پارامترهای طراحی می‌تواند نیروی بیشینه اولیه را به میزان چشمگیری کاهش و انرژی جذب شده را افزایش دهد. تونای و برداکچی [۲۰] در راستای ارزیابی عملکرد ایمنی تصادفی لوله‌های جدار نازک چندسولوی پلیمری، به بررسی تأثیر هندسه مقطع لوله‌ها، به‌ویژه لوله‌های با مقطع مربعی و شش‌ضلعی، بر جذب انرژی و عملکرد ایمنی آن‌ها پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که لوله‌های با مقاطع مربعی و شش‌ضلعی عملکرد بهتری در جذب انرژی دارند و با افزایش تعداد گوشه‌ها در ساختار لوله‌های چندسولوی، ظرفیت جذب انرژی به طور چشمگیری افزایش

¹ Crash Boxes

می‌یابد. همچنین، بررسی مواد مختلف نشان می‌دهد که لوله‌های تولید شده از پلی‌لاکتیک اسید عملکرد بهتری نسبت به لوله‌های ساخته شده از اکریلونیتریل بوتادین استایرن دارند. عود الله و همکاران [۲۱] برای بهبود رفتار جذب انرژی سازه‌های چاپ سه‌بعدی شده، به بررسی نحوه طراحی الگوی پرشدگی داخلی آنها پرداختند. بررسی‌ها نشان داده است که انتخاب الگوی مناسب می‌تواند به طور مؤثری بر مقاومت به ضربه، میزان انرژی جذب شده و نحوه تغییر شکل سازه تحت بارگذاری جانبی تأثیر بگذارد. در این راستا، استفاده از الگوهای مختلف مانند دایره‌ای، مربعی، مثلثی، زیگزاگ و ضربدری در ساخت لوله‌های پلیمری، تفاوت‌های قابل توجهی در عملکرد جذب انرژی ایجاد کرده است. نتایج حاکی از آن است که الگوهای زیگزاگ و مثلثی عملکرد بهتری در جذب انرژی و تحمل بار اولیه داشته‌اند، در حالی که الگوی دایره‌ای عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان داده است. ماتیاژگان و همکاران [۲۲] در زمینه بهبود خواص مکانیکی لوله‌های جدار نازک پلیمری چاپ سه‌بعدی شده، استفاده از مواد تقویت‌کننده طبیعی مانند ذرات هیدروکسی‌آپاتیت استخراج‌شده از ضایعات دریایی در ماتریس پلی‌لاکتیک اسید را پیشنهاد دادند. نتایج تحقیقات نشان داده که پارامترهای فرآیند چاپ، از جمله زاویه ساخت، سرعت چاپ، دمای نازل، ارتفاع لایه و عرض خط، تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری و پایداری ابعادی نمونه‌های تقویت‌شده دارند. بهینه‌سازی این پارامترها می‌تواند به توسعه سازه‌هایی با استحکام بالاتر و خطای ابعادی کمتر منجر شود که نقش مؤثری در کاربردهای زیست‌پزشکی مانند ایمپلنت‌های استخوانی ایفا می‌کند.

اگرچه لوله‌های جدار نازک فلزی عملکرد خوبی در جذب انرژی دارند، اما وزن بالا، خوردگی، هزینه تولید و محدودیت در طراحی هندسه‌های پیچیده، کاربرد آن‌ها را محدود کرده است. در نتیجه، تحقیقات اخیر به‌سوی استفاده از مواد پلیمری سبک‌وزن با مقاومت مناسب و انعطاف‌پذیری تولید معطوف شده‌اند. در راستای پاسخ به نیازهای جدید صنایع حمل‌ونقل، این تحقیق بر توسعه و ارزیابی لوله‌های جدار نازک پلیمری تمرکز دارد که به روش چاپ سه‌بعدی ساخته شده‌اند. ماده‌ی مورد استفاده در این پژوهش، پلی‌لاکتیک اسید است؛ پلیمر زیست‌تخریب‌پذیری که علاوه بر سازگاری با محیط زیست، دارای خواص مکانیکی مطلوب برای کاربردهای ساختاری سبک وزن می‌باشد. روش تولید قطعات، فرآیند چاپ سه‌بعدی است که به دلیل سهولت در ساخت اشکال پیچیده، هزینه‌ی تولید پایین و امکان سفارشی‌سازی، توجه ویژه‌ای را در حوزه‌های مهندسی به خود جلب کرده است. در این تحقیق، لوله‌های جدار نازک پلیمری با سه ضخامت مختلف (۲، ۳ و ۴ میلی‌متر) تولید شده و عملکرد جذب انرژی آن‌ها در شرایط فشاری، با لوله‌های جدار نازک آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر و ابعاد مشابه مقایسه می‌شود. هدف اصلی این مطالعه، بررسی قابلیت جایگزینی لوله‌های فلزی سنتی با لوله‌های پلیمری تولید شده به روش چاپ سه‌بعدی در کاربردهای جذب انرژی و ارتقاء ایمنی در صنایع حمل‌ونقل می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

برای تولید لوله‌های جدار نازک پلیمری از رشته پلی‌لاکتیک اسید با نام تجاری PLA+ تولید شرکت eSUN استفاده شد. پلی‌لاکتیک اسید به دلیل ویژگی‌هایی همچون زیست‌تخریب‌پذیری، قابلیت پردازش آسان در چاپ سه‌بعدی، پایداری ابعادی مناسب و خواص مکانیکی قابل قبول، یکی از پرکاربردترین پلیمرها در تحقیقات چاپ سه‌بعدی مرتبط با جذب انرژی و ساخت قطعات مهندسی سبک‌وزن محسوب می‌شود. جرم حجمی این ماده 1.23 g/cm^3 و شاخص جریان مذاب آن $5 \text{ g/10 min (190 }^\circ\text{C, 2.16 kg)}$ می‌باشد. استحکام کششی این رشته ۶۳ مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول آن ۲۰٪ است. دمای چاپ مناسب برای این رشته در بازه‌ی ۲۱۰-۲۳۰ درجه سانتی‌گراد و دمای صفحه گرم در بازه‌ی ۴۵-۶۰ درجه سانتی‌گراد توسط شرکت سازنده گزارش شده است.

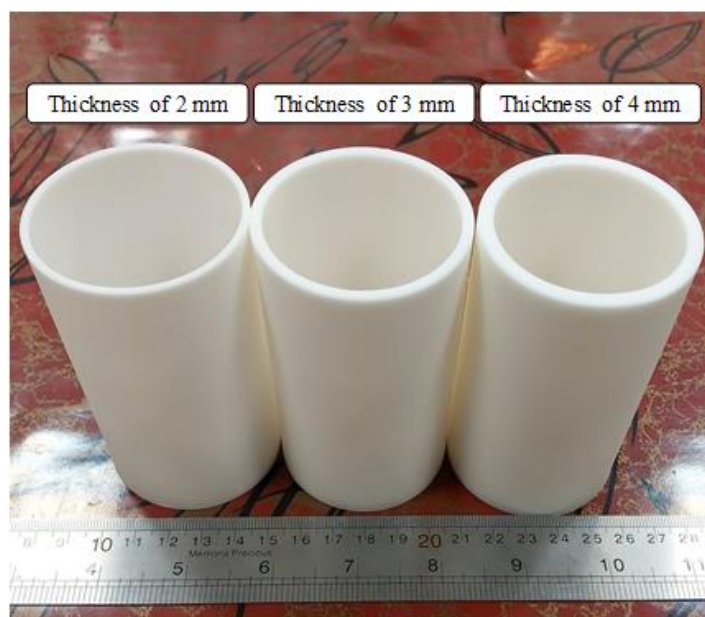
۲-۲- فرآیند تولید لوله‌های جدار نازک پلیمری

برای تولید لوله‌های جدار نازک پلیمری از چاپگر شرکت Creality مدل Ender-3 V3 Plus استفاده شده است. به این منظور ابتدا لوله‌های جدار نازک در نرم‌افزار SolidWorks طراحی شدند و سپس با کمک نرم‌افزار Creality Print Slicer جی-کدهای مربوط به تولید لوله‌ها استخراج شدند. لوله‌های جدار نازک پلیمری با سه ضخامت مختلف ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر با ارتفاع ۹۶ میلی‌متر و قطر خارجی ۵۵ میلی‌متر طراحی و تولید شدند که شکل ۱ نمونه‌های طراحی شده در نرم‌افزار SolidWorks را نشان می‌دهد. همچنین به عنوان مرجعی برای مقایسه‌ی عملکرد لوله‌های جدار نازک پلیمری، از داده‌های مربوط به یک لوله‌ی آلومینیومی از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با طول و قطر یکسان و با ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است [۲۳].



شکل ۱ لوله‌های جدار نازک طراحی شده در SolidWorks با ضخامت‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر

برای چاپ لوله‌های جدار نازک از الگوی چاپ مربعی با درصد پر شدن ۱۰۰٪، سرعت چاپ ۳۰۰ میلی‌متر بر ثانیه، ضخامت لایه ۰/۲ میلی‌متر، تعداد دیواره ۲، دمای چاپ ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و دمای صفحه گرم ۶۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. شکل ۲ نمونه‌هایی از لوله‌های جدار نازک تولید شده به روش چاپ سه بعدی را در ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد.

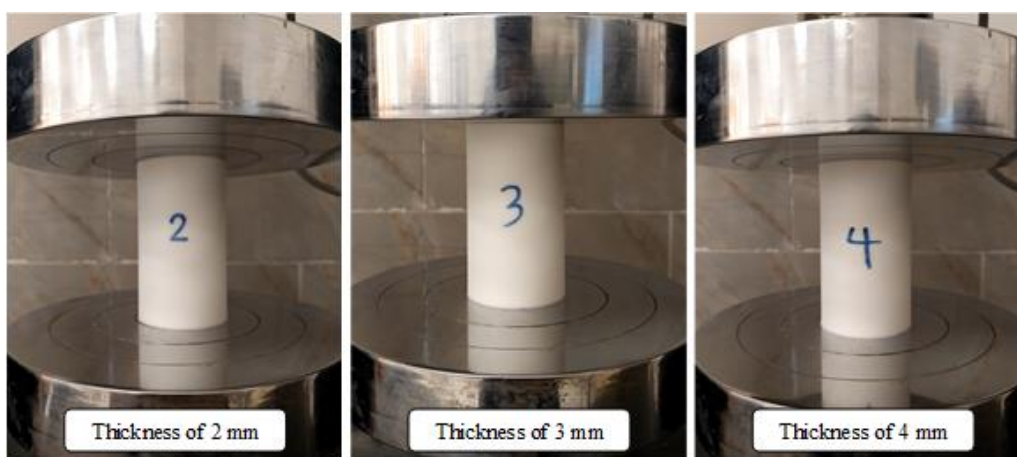


شکل ۲ لوله‌های جدار نازک پلیمری تولید شده به روش چاپ سه بعدی با ضخامت‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر

۲-۳- بررسی خواص

برای بررسی میزان جذب انرژی لوله‌های جدار نازک و مقایسه خواص مکانیکی لوله‌های پلیمری و لوله‌ی آلومینیومی از آزمون فشار استفاده شد. از دستگاه آزمون فشار STM-150 شرکت سنتام با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه کمک گرفته شد. شکل ۳ تصویر لوله‌های جدار نازک پلیمری با ضخامت‌های مختلف را زیر فک‌های دستگاه فشار نشان می‌دهد. از آنجاییکه هدف اصلی این تحقیق، انجام یک مطالعه مقدماتی مقایسه‌ای بین رفتار جذب انرژی لوله‌های جدار نازک پلیمری تولید شده به روش چاپ سه‌بعدی و لوله‌های جدار

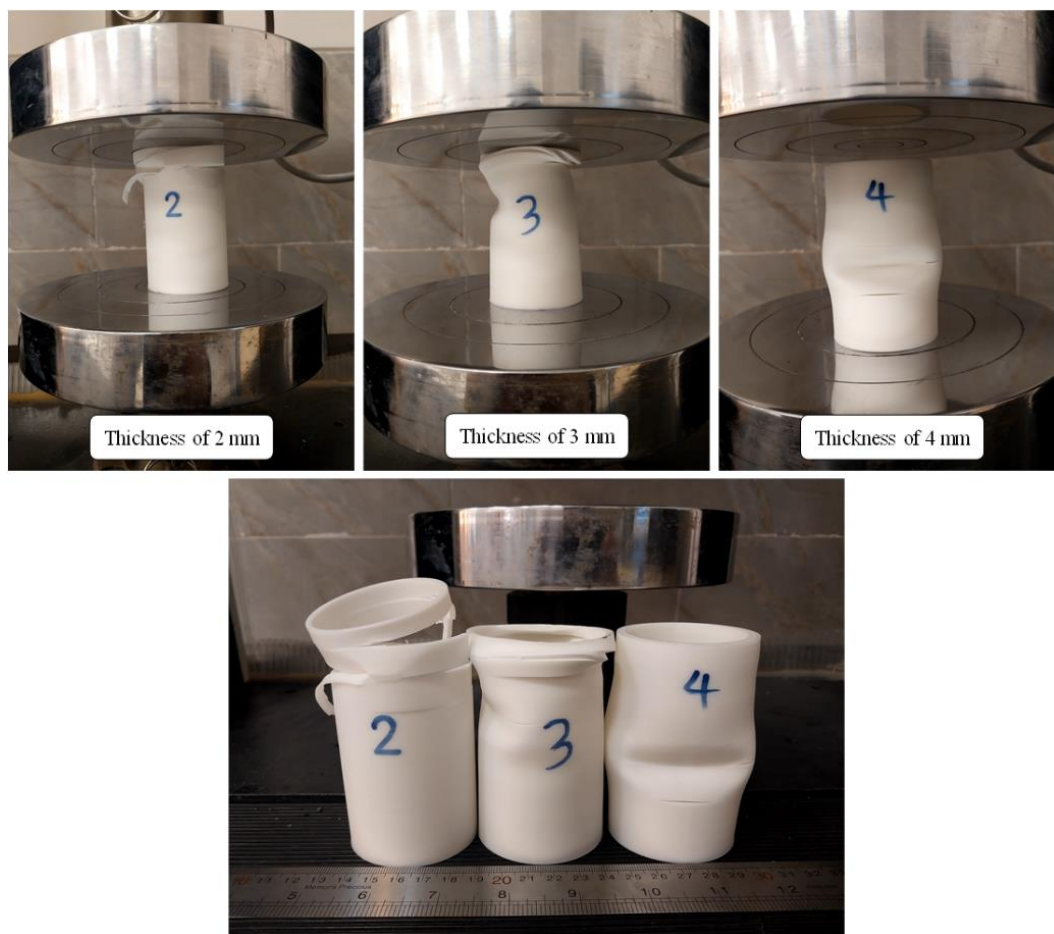
نازک آلومینیومی بوده است، به‌منظور تضمین مقایسه‌ای منصفانه و علمی، تمامی نمونه‌های پلیمری در ابعاد هندسی مشابه (به جز ضخامت که متغیر است) با نمونه‌های آلومینیومی ارائه شده در تحقیق [۲۳] طراحی و چاپ شدند. با توجه به ماهیت اولیه و اکتشافی تحقیق و نیز با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود در هزینه‌های مربوط به تهیه مواد اولیه و فرآیند چاپ سه‌بعدی، برای هر تست یک نمونه تولید و آزمایش گردید. با این حال، نتایج به‌دست‌آمده دارای روندی منطقی و قابل تحلیل بوده‌اند که نشان‌دهنده اعتبار و دقت نسبی داده‌هاست. نتایج و داده‌های ارائه شده مربوط به لوله‌های جدار نازک پلیمری حاصل از آزمایش‌های انجام گرفته در تحقیق حاضر بوده است و نتایج مربوط به لوله‌های جدار نازک آلومینیومی از مرجع [۲۳] استخراج شده است.



شکل ۳ لوله‌های جدار نازک پلیمری حین انجام آزمون فشار با ضخامت‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر

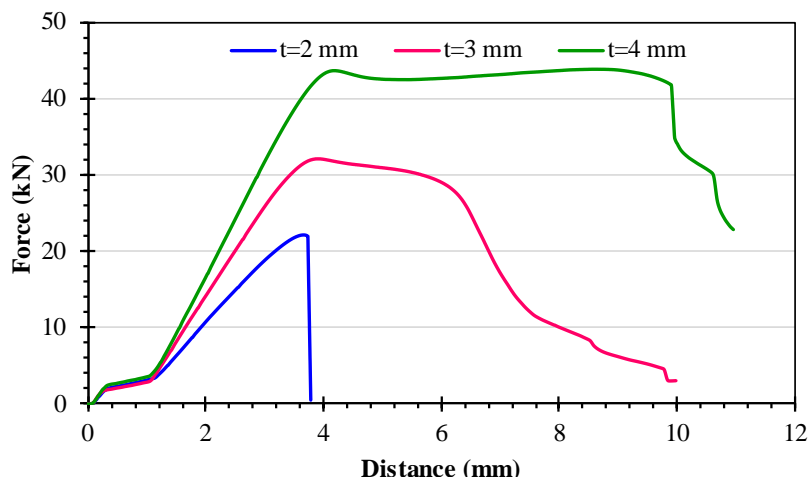
۳- نتایج و بحث

با انجام آزمون فشار بر روی لوله‌های جدار نازک، نمودارهای نیرو-جابجایی برای لوله‌های جدار نازک پلیمری در ضخامت‌های مختلف استخراج گردید. شکل ۴ تصاویر لوله‌های جدار نازک پلیمری پس از آزمون فشار به همراه نحوه شکست آن‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به روش ساخت این لوله‌ها به صورت لایه‌به‌لایه و دایره‌ای در راستای محور طولی توسط فناوری چاپ سه‌بعدی، نحوه شکست نمونه‌ها تحت تأثیر مستقیم ساختار لایه‌ای آن‌ها قرار گرفته است. در نمونه‌های پلیمری با ضخامت‌های مختلف، رفتار شکست متفاوتی مشاهده شد که نشان‌دهنده نقش مؤثر ضخامت دیواره در بهبود استحکام مکانیکی می‌باشد. در نمونه‌های با ضخامت ۲ میلی‌متر، شکست عمدتاً از طریق جدایش لایه‌ها از یکدیگر اتفاق افتاد. لایه‌های نزدیک به فک دستگاه آزمون تحت اثر نیروی فشاری، از هم جدا شده و گسیختگی به صورت آشکار در سطح نمونه مشاهده گردید. این پدیده به وضوح نشان می‌دهد که چسبندگی بین لایه‌ها در ضخامت پایین‌تر نسبتاً ضعیف‌تر است و تحت بارگذاری فشاری به راحتی از یکدیگر جدا می‌شوند. با افزایش ضخامت به ۳ میلی‌متر، همچنان جدایش لایه‌ها مشاهده شد اما شدت آن نسبت به نمونه‌ی ۲ میلی‌متری کاهش یافته بود. در این نمونه‌ها، علاوه بر جدایش‌های موضعی، نواحی‌ای نیز دیده شد که تنها تغییرشکل پلاستیک به صورت تو رفتگی در دیواره‌ی لوله ایجاد شده بود، بدون آنکه لایه‌ها کاملاً از هم گسیخته شوند. این رفتار نشان‌دهنده بهبود چسبندگی بین لایه‌ها با افزایش ضخامت و در نتیجه، افزایش مقاومت در برابر نیروی فشاری می‌باشد. در نمونه‌های با ضخامت ۴ میلی‌متر، رفتار مکانیکی لوله‌ها به طور چشمگیری بهبود یافته بود. در این نمونه‌ها، جدایش لایه‌ای تقریباً مشاهده نشد و ساختار لوله تحت فشار به صورت یکپارچه رفتار کرد. تغییرشکل پلاستیک عمدتاً به صورت فشردگی و تغییر فرم یکنواخت در طول نمونه اتفاق افتاد. این موضوع حاکی از آن است که در ضخامت بالاتر، پیوند بین لایه‌های چاپ‌شده به حدی تقویت می‌شود که لوله قادر است مانند یک ساختار یکپارچه و بدون گسیختگی لایه‌ای در مقابل تنش‌های فشاری مقاومت نماید. به طور کلی، نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که افزایش ضخامت دیواره‌ی لوله‌های جدار نازک پلیمری تولید شده به روش چاپ سه‌بعدی، منجر به بهبود چشمگیر در مقاومت فشاری و عملکرد جذب انرژی آن‌ها می‌شود. این بهبود را می‌توان به افزایش چسبندگی بین لایه‌ها و افزایش سطح مقطع مؤثر در تحمل نیرو نسبت داد. از این رو، انتخاب ضخامت مناسب دیواره در طراحی قطعات پلیمری تولید شده با روش چاپ سه بعدی نقش کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد مکانیکی آن‌ها خواهد داشت.



شکل ۴ لوله‌های جدار نازک پلیمری پس از انجام آزمون فشار با ضخامت‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر

شکل ۵ نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از آزمون فشار برای لوله‌های جدار نازک پلیمری با ضخامت‌های مختلف را نمایش می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لوله‌های پلیمری، هم میزان نیروی قابل تحمل و هم میزان جابجایی تا شکست نهایی افزایش یافته است. به عبارت دیگر، افزایش ضخامت موجب بهبود همزمان استحکام مکانیکی و شکل‌پذیری لوله‌های پلیمری شده است. این مشاهده با نتایج حاصل از بررسی‌های بصری نمونه‌ها پس از آزمون (شکل ۴) در تطابق کامل است. در واقع، بهبود چسبندگی بین لایه‌های چاپ‌شده و افزایش سطح مقطع مؤثر در ضخامت‌های بالاتر باعث شده است که لوله‌ها بتوانند نیروی بیشتری را بدون گسیختگی اولیه تحمل کرده و تغییرشکل‌های بزرگتری را تجربه کنند. این رفتار نشان‌دهنده‌ی افزایش توانایی جذب انرژی با افزایش ضخامت دیواره‌ی لوله‌های جدار نازک می‌باشد. در مقایسه بین لوله‌های پلیمری و لوله‌ی آلومینیومی، نتایج نشان می‌دهد که لوله‌ی آلومینیومی دارای جابجایی بیشتری در مقایسه با لوله‌های پلیمری است. این رفتار را می‌توان به خواص ذاتاً شکل‌پذیرتر آلومینیوم نسبت داد. با این حال، نکته‌ی قابل توجه این است که لوله‌های جدار نازک پلیمری توانسته‌اند نیروهای فشاری قابل ملاحظه‌ای را تحمل کنند و حتی در نمونه‌ی با ضخامت ۴ میلی‌متر، نیروی تحمل شده توسط لوله‌ی پلیمری بیشتر از نیروی تحمل شده توسط لوله‌ی آلومینیومی بوده است. البته لازم به ذکر است که لوله‌ی پلیمری با ضخامت ۴ میلی‌متر دارای ضخامت دو برابر نسبت به لوله‌ی آلومینیومی (با ضخامت ۲ میلی‌متر) می‌باشد و این تفاوت باید در تحلیل مقایسه‌ای مدنظر قرار گیرد. به طور کلی، این نتایج نشان‌دهنده‌ی پتانسیل قابل توجه لوله‌های جدار نازک پلیمری تولید شده به روش چاپ سه‌بعدی برای استفاده در کاربردهای جذب انرژی به عنوان جایگزینی سبک‌تر و اقتصادی‌تر نسبت به فلزات سنتی می‌باشد. در ادامه، به منظور تحلیل دقیق‌تر عملکرد جذب انرژی، پارامترهای مربوط به میزان انرژی جذب‌شده توسط لوله‌های مختلف استخراج و مقایسه می‌شود. شایان ذکر است که با توجه به محدودیت تعداد نمونه‌ها، این مطالعه صرفاً به عنوان یک ارزیابی رفتاری مقدماتی و مقایسه کیفی طراحی شده است و هدف آن ارائه روند کلی رفتار جذب انرژی است، نه تحلیل آماری کامل.



شکل ۵ نتایج آزمون فشار برای لوله‌های جدار نازک پلیمری با ضخامت‌های مختلف

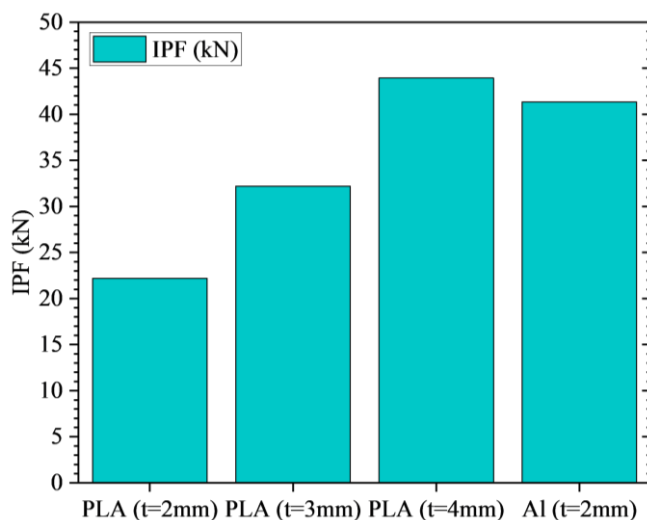
شکل ۶ نتایج مربوط به نیروی بیشینه اولیه^۱ لوله‌های جدار نازک پلیمری و آلومینیومی را نشان می‌دهد. نیروی بیشینه اولیه به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد قطعات جذب انرژی در کاربردهای مربوط به ایمنی حمل‌ونقل شناخته می‌شود [۲۱، ۲۴]. بر اساس گزارش‌های پیشین [۲۵، ۲۶] پایین بودن مقدار نیروی بیشینه اولیه مطلوب‌تر است، چرا که از انتقال ناگهانی انرژی تصادف به بدنه‌ی اصلی جلوگیری می‌کند و در نتیجه، میزان آسیب وارده به ساختار اصلی را کاهش می‌دهد. مطابق با نتایج به‌دست آمده، لوله‌ی جدار نازک پلیمری با ضخامت ۲ میلی‌متر کمترین مقدار نیروی بیشینه اولیه را برابر با ۲۲/۲۰ کیلو نیوتن ارائه کرده است. با افزایش ضخامت دیواره‌ی لوله‌های پلیمری، مقدار نیروی بیشینه اولیه به طور قابل توجهی افزایش یافته است به طوری که برای ضخامت ۳ میلی‌متر این مقدار به ۳۲/۲۰ کیلو نیوتن و برای ضخامت ۴ میلی‌متر به ۴۳/۹۳ کیلو نیوتن رسیده است. این روند افزایشی بیانگر آن است که افزایش ضخامت لوله‌ها سبب بهبود مقاومت اولیه آن‌ها در برابر بارگذاری فشاری شده اما در عین حال منجر به افزایش نیروی انتقالی به بدنه نیز می‌شود که در برخی کاربردها می‌تواند یک چالش به شمار آید. مقایسه‌ی لوله‌های جدار نازک پلیمری با لوله‌ی جدار نازک آلومینیومی نیز نکات قابل توجهی را آشکار می‌کند. نیروی بیشینه اولیه لوله‌ی آلومینیومی برابر با ۴۱/۳۵ کیلو نیوتن اندازه‌گیری شد که به طور محسوسی بیشتر از نیروی بیشینه اولیه‌ی لوله‌های پلیمری با ضخامت ۲ و ۳ میلی‌متر بود. این در حالی است که مقدار آن تقریباً برابر با نیروی بیشینه اولیه‌ی لوله‌ی پلیمری با ضخامت ۴ میلی‌متر است. این نتایج نشان می‌دهد که از منظر کنترل نیروی بیشینه اولیه، لوله‌های جدار نازک پلیمری خصوصاً در ضخامت‌های پایین‌تر عملکرد بهتری نسبت به لوله‌ی آلومینیومی ارائه می‌دهند. بنابراین، استفاده از این لوله‌های پلیمری می‌تواند در کاهش آسیب به ساختارهای حساس و افزایش ایمنی کلی سازه‌ها در شرایط ضربه مؤثر باشد. در مجموع، لوله‌های جدار نازک پلیمری با ضخامت‌های مناسب می‌توانند به عنوان جایگزین‌های مناسبی برای لوله‌های فلزی سنتی در سیستم‌های جذب انرژی به کار گرفته شوند، به ویژه در کاربردهایی که کنترل نیروهای اولیه‌ی وارد شده به ساختار اهمیت بالایی دارد.

شکل ۷ نتایج مربوط به میزان جذب انرژی و جذب انرژی ویژه^۲ برای لوله‌های جدار نازک پلیمری و آلومینیومی را نشان می‌دهد. جذب انرژی ویژه به عنوان نسبت جذب انرژی به جرم لوله، یکی از معیارهای کلیدی در ارزیابی کارایی جذب انرژی در سیستم‌های ایمنی به شمار می‌آید. نتایج نشان می‌دهد که لوله‌ی جدار نازک پلیمری با ضخامت ۲ میلی‌متر میزان جذب انرژی برابر با ۰/۰۴ کیلوژول را ارائه داده است. این مقدار نسبتاً پایین نشان‌دهنده‌ی ظرفیت محدود جذب انرژی لوله‌های پلیمری با ضخامت کم در مقایسه با لوله‌های آلومینیومی می‌باشد. با افزایش ضخامت لوله‌های پلیمری، جذب انرژی کل به طور محسوسی افزایش می‌یابد. به طور خاص، با افزایش ضخامت لوله به ۳ میلی‌متر، جذب انرژی افزایش یافته و به مقدار ۰/۱۶ کیلوژول می‌رسد. همچنین در لوله‌های با ضخامت ۴ میلی‌متر، جذب انرژی بیشتر افزایش یافته و به مقدار ۰/۳۶ کیلوژول می‌رسد. این تغییرات نشان‌دهنده‌ی تأثیر قابل توجه ضخامت در بهبود عملکرد لوله‌های پلیمری در جذب انرژی است. در واقع، افزایش ضخامت دیواره باعث افزایش مقاومت لوله‌ها در برابر

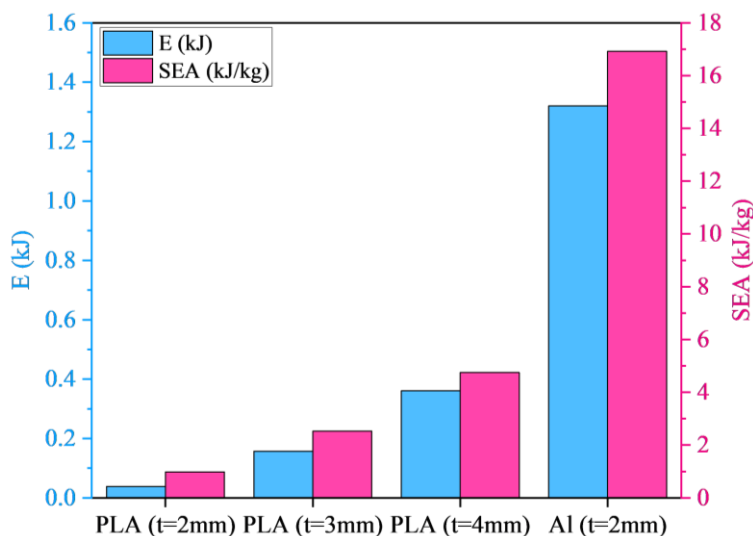
¹ Initial Peak Force

² Specific Energy Absorption

بارهای فشاری و در نتیجه افزایش میزان انرژی جذب شده می‌شود. در مقایسه با لوله‌های پلیمری، لوله‌ی جدار نازک آلومینیومی دارای جذب انرژی کل قابل توجه‌تری است. میزان جذب انرژی لوله‌ی آلومینیومی برابر با ۱/۳۲ کیلوژول اندازه‌گیری شد که به مراتب بیشتر از لوله‌های پلیمری است. این تفاوت عمده را می‌توان به خواص مکانیکی و توانایی بالاتر آلومینیوم در جذب انرژی نسبت داد. در خصوص جذب انرژی ویژه، نتایج مشابهی مشاهده می‌شود. جذب انرژی ویژه لوله‌ی جدار نازک پلیمری با ضخامت ۲ میلی‌متر برابر با ۰/۹۸ کیلوژول بر کیلوگرم است. با افزایش ضخامت لوله به ۳ میلی‌متر، جذب انرژی ویژه به ۲/۵۳ کیلوژول بر کیلوگرم و در لوله با ضخامت ۴ میلی‌متر، به ۴/۷۵ کیلوژول بر کیلوگرم افزایش می‌یابد. این تغییرات نشان‌دهنده‌ی بهبود چشمگیر جذب انرژی ویژه با افزایش ضخامت است. در مقابل، جذب انرژی ویژه لوله‌ی آلومینیومی به مقدار ۱۶/۹۲ کیلوژول بر کیلوگرم می‌رسد که به مراتب بالاتر از لوله‌های پلیمری است. نتایج این بخش نشان می‌دهد که با وجود افزایش جذب انرژی و انرژی ویژه در لوله‌های پلیمری با ضخامت‌های بیشتر، لوله‌های آلومینیومی به دلیل خواص ماده پایه‌ی خود، جذب انرژی و جذب انرژی ویژه بسیار بهتری دارند. این تفاوت قابل توجه به ویژگی‌های ساختاری آلومینیوم و توانایی بالاتر آن در تحمل بار و جذب انرژی برخوردی برمی‌گردد. بنابراین، لوله‌های آلومینیومی به‌طور کلی عملکرد بهتری در جذب انرژی و جذب انرژی ویژه نسبت به لوله‌های پلیمری دارند، هرچند که لوله‌های پلیمری با ضخامت‌های مناسب می‌توانند جایگزین‌های سبک‌تر و مقرون به صرفه‌تری در بسیاری از کاربردها باشند.

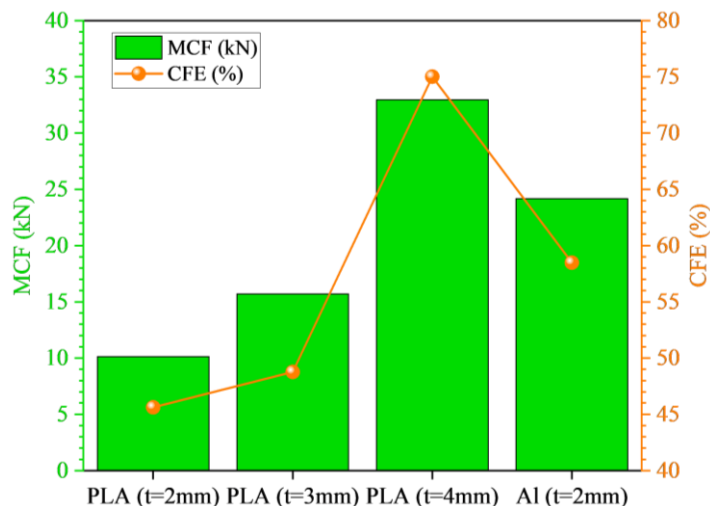


شکل ۶ نتایج مربوط به نیروی بیشینه اولیه برای لوله‌های جدار نازک پلیمری و آلومینیومی



شکل ۷ نتایج مربوط به جذب انرژی و جذب انرژی ویژه برای لوله‌های جدار نازک پلیمری و آلومینیومی

شکل ۸ نتایج مربوط به نیروی لهیدگی میانگین^۱ و بازده نیروی لهیدگی^۲ را برای لوله‌های جدار نازک پلیمری و آلومینیومی نشان می‌دهد. نیروی لهیدگی میانگین به‌طور مستقیم با میزان انرژی جذب شده و بیشینه جابجایی ارتباط دارد و نشان‌دهنده توانایی لوله در توزیع و جذب انرژی در هنگام برخورد است [۲۷، ۲۸]. بازده نیروی لهیدگی نیز به‌عنوان نسبت نیروی لهیدگی میانگین به نیروی بیشینه اولیه محاسبه می‌شود و یکی از معیارهای کلیدی در ارزیابی کارایی ساختار در برابر نیروی فشاری است [۲۹، ۳۰].



شکل ۸ نتایج مربوط به نیروی لهیدگی میانگین (MCF) و بازده نیروی لهیدگی (CFE) برای لوله‌های جدار نازک پلیمری و آلومینیومی

در این راستا، نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت لوله‌های جدار نازک پلیمری، نیروی لهیدگی میانگین و بازده نیروی لهیدگی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابند. برای لوله‌های پلیمری با ضخامت ۲ میلی‌متر، نیروی لهیدگی میانگین برابر با ۱۰/۱۳ کیلو نیوتن است. این مقدار با افزایش ضخامت به ۳ میلی‌متر افزایش می‌یابد و به ۱۵/۷۰ کیلو نیوتن می‌رسد. به‌طور مشابه، برای لوله‌های با ضخامت ۴ میلی‌متر، نیروی لهیدگی میانگین افزایش یافته و به ۳۲/۹۵ کیلو نیوتن می‌رسد. این نتایج نشان‌دهنده افزایش چشمگیر توانایی لوله‌های پلیمری در جذب و توزیع انرژی با افزایش ضخامت دیواره است. در مقایسه با لوله‌های آلومینیومی، لوله‌ی جدار نازک پلیمری با ضخامت ۴ میلی‌متر عملکرد بهتری از نظر نیروی لهیدگی میانگین دارد. به‌طور دقیق‌تر، لوله پلیمری با ضخامت ۴ میلی‌متر نیروی لهیدگی میانگین ۳۶٪ بیشتر از لوله‌ی آلومینیومی (۳۲/۹۵ کیلو نیوتن در مقابل ۲۴/۱۸ کیلو نیوتن) نشان می‌دهد. این نشان‌دهنده بهبود عملکرد جذب انرژی لوله‌های پلیمری با ضخامت‌های بیشتر نسبت به لوله‌های آلومینیومی است. در خصوص بازده نیروی لهیدگی، نتایج مشابهی مشاهده می‌شود. شایان ذکر است که بازده نیروی لهیدگی بالا مطلوب است زیرا به معنای عملکرد بالای ساختار در برابر تصادفات و برخوردها است [۳۱، ۳۲]. در لوله‌های پلیمری با ضخامت ۲ میلی‌متر، بازده نیروی لهیدگی برابر با ۴۵/۶۲٪ است. این مقدار با افزایش ضخامت به ۳ میلی‌متر به ۴۸/۷۶٪ و با افزایش به ۴ میلی‌متر، به ۷۵/۰۱٪ درصد می‌رسد. این تغییرات نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در عملکرد لوله‌های پلیمری با ضخامت بیشتر در مقایسه با لوله‌های آلومینیومی است. جالب توجه است که لوله پلیمری با ضخامت ۴ میلی‌متر بازده نیروی لهیدگی به مراتب بالاتری نسبت به لوله‌ی آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر دارد (۷۵/۰۱٪ در مقابل ۴۵/۶۲٪). این نتایج بر اهمیت انتخاب ضخامت مناسب برای لوله‌های پلیمری در بهبود کارایی جذب انرژی و عملکرد ساختاری در برابر بارهای فشاری تأکید دارند. نتایج حاصل از نیروی لهیدگی میانگین و بازده نیروی لهیدگی نشان می‌دهند که لوله‌های پلیمری با ضخامت ۴ میلی‌متر نسبت به لوله‌های آلومینیومی در این خصوص عملکرد بهتری دارند. این ویژگی ممکن است به علت بهبود چسبندگی لایه‌ها و افزایش یکپارچگی ساختاری در لوله‌های پلیمری با ضخامت بیشتر باشد. در نتیجه، لوله‌های پلیمری با ضخامت مناسب نه تنها می‌توانند عملکردی مشابه یا حتی بهتر از لوله‌های آلومینیومی در شرایط فشاری نشان دهند، بلکه به دلیل وزن سبک‌تر و هزینه پایین‌تر، می‌توانند گزینه‌های مناسبی برای کاربردهای مختلف انرژی جذب و ساختارهای ایمنی در صنایع مختلف باشند.

¹ Mean Crushing Force

² Crushing Force Efficiency

در این مطالعه، با وجود نتایج امیدوارکننده در بررسی رفتار جذب انرژی لوله‌های جدار نازک پلیمری چاپ سه‌بعدی شده در مقایسه با لوله‌های فلزی، محدودیت‌هایی نیز وجود داشت. نخست، آزمایش‌ها تنها برای تعداد محدودی از نمونه‌ها انجام شد که امکان تحلیل آماری کامل و ارزیابی عدم قطعیت نتایج را کاهش می‌دهد. دوم، نمونه‌های پلیمری با ابعاد مشابه نمونه‌های فلزی طراحی شدند که اگرچه برای مقایسه مستقیم مناسب بود، اما ممکن است بهینه‌ترین طراحی برای پلیمرها نباشد. همچنین، اثر برخی از پارامترهای مهم چاپ سه‌بعدی در حین چاپ مورد بررسی قرار نگرفت. در نهایت، مطالعه به بررسی اولیه رفتار شبه‌استاتیکی محدود شد و بررسی رفتار در شرایط دینامیکی یا بارگذاری‌های متغیر به عنوان مسیرهای تحقیقاتی آتی باقی مانده است.

۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق پتانسیل لوله‌های جدار نازک پلیمری تولید شده به روش چاپ سه بعدی با استفاده از پلی‌لاکتیک اسید را به عنوان جایگزینی مناسب برای لوله‌های فلزی در کاربردهای جذب انرژی مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت لوله‌های پلیمری، توانایی آنها در جذب انرژی و مقاومت در برابر نیروهای فشاری به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین، عملکرد لوله‌های پلیمری با ضخامت بیشتر در خصوص بازده نیروی لهیدگی موید عملکرد بهتری در مقایسه با لوله‌های فلزی است که نشان‌دهنده عملکرد بالاتر این لوله‌ها در شرایط تصادف و جذب انرژی است. مقایسه میان لوله‌های پلیمری و آلومینیومی نشان داد که هرچند لوله‌های آلومینیومی معمولاً جذب انرژی بالاتری دارند، اما لوله‌های پلیمری به ویژه با ضخامت ۴ میلی‌متر، عملکرد رقابتی خوبی در زمینه جذب انرژی و نیروی لهیدگی نشان دادند. علاوه بر این، ویژگی چاپ سه بعدی لوله‌های پلیمری امکان تنظیم آسان طراحی و ویژگی‌های ماده برای کاربردهای خاص را فراهم می‌کند و می‌تواند هزینه‌های تولید را کاهش داده و انعطاف‌پذیری بیشتری در فرآیندهای ساخت ایجاد کند. نتیجه‌گیری کلی این تحقیق نشان می‌دهد که لوله‌های جدار نازک پلیمری مبتنی بر پلی‌لاکتیک اسید می‌توانند به عنوان راه‌حلی امیدوارکننده برای ساختارهای جذب انرژی در صنایع مختلف، از جمله خودروسازی، هوافضا و دریایی، مطرح شوند. این لوله‌ها در شرایطی که کاهش وزن و عملکرد بهتر در برابر نیروهای فشاری و تصادف اهمیت دارند، می‌توانند گزینه‌ای مؤثر و اقتصادی باشند. تحقیقات آینده می‌توانند بر بهینه‌سازی پارامترهای چاپ و بررسی مواد ترکیبی دیگر برای بهبود خواص مکانیکی لوله‌های پلیمری متمرکز شوند.

References

- [1] Salimi E, Molatefi H, Rezvani M, Shahsavari E. Improving Collision Energy Absorption In High Speed Train By Using Thin Walled Tubes. *International Journal of Railway*. 2013 Sep;6(3):85-9. doi: 10.7782/IJR.2013.6.3.085
- [2] Xu F, Tian X, Li GJ. Experimental study on crashworthiness of functionally graded thickness thin-walled tubular structures. *Experimental Mechanics*. 2015 Sep;55:1339-52. doi: 10.1007/s11340-015-9994-3
- [3] Nikkhah H, Baroutaji A, Olabi AG. Crashworthiness design and optimisation of windowed tubes under axial impact loading. *Thin-Walled Structures*. 2019 Sep 1;142:132-48. doi: 10.1016/j.tws.2019.04.052
- [4] Yang C, Tian Y, Xu P, Yao S, Li Z, Alqahtani MS. Crashworthiness optimization of a multicellular thin-walled tube with triangular cells. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2022 Dec 16;29(28):7277-93. doi: 10.1080/15376494.2021.1995548
- [5] Williams BW, Oliveira DA, Simha CH, Worswick MJ, Mayer R. Crashworthiness of straight section hydroformed aluminium tubes. *International Journal of Impact Engineering*. 2007 Aug 1;34(8):1451-64. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2006.08.001
- [6] Alaziz SA, Hassan MA, El-baky MA. Crashworthiness Characteristics of Bio-inspired 3D-Printed Tubes: A Lesson from the Environment. *Fibers and Polymers*. 2024 Oct;25(10):3931-43. doi: 10.1007/s12221-024-00693-3
- [7] Mohd Hanid MH, Sharif S, Ahmad M, Suhaimi MA, Khor CY, Ismail KA. Crashworthiness performance of thin-walled structures towards design configuration in vehicle crash boxes application: a review. *International Journal of Crashworthiness*. 2025 Apr 15:1-31. doi: 10.1080/13588265.2025.2492975
- [8] Azdast T, Hasanzadeh R. Increasing cell density/decreasing cell size to produce microcellular and nanocellular thermoplastic foams: A review. *Journal of Cellular Plastics*. 2021 Sep;57(5):769-97. doi: 10.1177/0021955X20959301
- [9] Albdiry M. Effect of melt blending processing on mechanical properties of polymer nanocomposites: a review. *Polymer Bulletin*. 2024 May;81(7): 5793-821. doi: 10.1007/s00289-023-05012-z

- [10] Hasanzadeh, R. Optimization of energy absorption of additively manufactured polyamide/microcarbon fiber polymeric composites in 3D printing using Taguchi method. *Polymer Engineering & Science*. 2025 Jul;65(7):3639-49. doi: [10.1002/pen.27238](https://doi.org/10.1002/pen.27238)
- [11] Akhoundi B, Khosravian E, Modanloo V. Deposition of continuous glass fibers on a curved surface by 3D printer based on fused filament fabrication technology. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Jan 21;10(11):16-23. doi: [10.22034/ijme.2024.429126.1885](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.429126.1885) [In Persian]
- [12] Hasanzadeh R. Designing and manufacturing a novel polymeric hybrid auxetic structure using 3D printing method by combining arrow-head and missing rib structures. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2025 Jan 20;11(11):67-76. doi: [10.22034/ijme.2024.487862.2025](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.487862.2025) [In Persian]
- [13] Wang C, Wang Y, Zou F, Fang B, Zhao J, Zhang H, Guo J, Jia L, Yan D. Construction of lightweight, high-energy absorption 3D-printed scaffold for electromagnetic interference shielding with low reflection. *Composites Part B: Engineering*. 2025 Feb 15;291:112043. doi: [10.1016/j.compositesb.2024.112043](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.112043)
- [14] Hasanzadeh R, Jolaiy S, Mojaver M, Azdast T, Park CB. Auxetic 3D Printed Metastructure Stents for Enhanced Mechanical and Structural Performance and Biocompatibility in Coronary Artery Treatments. *Acta Biomaterialia*. 2025 Jun 26;202:641-659. doi: [10.1016/j.actbio.2025.06.043](https://doi.org/10.1016/j.actbio.2025.06.043)
- [15] Hasanzadeh R. Assessments of layer height, nozzle temperature and infill density and Taguchi analysis for optimisation of impact strength of biomaterial polylactic acid in 3D printing process. *Plastics, Rubber and Composites*. 2025 Mar 10:14658011251360508. doi: [10.1177/14658011251360508](https://doi.org/10.1177/14658011251360508)
- [16] Hua L, Ding L, Wang X, Zeng S, Huang H, Liang X, Wu Z. Out-of-plane energy absorption of 3D printed basalt-fiber-reinforced hierarchical honeycomb composite. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2025 Jan 1;285:109784. doi: [10.1016/j.ijmecsci.2024.109784](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109784)
- [17] Wang L, Tong Z, Song F, Yin W, Wang L, Miao K, Li D. Controllable Energy Absorption Design and 3D Printing of High Energy Absorbing Biomimetic Double-Layer Impact-Resistant Structure. *Additive Manufacturing Frontiers*. 2025 Mar 1;4(1):200193. doi: [10.1016/j.amf.2025.200193](https://doi.org/10.1016/j.amf.2025.200193)
- [18] Hidayat D, Istiyanto J, Sumarsono DA, Kurniawan F, Ardiansyah R, Wandono FA, Nugroho A. Investigation on the crashworthiness performance of thin-walled multi-cell PLA 3D-printed tubes: A multi-parameter analysis. *Designs*. 2023 Sep 12;7(5):108. doi: [10.3390/designs7050108](https://doi.org/10.3390/designs7050108)
- [19] Abd El-Halim MF, Awd Allah MM, Almuflih AS, Abd El-baky MA. Axial crashworthiness characterization of bio-inspired 3d-printed gyroid structure tubes: Cutouts effect. *Fibers and Polymers*. 2024 Aug;25(8):3099-114. doi: [10.1007/s12221-024-00630-4](https://doi.org/10.1007/s12221-024-00630-4)
- [20] Tunay M, Bardakci A. A study of crashworthiness performance in thin-walled multi-cell tubes 3D-printed from different polymers. *Journal of Applied Polymer Science*. 2024 Dec 20;141(48):56287. doi: [10.1002/app.56287](https://doi.org/10.1002/app.56287)
- [21] Awd Allah MM, Abbas MA, Almuflih AS, Mahmoud SF, Abd El-baky MA. On the influence of different infill pattern structures on the crashworthiness performance of 3D printed tubes subjected to lateral loading condition. *Fibers and Polymers*. 2024 Nov;25(11):4437-51. doi: [10.1007/s12221-024-00756-5](https://doi.org/10.1007/s12221-024-00756-5)
- [22] Mathiazhagan N, Palaniyappan S, kumar Sivakumar N. Effect of fused filament fabrication parameters on crashworthiness studies of hydroxyapatite particle reinforced PLA composite thin-walled tubes. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2023 Feb 1;138:105611. doi: [10.1016/j.jmbbm.2022.105611](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105611)
- [23] Moradpour A. Improve Security and Cost Management from Car Accident by Using Energy Absorption Systems [Master's thesis]. Mazandaran: Mazandaran University of Science and Technology; 2014.
- [24] Elyasi M, Modanloo V. Assessment of energy absorption and crushing performance of perforated thin-walled AA6061-O tubes with irregular holes under axial compression loading. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2024 Nov;49(11):15801-12. doi: [10.1007/s13369-024-08779-z](https://doi.org/10.1007/s13369-024-08779-z)
- [25] Awd Allah MM, Shaker A, Hassan MA, Abd El-baky MA. The influence of induced holes on crashworthy ability of glass reinforced epoxy square tubes. *Polymer Composites*. 2022 Nov;43(11):8322-40. doi: [10.1002/pc.27004](https://doi.org/10.1002/pc.27004)
- [26] Guler MA, Cerit ME, Bayram B, Gerçeker B, Karakaya E. The effect of geometrical parameters on the energy absorption characteristics of thin-walled structures under axial impact loading. *International Journal of Crashworthiness*. 2010 Oct 14;15(4):377-90. doi: [10.1080/13588260903488750](https://doi.org/10.1080/13588260903488750)
- [27] Yang H, Lei H, Lu G. Crashworthiness of circular fiber reinforced plastic tubes filled with composite skeletons/aluminum foam under drop-weight impact loading. *Thin-Walled Structures*. 2021 Mar 1;160:107380. doi: [10.1016/j.tws.2020.107380](https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107380)
- [28] Bhutada S, Goel MD. Crashworthiness parameters and their improvement using tubes as an energy absorbing structure: an overview. *International journal of crashworthiness*. 2022 Nov 2;27(6):1569-600. doi: [10.1080/13588265.2021.1969845](https://doi.org/10.1080/13588265.2021.1969845)

- [29] Alshahrani H, Sebaey TA, Hegazy DA, El-baky MA. Development of efficient energy absorption components for crashworthiness applications: an experimental study. *Polymers for Advanced Technologies*. 2022 Sep;33(9):2921-42. doi: [10.1002/pat.5759](https://doi.org/10.1002/pat.5759)
- [30] Yang H, Lei H, Lu G. Crashworthiness of circular fiber reinforced plastic tubes filled with composite skeletons/aluminum foam under drop-weight impact loading. *Thin-Walled Structures*. 2021 Mar 1;160:107380. doi: [10.1016/j.tws.2020.107380](https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107380)
- [31] Alshahrani H, Sebaey TA, Awd Allah MM, Abd El-baky MA. Multi-response optimization of crashworthy performance of perforated thin walled tubes. *Journal of Composite Materials*. 2023 Apr;57(9):1579-97. doi: [10.1177/00219983231159508](https://doi.org/10.1177/00219983231159508)
- [32] El Aal MI, Awd Allah MM, Abd El-baky MA. Carbon-glass reinforced epoxy hybrid composites for crashworthy structural applications. *Polymer Composites*. 2023 May;44(5):2910-24. doi: [10.1002/pc.27290](https://doi.org/10.1002/pc.27290)