



# Experimental Investigation of Energy Absorption of Aluminum/Composite Hybrid Tube Produced by Tape Winding Method under Quasi-Static Load

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Sarkhosh R.<sup>1</sup> MSc,  
Farrokhhabadi A.<sup>\*1</sup> Phd,  
Zarei H R.<sup>2</sup> Phd

### How to cite this article

Sarkhosh R, Farrokhhabadi A, Zarei H R. Experimental Investigation of Energy Absorption of Aluminum/Composite Hybrid Tube Produced by Tape Winding Method under Quasi-Static Load. Modares Mechanical Engineering. 2021; 21(1):55-67.

## ABSTRACT

Metal/composite hybrid structures, which are a combination of low-density composites with low-cost metallic materials, have significant potential to provide cost-effective energy absorption devices for a variety of applications. In this research, an experimental study was performed in order to investigate the effect of overlapping composite layers on energy absorption and crashworthiness characteristics of aluminum/epoxy hybrid tube reinforced with glass fibers under quasi-static load. Also, another experimental study is conducted to determine the crash performance of aluminum/composite hybrid tube under static axial crush force. The result is that Hybrid tubes consist of epoxy reinforced with E-glass fiberglass tape overlaps around aluminum tubes with different percentages of overlapping. Quasi-static crash tests are done on aluminum cylindrical and aluminum/composite hybrid cylindrical tubes with 5%, 50%, and 100% overlap and the amount of energy absorption, specific energy absorption, peak crushing force, mean crushing force, crush load efficiency and the percentage of their changes were obtained and compared. Finally, to validate the results in this research, the results of the performed tests were compared with the results of other references and literature in this context.

**Keywords** Aluminum/Composite Hybrid Tube, Energy Absorption, Specific Energy Absorption, Quasi-Static Load

## CITATION LINKS

[1] Modeling energy absorption ... [2] Numerical analysis of energy absorption ... [3] Experimental, numerical and theoretical analysis of energy absorption ... [4] State-of-the-art review of automobile structural ... [5] Static and dynamic axial crushing ... [6] Crashworthy capability of composite material ... Energy absorption in polymer composites ... [8] Simulation of crushing performance ... [9] Experimental investigation of quasi-static perforation ... [10] Analytical, experimental and numerical investigation ... [11] Crashworthiness of aluminum-composite hybrid ... [12] Axial impact behavior and energy absorption ... [13] Axial crush and bending collapse ... [14] Dynamic axial crushing of combined composite ... [15] Experimental study on the parameters affecting ... [16] Axial resistance and energy absorption ... [17] Experimental study on crashworthiness ... [18] Axial crush and bending collapse of an aluminum ... [19] Experimental and numerical crashworthiness ... [20] Characteristics of aluminum/CFRP ... [21] State-of-the-art review on FRP strengthened ... [22] Energy absorption of metal, composite and metal ... [23] Axial impact behavior and energy absorption ... [24] Effect of reinforcement layer number ... [25] Experimental and numerical study ... [26] Energy absorption and failure pattern ... [27] Optimum honeycomb filled crash absorber ... [28] Standard test method for tensile properties ... [29] Standard Test Method for In-Plane Shear Response ...

<sup>1</sup>Aerospace Department, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

<sup>2</sup>Graduate Center, Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran.

### \*Correspondence

Address: Aerospace Department, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Phone: +98 2182883938

Fax: -

amin-farrokh@modares.ac.ir

### Article History

Received: July 16, 2020

Accepted: November 01, 2020

ePublished: January 18, 2021

## بررسی تجربی میزان جذب انرژی پروفیل‌های هیبریدی آلومینیوم/کامپوزیت تولید شده به روش نوار پیچی تحت بار شبه استاتیکی

رضا سرخوش MSc

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

امین فرخ آبادی Phd\*

استادیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

حمیدرضا زارمی Phd

دانشیار، مرکز تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

### چکیده

سازه‌های ترکیبی فلز/کامپوزیت، که متشکل از کامپوزیت‌های با چگالی کم با مواد فلزی کم هزینه هستند، از پتانسیل قابل توجهی برای به کارگیری در دستگاه‌های جذب انرژی با کاربردهای مختلف برخوردار می‌باشند. در این تحقیق به بررسی اثر هم‌پوشانی لایه‌های کامپوزیت بر روی میزان جذب انرژی و ویژگی‌های ضربه‌پذیری لوله‌های هیبریدی آلومینیوم/اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه تحت بار شبه استاتیکی به صورت تجربی پرداخته می‌شود. بدین منظور، یک تحقیق تجربی در مورد عملکرد لهدگی محوری استاتیکی لوله‌های هیبریدی آلومینیوم/کامپوزیت را که شامل لوله‌های حاوی اپوکسی تقویت شده با نوار الیاف شیشه‌ای E-glass با درصد هم پوشانی‌های متفاوت در اطراف لوله‌های آلومینیومی صورت می‌پذیرد و در ادامه بر روی لوله‌های استوانه آلومینیومی و استوانه‌های هیبریدی آلومینیوم/کامپوزیت با درصد هم پوشانی‌های ۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد تست شبه استاتیکی انجام گرفته و میزان جذب انرژی، جذب انرژی ویژه، بیشینه نیروی لهدگی، نیروی لهدگی میانگین، بازده نیروی لهدگی و درصد تغییرات آنها مورد مطالعه و مقایسه قرار خواهد گرفت. در نهایت به منظور اعتبار سنجی نتایج بدست آمده در این تحقیق، نتایج آزمون‌های انجام شده با نتایج سایر مراجع در این زمینه مقایسه شده است.

**کلیدواژه‌ها:** لوله‌های هیبریدی آلومینیوم/کامپوزیت، جذب انرژی، جذب انرژی ویژه، بار شبه استاتیکی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۱

\* نویسنده مسئول: amin-farrokh@modares.ac.ir

### ۱- مقدمه

در اوایل دهه ۱۹۷۰ آگاهی از لوله‌های جاذب انرژی جدار نازک برای کاربردهای ضربه پذیری به دلیل افزایش ایمنی محیط زیست در صنایع حمل و نقل عمده مانند خودرو، خطوط هوایی و هوافضا در حال رشد است [1]. ساختارهای دیواره نازک بطور گسترده به عنوان دستگاه‌های جذب انرژی استفاده می‌شوند.

در دو دهه گذشته، بسیاری از محققان رفتار لهدگی محوری لوله‌های فلزی جدار نازک را بررسی کرده‌اند. سعادت فرد و

همکاران [2] به تحلیل عددی رفتار جذب انرژی مقاطع جدار نازک فلزی چهارگوش تحت بار جانبی اعمالی توسط یک سنبه صلب استوانه‌ای پرداختند. در این مقاله، فرآیند فرورفتگی مقاطع جدار نازک فلزی با سطح مقطع چهارگوش تحت اثر نیروی فشار جانبی سنبه صلب استوانه‌ای با استفاده از روش‌های تجربی و شبیه سازی عددی توسط نرم افزار آباکوس تحلیل گردید. در مقاله‌ای دیگر نیک‌نژاد و همکاران [3] مطالعه‌ای را تحت عنوان تحلیل تجربی، عددی و تئوری فرآیند جذب انرژی پروفیل آلومینیومی با سطح مقطع جدار نازک H شکل انجام دادند همچنین رفتار لوله‌های کامپوزیتی در جذب انرژی در بسیاری از مقالات منتشر شده [4-7] مورد مطالعه قرار گرفته است. ابراهیم‌خانی و همکاران [8] به مدلسازی فروریزی جاذب انرژی کامپوزیتی تحت بار ضربه ای با بکارگیری روابط آسیب در محیط‌های پیوسته پرداختند و در پژوهشی دیگر، مهربانی یگانه و همکاران [9] به بررسی تجربی نفوذ شبه استاتیکی نفوذ کننده با هندسه‌های مختلف، درون چندلایه کامپوزیتی شیشه - اپوکسی پرداختند. پیرمحمدی و همکاران [10] به بررسی تحلیلی، تجربی و عددی سازه ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری و رویه‌های کامپوزیتی تحت ضربه پرتابه پرداختند. همچنان تحقیقاتی درباره رفتار لوله‌های ترکیبی منتشر شده است که در آن‌ها پلیمر تقویت شده با الیاف با لوله‌های فلزی ترکیب شده است تا عملکرد لهدگی آنها بهبود یابد [11-14]. راگالی و مالیک [11] گزارش دادند که جذب انرژی لوله‌های هیبریدی شامل لوله‌های آلومینیوم و اپوکسی تقویت شده با الیاف E-Glass با رشته پیچی به طور قابل توجهی بیشتر از لوله‌های کامپوزیت یا لوله‌های آلومینیومی است. سونگ و همکاران [12] تست‌های شبه استاتیک و ضربه‌ای را روی لوله‌های دایره‌ای ترکیبی آلومینیومی، فولادی و مسی پیچیده شده با کامپوزیت شیشه / اپوکسی مورد مطالعه قرار دادند که در آنها زاویه الیاف [±15]، [90] و [±45] بود. نتایج به دست آمده نشان داد که جذب انرژی ویژه لوله‌های ترکیبی از لوله‌های فلزی بالاتر بود. شین و همکاران [13] آزمایش‌های لهدگی محوری شبه استاتیکی و فروپاشی خمشی را بر روی لوله‌های هیبریدی تولید شده توسط الیاف شیشه پیش آغشته به اپوکسی در اطراف لوله‌های آلومینیومی مربعی شکل انجام دادند. زاویه لایه‌ها، [0]، [90] و [0/90] و [±45] نسبت به محور لوله بود. نتایج به دست آمده نشان داد که بار لهدگی میانگین و جذب انرژی لوله‌های ترکیبی بیشتر از لوله‌های آلومینیومی بود. بوچت و همکاران [14] آزمایش‌های فشرده سازی دینامیکی را روی لوله‌های ترکیبی کامپوزیت / آلومینیومی دایره‌ای شکل انجام دادند که در آن کامپوزیت متشکل از الیاف پیش آغشته کربن تقویت شده با اپوکسی بود که در جهت محیطی به دور آلومینیوم پیچیده شده بود. نتایج نشان داد که جذب انرژی ویژه، هنگامی که نسبت ضخامت به قطر الومینوم داخلی ۴۸ باشد افزایش می‌یابد، اما هنگامی که این

پرداختند. آنها چهار حالت فروریزش را که دربرگیرنده مکانیزم جذب انرژی و کارایی مؤثری بود را شناسایی کردند.

شن و همکاران<sup>[24]</sup> به بررسی اثر تعداد لایه‌های پلاستیکی تقویت شده با فیبر کربن (CFRP) بر ظرفیت لهیدگی محوری لوله‌های ترکیبی مربعی آلومینیوم/CFRP به صورت تجربی و عددی پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش تعداد لایه‌های CFRP منجر به فروریزش بیشتر لوب‌ها و کاهش عرض لوب‌های فروریخته، و در نتیجه بهبود ظرفیت جذب انرژی می‌شود. نتایج شبیه سازی آنها حاکی از فروریزش دیواره لوله در لوله‌های ترکیبی ۴ لایه بود. نتایج بدست آمده نشان داد که سختی خمشی بیشتر لایه‌های کامپوزیت، در لوله‌های ترکیبی ۴ لایه، منجر به جدا شدن سطح مشترک بین لایه‌های آلومینیوم و کامپوزیت شده است. نتایج نشان داد که پس از خرابی سطح مشترک، لایه‌های کامپوزیتی به دنبال دیواره لوله آلومینیوم فرو نمی‌ریزند و در عوض در جهت تقریبی طولی، که مستقیماً متحمل بار لهیدگی طولی بودند، برگشتند. این رفتار منجر به کاهش عرض فروریزش پلاستیک و بهبود اتلاف انرژی CFRP تک لایه به دلیل لایه لایه شدن CFRP شد. ژانگ و همکاران<sup>[25]</sup> به عملکرد لهیدگی محوری لوله‌های مربعی ترکیبی آلومینیوم/CFRP پیچیده شده با ورق تک-زاویه (angle-ply) و تک‌زاویه نامتقارن با استفاده از روش‌های تجربی و عددی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که لوله‌های پیچیده شده با تک‌زاویه [۰] یا [۴۵]، دچار گسترش ترک شده و CFRP از آلومینیوم جدا شده است، که این امر منجر به جذب انرژی کمتری نسبت به لوله آلومینیومی خالص شده است. نتایج نشان داد که تغییر شکل متقارن پایدار، در لوله‌های مربعی ترکیبی پیچیده شده با زاویه لایه نامتقارن، جذب انرژی ویژه این لوله‌ها را در ۱۱ درصد افزایش داده و عملکرد جذب انرژی این لوله‌ها را در مقایسه با لوله آلومینیومی خالص بهتر کرده است. آنها همچنین تأثیر جرم لوله و جایگزینی آلیاژ آلومینیوم با CFRP در جذب انرژی لوله‌های مربع ترکیبی با آلومینیوم یکسان و تعداد مختلف لایه-های CFRP را مورد مطالعه قرار دادند. ژانگ و همکاران<sup>[26]</sup> به مطالعه جذب انرژی و الگوی خرابی لوله‌های ترکیبی کامپوزیتی تحت فشار محوری شبه‌استاتیکی پرداختند. بدین منظور، آنها لوله‌های دایره‌ای هیبریدی الیاف/آلومینیومی با قطر داخلی مختلف (۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر) با مواد (Al-1060، الیاف کربن و الیاف شیشه) را با استفاده از فرایند قالب‌گیری کیسه‌های خلا ساختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که لوله‌های ترکیبی الیاف کربن/آلومینیومی با قطر داخلی ۴۰ میلی‌متر، در مقایسه با آلومینیوم، جذب انرژی ویژه و بازده نیروی لهیدگی بیشتری دارند. اما در این مقاله‌ها به طور ویژه به بررسی اثر هم‌پوشانی لایه‌های کامپوزیت بر روی لوله آلومینیومی پرداخته نشده است.

از آثار فوق الذکر می‌توان دریافت که در حالی که سازه‌های ترکیبی فلزی/کامپوزیت به طور قابل توجهی وزن و قابلیت ضربه‌پذیری را

نسبت ۲۵ باشد کاهش می‌یابد. همچنین نشان داده شد که رفتار سطح لوله‌های آلومینیومی در جذب انرژی ویژه، تأثیر بسیار کمی دارد. نجف‌زاده اصل و همکاران<sup>[15]</sup> به بررسی تجربی پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار لوله‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری پرداختند. علاوه بر این مطالعات تجربی، حنفی و ویرزیکی<sup>[16]</sup> مدلی تحلیلی برای برآورد بار میانگین لهیدگی محوری لوله‌های فلزی دایره‌ای تقویت شده با لایه‌های کامپوزیت ارائه دادند.

سان و همکاران<sup>[17]</sup> طیف وسیعی از آزمایش‌های محوری شبه استاتیک را انجام داده و رفتار لهیدگی لوله‌های CFRP/آلومینیوم/فلزادی دایره‌ای با/بدون پرکننده‌های سلولی را بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که نمونه‌های پر شده از فوم/لانه زنبوری می‌تواند یک تغییر شکل ناشونده پایدارتر نسبت به نمونه‌های خالی داشته باشند. ظرفیت جذب انرژی لوله‌های ترکیبی آلومینیوم/GFRP (پلاستیک تقویت شده با فیبر شیشه‌ای) به ترتیب در لهیدگی محوری و خمش جانبی توسط شین و همکاران<sup>[18]</sup> بررسی گردید. برای پیش بینی توانایی جذب انرژی، دو مدل پیشنهاد شده است که با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارند. زارعی<sup>[19]</sup> به بررسی عددی و تجربی ضربه‌پذیری لوله‌های ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت تحت بارگذاری محوری و مورب دینامیکی پرداخت و میزان جذب انرژی و جذب انرژی ویژه را برای این سازه به دست آورد.

به طور کلی، با استفاده از پیکربندی ترکیبی فلز/کامپوزیت، حالت شکست کماتش موضعی ناپایدار ساختار کامپوزیت را می‌توان به حالت شکست پیش‌رونده تغییر داد. در این وضعیت می‌توان فرآیند شکست کامپوزیت‌ها را به روش خاصی از طریق تغییر شکل پلاستیک به جزء فلزی هدایت کرد که در نتیجه جذب انرژی برای کل سازه‌ی ترکیبی بهبود می‌یابد<sup>[20,21]</sup>.

با وجود مزایای اثبات شده سازه‌های ترکیبی فلز/کامپوزیت، تعداد بیشتری از متغیرهای طراحی مانند جهت الیاف، ترتیب چیدمان همچنین ضخامت قطعات فلزی و غیره می‌تواند به طور بالقوه رفتارهای لهیدگی تحت تأثیر قرار دهد. این فاکتورها به طور قطع باعث می‌شوند طراحی سازه‌های جاذب انرژی هیبریدی فلز/کامپوزیت بسیار پیچیده‌تر از همتایان فلزی آنها باشد<sup>[22]</sup>.

اجزای آلومینیوم از نظر هزینه مواد و چقرمگی از مزایای قابل توجهی برخوردار هستند. بنابراین، برای بررسی هزینه عملکرد، اخیراً ساختارهای ترکیبی متشکل از فلزات و کامپوزیت‌ها به عنوان یک جایگزین مؤثر معرفی می‌شوند، که ترکیبی از چگالی کم و استحکام بالای مواد کامپوزیت با هزینه کم و انعطاف‌پذیری بالای مواد فلزی برای سازه‌های محافظ در برابر تصادفات است. بنابراین، ساختارهای ترکیبی راهی مؤثر برای تعادل هزینه مواد و وزن سبک به نظر می‌رسد<sup>[22]</sup>. در این رابطه، سونگ و همکاران<sup>[23]</sup> به بررسی تجربی رفتارهای لهیدگی دینامیکی و جذب انرژی جاذب کامپوزیت‌های پیچیده شده روی قسمت بیرونی لوله‌های فلزی

انرژی را جذب کند و در عین حال صدمه به سرنشینان را در هنگام تصادفات به حداقل برساند.

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} \quad (۲)$$

جذب انرژی (EA) بیانگر انرژی جذب شده در طی فرآیند لهیدگی است که می‌تواند با کار انجام شده توسط نیروی لهیدگی محاسبه شود.

$$EA = \int_{x=0}^{x=a} F(x) dx \quad (۳)$$

جذب انرژی ویژه (SEA) به عنوان انرژی جذب شده در واحد جرم، جاذب انرژی تعریف می‌شود.

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (۴)$$

که در آن m جرم ساختار دیواره نازک است. مقدار بزرگ SEA نشان دهنده مواد یا سازه‌های مطلوبی، با ظرفیت جذب انرژی ویژه است که یکی از اساسی‌ترین اهداف در طراحی‌های سازه‌های سبک است [26].

### ۳- ساخت نمونه و طراحی آزمایش‌ها

آلومینیم با توجه به چگالی کم و دارا بودن ویژگی‌های مورد نیاز در جذب انرژی و همچنین قیمت مناسب مورد توجه قرار گرفته است. شایان ذکر است لوله‌های آلومینیومی به روش اکستروژن تولید می‌گردند و نسبت به سایر روش‌های تولید نواقص کمتری در آن‌ها به چشم می‌خورد.

#### ۳-۱- نمونه استوانه آلومینیومی

با توجه به فعالیت‌های پژوهشی صورت گرفته در حوزه جاذب‌های انرژی در این بررسی نمونه استوانه‌ای به طول ۱۰۰ میلی‌متر و قطر خارجی ۴۰ میلی‌متر از جنس آلومینیم مورد ارزیابی قرار گرفته است. ضخامت جداره لوله آلومینیومی ۱ میلی‌متر می‌باشد. ابعاد در نظر گرفته شده مانع کمانش لوله آلومینیومی در هنگام انجام آزمون فشار می‌گردد. شکل ۱ پروفیل استوانه‌ای آلومینیومی استفاده شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. لوله‌های آلومینیومی از آلیاژ آلومینیوم اکستروژن شده با کیفیت ۶۰۶۰ (AlMgSi0.5F22) تحت شرایط عملیات حرارتی ساخته شده‌اند. خواص مکانیکی آلومینیوم با استفاده از چندین نمونه کوپن تست استاندارد تست کشش مشخص شده است. تنش تسلیم آلومینیوم برابر ۲۳۱ مگاپاسگال است [27].

#### ۳-۲- نمونه استوانه آلومینیومی تقویت شده به وسیله کامپوزیت

برای ساخت نمونه تقویت شده به وسیله کامپوزیت از پارچه الیاف شیشه نوع E ۲۰۰ گرمی با چگالی ۱/۹ g/cm<sup>3</sup> که دارای بافت دوبعدی (Plain woven) با خواص طولی و عرضی یکسان هستند استفاده شد. پارچه بافته شده دو بعدی دارای یک الگوی متقارن

بهبود می‌بخشند، می‌توان این سؤال را ایجاد کرد که آیا اثر هم‌پوشانی لایه‌های کامپوزیت در میزان جذب انرژی پروفیل‌های هیبریدی آلومینیوم/کامپوزیت تحت بار شبه‌استاتیکی می‌تواند در عملکرد ضربه‌پذیری و میزان جذب انرژی و حالت‌های تغییر شکل و مکانیزم شکست تاثیرگذار باشد. علیرغم اهمیت این موضوع، با توجه به دانش نویسندگان، هیچ گزارشی در مطالعات پیشین ارائه نشده است که به طور خاص به اثر هم‌پوشانی لایه‌های کامپوزیت در میزان جذب انرژی پروفیل‌های هیبریدی آلومینیوم/کامپوزیت تحت بار شبه‌استاتیکی بپردازد. در این مطالعه، به صورت تجربی به بررسی عملکرد لهیدگی محوری استاتیکی لوله‌های هیبریدی آلومینیوم/کامپوزیت پرداخته شده و بدین منظور لوله‌های حاوی اپوکسی تقویت شده با نوار الیاف شیشه‌ای E-glass با درصد هم‌پوشانی‌های متفاوت در اطراف لوله‌های آلومینیومی انتخاب می‌شوند. سپس میزان جذب انرژی، جذب انرژی ویژه، بیشینه نیروی لهیدگی، نیروی لهیدگی میانگین، بازده نیروی لهیدگی و درصد تغییرات این نوع سازه‌ها را به دست آورده و با هم مقایسه شده است. در این تحقیق از روش نوار پیچی جهت ساخت نمونه‌ها ترکیبی آلومینیوم/GFRP با درصد هم‌پوشانی‌های متفاوت استفاده شده است. پیش‌بینی می‌شود این مطالعه، بینشی در مورد طراحی قابل قبول ساختارهای ترکیبی آلومینیوم/GFRP برای روش ساخت صنعتی این مواد به روش نوار پیچی ارائه دهد.

#### ۲- بررسی پارامترهای ضربه‌پذیری

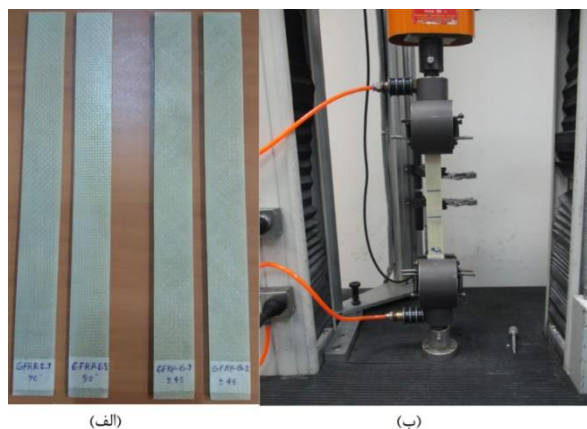
برای ارزیابی توانایی جذب انرژی ساختارهای جدار نازک، معمولاً از چندین معیار در ارزیابی ضربه‌پذیری استفاده می‌شود. مقدار پارامترهای ضربه‌پذیری از منحنی‌های جابجایی-نیرو که توسط دستگاه بارگذاری تک‌محوره کشش-فشار ثبت شده محاسبه می‌شود. نیروی لهیدگی بیشینه (PCF) به عنوان اولین بار حداکثر تعریف می‌شود، که باید به اندازه کافی کم باشد تا از سرنشینان و عابر پیاده محافظت کند. میانگین نیروی لهیدگی (MCF) به عنوان میانگین نیرو در طول لهیدگی مؤثر در نظر گرفته می‌شود که برای بدست آوردن ظرفیت جذب انرژی بهتر، باید سطح بالایی را حفظ کند [26]. در این مطالعه، فاصله لهیدگی مؤثر به ۵۰ درصد از طول لوله اصلی تنظیم شده است، که به اندازه کافی طولانی است که شامل روند خرابی پایدار قبل از متراکم شدن است.

$$MCF = \frac{1}{a} \int_{x=0}^{x=a} F(x) dx \quad (۱)$$

در اینجا  $F(x)$  نیرو،  $x$  و  $a$  به ترتیب جابجایی لهیدگی و طول لهیدگی مؤثر هستند.

بازده نیروی لهیدگی (CFE) به عنوان نسبت میانگین نیروی لهیدگی به نیروی لهیدگی بیشینه تعریف شده است. مقدار CFE زیاد به این معنی است که جاذب انرژی می‌تواند مقدار زیادی

جهت تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت GFRP، از آزمایش‌های کشش و برش به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM D3039<sup>[28]</sup> و ASTM D3518<sup>[29]</sup> استفاده شد. قطعات آزمایش تست کشش و برش به روش لایه‌چینی دستی ساخته شد و به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد پخت گردید. آماده‌سازی کوپن‌های آزمون با استفاده از دستگاه واترجت انجام شد. به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج، از هر قطعه کامپوزیتی دو نمونه تهیه و آزمون‌های کشش و برش روی آن‌ها انجام پذیرفت. آزمایش برش طبق استاندارد ASTM-D3518 انجام شد. در این حالت ۲ نمونه استاندارد با جهت‌گیری الیاف ۴۵° ساخته و تحت کشش با نرخ بارگذاری ۲ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند. ابعاد و هندسه نمونه‌ها همانند آزمایش کشش است. میانگین ضخامت کوپن‌های تست کشش و تست برش GFRP، به ترتیب برابر با ۲/۶۵ و ۲/۷۶ میلی‌متر بود. نمونه‌های کششی و برشی دارای هندسه یکسان با مقطع ثابت مستطیل شکل (۲۵۰ میلی‌متر در ۲۵ میلی‌متر) هستند. این آزمون، با استفاده از دستگاه کشش تک محوره موجود در مرکز پژوهشی رازی ایران، انجام شد. سرعت آزمون دستگاه از ۲ تا ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه متغیر است. بیشینه ازدیاد طول دستگاه طبق کاتالوگ مربوط به آن، ۹۰۰ میلی‌متر است. آزمون کشش در شرایط محیطی ۲۳ درجه سانتی‌گراد دما و ۵۵٪ رطوبت و بر اساس استاندارد ASTM-D3039، انجام شد. سرعت در این آزمون، ۲ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد زیرا هرچه آزمون در سرعت پایین‌تری انجام شود، دقت آزمون بالاتر می‌رود و شکست کامل رخ می‌دهد. نیروی وارد بر نمونه توسط لودسل و کرنش قطعه توسط اکستنسومتر اندازه‌گیری شدند، همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌کنید. بعد از انجام آزمایش‌های کشش، نمودار تنش-کرنش ماده مرکب به صورت شکل ۴ حاصل می‌شود. همانگونه که مشاهده می‌شود، ماده کامپوزیتی دارای رفتار الاستیک خطی است.



شکل ۳ آماده‌سازی نمونه‌ها و دستگاه تست کشش (الف) جهت الیاف نمونه‌ها برای تست کشش و برش (ب) شماتیکی از ستاپ آزمایش



شکل ۱ پروفیل استوانه‌ای آلومینیومی استفاده شده در آزمایش‌ها.

است که با درهم آمیختگی الیاف تار صفر درجه و الیاف پود ۹۰ درجه تولید شده است. در مقایسه با سایر بافت‌ها، پارچه بافته شده دو بعدی دارای پایداری مطلوب با خواص مکانیکی نسبتاً پایین است. در این پژوهش ماتریس از نوع رزین اپوکسی با نام تجاری ML-506 استفاده گردیده است. از خواص این نوع رزین می‌توان به سازگاری با الیاف اشاره کرد. در این بررسی، از سفت‌کننده با نام تجاری HA-11 استفاده شده است. رزین و سفت‌کننده از شرکت مواد مهندسی مکرر تهیه شده است. نسبت مخلوط رزین به سفت‌کننده طبق پیشنهاد شرکت سازنده، ۱۰ به ۱ است. برای ساخت ماتریس، با توجه به دستور ساخت شرکت سازنده، رزین اپوکسی و هاردنر، به نسبت ۱۰ به ۱ در یک ظرف بشر ریخته شدند. سپس جهت مخلوط شدن دو ماده فوق به صورت یکنواخت، مایع به مدت ۵ دقیقه هم زده شد. شکل ۲ پارچه از جنس شیشه و رزین اپوکسی را نشان می‌دهد.



شکل ۲ پارچه از جنس شیشه و رزین اپوکسی.

پیچانده می‌شوند. شکل ۶ پیچش باندهای پارچه‌ای بر روی لوله‌های آلومینیومی را نشان می‌دهد. ذکر این نکته ضروری است که در روش نوارپیچی که بیشتر در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد عمل پیچش پارچه بدین صورت است که ابتدا ماندل در داخل فیکسچر دستگاه نوارپیچی قرار گرفته و با سرعتی که قابل کنترل است شروع به چرخش نموده و سپس نوار پارچه‌ای از پیش آغشته با رزین با پهنا مشخص با درصد هم‌پوشانی قابل کنترل به دور ماندل پیچیده می‌شود. اما در این تحقیق به علت عدم دسترسی به دستگاه نوارپیچی این کار با دقت بسیار به صورت دستی صورت گرفت.

در ادامه مراحل تولید، نمونه در داخل نایلون متخلخل جهت وکیوم و خروج رزین اضافی از نمونه قرار می‌گیرد بدین صورت که یک لایه نایلون متخلخل به دور نمونه مطابق شکل ۷ پیچانده می‌شود. سپس نمونه پوشیده شده به وسیله نایلون متخلخل را داخل نمد مخصوص جذب رزین قرار داده تا رزینی که در اثر اختلاف فشار ناشی از خلا از نمونه جدا می‌شود را به خود جذب نماید. شکل ۸ وضعیت قرارگرفتن نمد جذب رزین را نشان می‌دهد. در بخش بعد نمونه را درون کیسه خلا قرار داده و با فشار ۰/۹ بار تحت خلا قرار می‌گیرد. همزمان با تحت خلا قرار گرفتن، نمونه درون آن در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه پخت می‌گردد و سپس نمونه آماده بررسی و انجام تست است. شکل ۹ نمونه تولید شده را نشان می‌دهد.



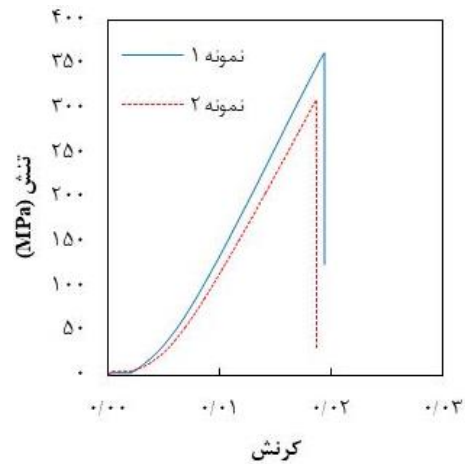
شکل ۶ پیچش باندهای پارچه‌ای بر روی لوله‌های آلومینیومی.



شکل ۷ پیچش لایه نایلون متخلخل به دور نمونه.



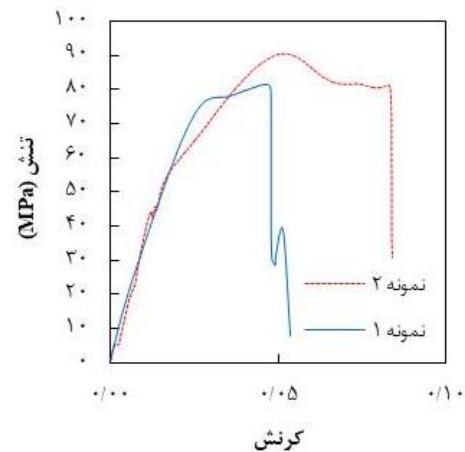
شکل ۸ وضعیت قرارگرفتن نمد جذب رزین.



شکل ۴ نمودار تنش- کرنش تست کشش نمونه‌های GFRP

همچنین نمودار تنش-کرنش برشی ماده مرکب، حاصل از آزمایش برش، به صورت شکل ۵ ارائه می‌شود. خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه/اپوکسی ساخته شده که از نتایج آزمایش‌های کشش و برش بدست می‌آید را می‌توان در جدول ۱ مشاهده نمود.

برای ساخت لوله ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت به روش نوارپیچی، ابتدا پارچه الیاف شیشه را به نوارهایی با عرض ۲ سانتی‌متر برش داده شد. سپس باندهای پارچه‌ای الیاف شیشه در بستر رزین به دور لوله‌های آلومینیومی پیچیده شدند. این پیچش باندها به گونه‌ای است که در نمونه اول لبه‌های پارچه از جنس شیشه با باند مجاور ۵ درصد هم‌پوشانی داشته باشد. در نمونه دوم هم‌پوشانی باندها ۵۰ درصد و در نمونه سوم دو لایه کامپوزیت بر روی یکدیگر



شکل ۵ نمودار تنش- کرنش برشی نمونه‌های GFRP

جدول ۱) خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه/ اپوکسی

مقادیر	نماد	خواص
۱۸۲۰	$\rho$	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )
۱۷/۱۴۲/۴۵	E1=E2	خواص الاستیکی (GPa)
۳/۰۳۳/۳	G12	
۱۰۳۳۷	Xt=Yt	استحکام (MPa)
۸/۳±۳	S	



شکل ۱۱) نمونه ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت تحت بارگذاری فشاری شبه‌استاتیکی.

به وسیله نرم‌افزار اطلاعات مربوط به جابجایی و نیرو در هر لحظه در سیستم ثبت می‌گردد و در ادامه برای تحلیل نتایج از داده‌ها استفاده می‌شود. دو نمونه از هر کدام از وضعیت‌های لوله آلومینیومی فاقد پوشش و لوله‌های آلومینیومی با پوشش کامپوزیتی با ۵ درصد ۵۰ درصد هم‌پوشانی و پوشش دو لایه کامپوزیتی تحت تست و ارزیابی قرار گرفت تا اطمینان از نتایج حاصل از تست و دقت نتایج افزایش یابد.

#### ۴- تحلیل نتایج و جمع‌بندی

در این بخش ابتدا نمودار نیرو بر حسب جابجایی برای استوانه آلومینیومی ساده نشان داده می‌شود. سپس مقادیر جذب انرژی، جذب انرژی ویژه، بیشینه نیرو و نیروی میانگین محاسبه و گزارش می‌شود و نمودار انرژی بر حسب تغییر شکل لوله استوانه‌ای رسم و ارزیابی می‌گردد. سپس نمودارهای نیرو بر حسب جابجایی برای سه لوله ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت گزارش می‌شود و پارامترهای مورد نیاز استخراج و نمودارهای انرژی بر حسب جابجایی ارائه می‌گردد. در ادامه به بررسی نتایج و تحلیل ارزیابی‌ها پرداخته می‌شود و نتیجه‌گیری نهایی در مورد این پژوهش صورت می‌گیرد.

#### ۴-۱- لوله استوانه آلومینیومی

هنگامی که استوانه آلومینیومی به وزن ۴۰ گرم تحت تست فشار قرار می‌گیرد همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود نمونه دچار



شکل ۹) نمونه نهایی.

#### ۳-۳- آزمایش بارگذاری

برای آزمایش‌های بارگذاری شبه استاتیکی، دستگاه بارگذاری تک‌محوره کشش-فشار مورد استفاده قرار گرفته است. نحوه انجام آزمایش‌های فشار به این صورت است که با در نظر گرفتن نرخ بارگذاری مشخص، هرکدام از نمونه‌ها تحت بار محوری فشاری قرار می‌گیرند که این روند تا رسیدن به حد نهایی فشردگی ادامه پیدا می‌کند.

نرخ بارگذاری نمونه‌ها چه برای نمونه‌های آلومینیومی ساده و چه برای نمونه‌های ترکیبی آلومینیومی/کامپوزیت برابر ۱/۵ میلی‌متر در دقیقه در نظر گرفته شده است تا بتواند حدالمقدور شرایط بارگذاری شبه استاتیکی رعایت شده باشد. با چنین سرعتی، انجام هر یک از آزمایش‌های فشار در حدود ۱ ساعت زمان برده است. شکل ۱۰ نمونه آلومینیومی و شکل ۱۱ نمونه تقویت شده به وسیله کامپوزیت را در وضعیت‌های مختلف تحت آزمایش نشان می‌دهد.



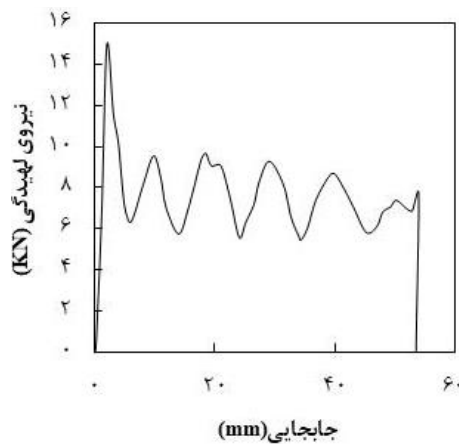
شکل ۱۰) نمونه آلومینیومی ساده در وضعیت‌های مختلف تحت آزمایش بارگذاری فشاری شبه استاتیکی.

#### ۴-۲- لوله‌های ترکیبی آلومینیوم/ کامپوزیت

استوانه آلومینیومی تقویت شده به وسیله کامپوزیت با هم‌پوشانی ۵ درصد به وزن ۴۳/۴۵ گرم تحت تست فشار شبه‌استاتیکی قرار می‌گیرد و نمودار نیرو بر حسب جابجایی آن مطابق شکل ۱۴ می‌باشد.

بیشینه نیرو لهیدگی در طول آزمایش برابر با ۱۴/۹ کیلونیوتن می‌باشد همچنین نمونه دچار ۶ چین‌خوردگی در طول فرآیند لهیدگی می‌شود که نسبت به لوله آلومینیومی فاقد پوشش کامپوزیتی یک چین خوردگی کمتر است. شکل ۱۵ نمونه بعد از اعمال بارگذاری را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود حالت فروریزش استوانه آلومینیومی تقویت شده به وسیله کامپوزیت با هم‌پوشانی ۵ درصد به شکل حالت منظم الماسی شکل فروریزش می‌کند که حالت فروریزش الماسی شکل آن نسبت به آلومینیوم ساده منظم‌تر شده است.

شکل ۱۶ نمودار انرژی بر حسب جابجایی را برای نمونه مورد نظر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد میزان جذب انرژی پس از طول لهیدگی حدود ۵۰ میلی‌متر جابجایی، ۳۸۰ ژول می‌باشد که نسبت به نمونه آلومینیومی ۱۵/۸۵ درصد افزایش یافته است.



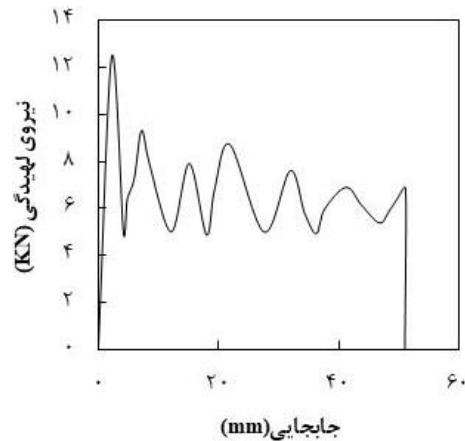
شکل ۱۴) نمودار نیرو بر حسب جابجایی برای نمونه ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با هم‌پوشانی ۵ درصد.



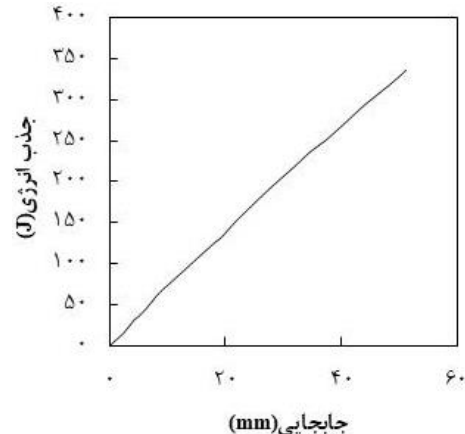
شکل ۱۵) نمونه ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با درصد هم‌پوشانی ۵ درصد بعد از اعمال بارگذاری.

کمانش‌های محلی می‌شود و تحت بارگذاری دچار فروریزش حالت نامنظم الماسی شکل (irregular diamond mode) می‌شود و در نیروی ۱۲/۵۶ کیلو نیوتن چین خوردگی اولیه آغاز می‌گردد و ماکزیمم نیروی لهیدگی در نمودار نیرو- جابجایی رخ می‌دهد با ادامه روند بارگذاری مطابق نمودار شکل ۱۲ چین‌خوردگی‌ها تا رسیدن به فشردگی نهایی ادامه می‌یابد و ۷ چین‌خوردگی در حین انجام آزمایش بر نمونه رخ می‌دهد که به خوبی در نمودار شکل ۱۲ قابل مشاهده می‌باشد.

همان‌طور که در نمودار نیرو جابجایی مشاهده می‌شود، دلیل افت نیرو رخ دادن چین‌خوردگی‌ها در طول نمونه است هنگام وقوع چین‌خوردگی هندسه نمونه تغییر کرده و نیرو با تمرکز بیشتری باعث تغییر شکل نمونه می‌شود. این روند برای تک تک چین‌های روی نمونه تکرار می‌شود و باعث شکل‌گیری نمودار نیرو بر حسب جابجایی به صورت سینوسی می‌شود. همچنین نمودار انرژی بر حسب جابجایی برای لوله آلومینیومی مطابق شکل ۱۳ می‌باشد. نمونه آلومینیومی فاقد تقویت‌کننده پس از حدود ۵۰ میلی‌متر طول لهیدگی ۳۲۸ ژول انرژی جذب می‌کند، این مقادیر در جدول ۲ با سایر نمونه‌ها مقایسه خواهد شد.

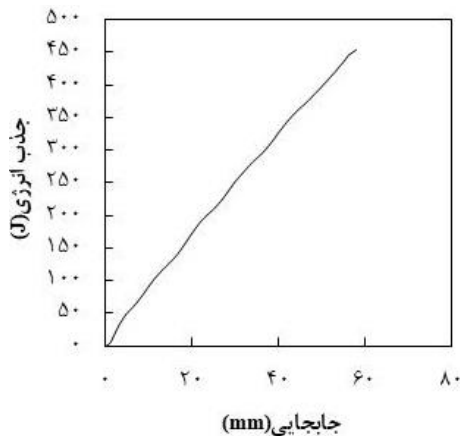


شکل ۱۲) نمودار نیرو بر حسب جابجایی برای استوانه آلومینیومی ساده.

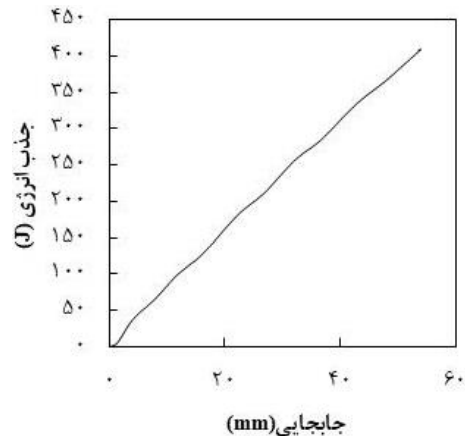


شکل ۱۳) نمودار انرژی بر حسب جابجایی برای استوانه آلومینیومی ساده.





شکل ۱۹) نمودار انرژی بر حسب جابجایی برای نمونه ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با درصد هم پوشانی ۵۰ درصد.

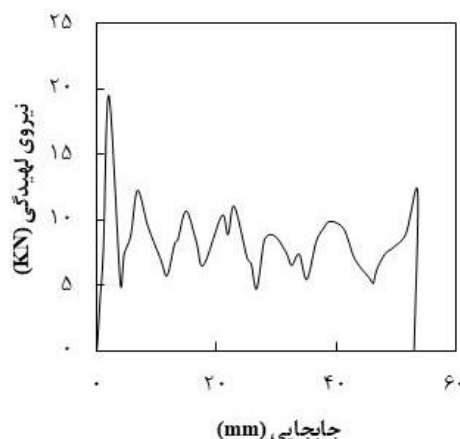


شکل ۱۶) نمودار انرژی بر حسب جابجایی برای نمونه ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با درصد هم پوشانی ۵ درصد.

مطابق نمودار شکل ۱۹، میزان جذب انرژی نمونه پس از طول لهیدگی ۵۰ میلی‌متری ۳۹۶ ژول می‌باشد که این میزان جذب انرژی در مقایسه با نمونه ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با درصد هم پوشانی ۵ درصد، بیشتر می‌باشد؛ ولی وزن نمونه نسبت به نمونه قبلی حدود ۵/۵ گرم افزایش یافته است.

نمونه ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با دولایه کامپوزیت به وزن ۵۳ گرم تحت تست فشار شبه استاتیکی قرار می‌گیرد و نمودار نیرو بر حسب جابجایی آن مطابق شکل ۲۰ می‌باشد. ضخامت نمونه ۵۰ درصد افزایش یافته و به ۱/۵ میلی‌متر می‌رسد.

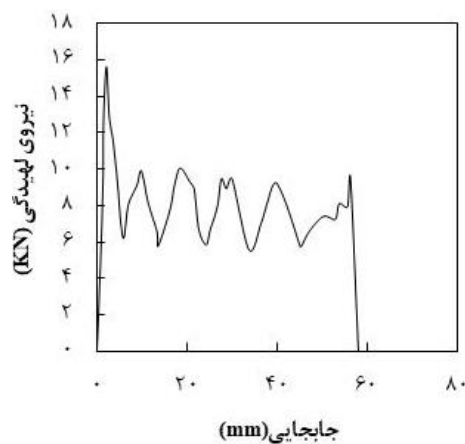
حداکثر نیروی لهیدگی نمونه در طول فرآیند لهیدگی برابر با ۱۹/۵ کیلونیوتن می‌باشد، شکل ۲۱ نمونه را پس از اعمال بارگذاری نشان می‌دهد. همانگونه که در نمودارهای نیرو لهیدگی-جابجایی نمونه-ها مشاهده می‌شود، نیروی لهیدگی بیشینه و نیروی لهیدگی میانگین لوله‌های ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با افزایش درصد هم پوشانی، افزایش می‌یابد.



شکل ۲۰) نمودار نیرو بر حسب جابجایی برای نمونه ترکیبی آلومینیوم / کامپوزیت با دولایه کامپوزیت.

استوانه آلومینیومی تقویت شده به وسیله کامپوزیت با هم پوشانی ۵۰ درصد، سومین نمونه مورد نظر است که به وزن ۵۱ گرم تحت تست فشار قرار می‌گیرد و نمودار نیرو بر حسب جابجایی آن مطابق شکل ۱۷ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود رفتار نمونه نسبت به نمونه با هم پوشانی ۵ درصد، تفاوت چندانی ندارد در حالی که وزن نمونه از ۴۳/۴۵ گرم به ۵۱ گرم افزایش یافته است.

نمونه دچار ۶ چین خوردگی می‌شود که نسبت به لوله آلومینیومی فاقد پوشش کامپوزیتی یک چین خوردگی کمتر است که در شکل ۱۸ نمونه پس از لهیدگی قابل رویت است. شکل ۱۹ نمودار انرژی بر حسب جابجایی را برای نمونه مورد نظر نشان می‌دهد.



شکل ۱۷) نمودار نیرو بر حسب جابجایی برای نمونه ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با درصد هم پوشانی ۵۰ درصد.



شکل ۱۸) نمونه ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با درصد هم پوشانی ۵۰ درصد بعد از اعمال بارگذاری.

جدول ۲) مقادیر پارامترهای ضربه‌پذیری نمونه‌های مورد آزمایش قرار گرفته.

نمونه	مقدار انرژی جذب شده (J)		جرم نمونه (g)		مقدار انرژی ویژه (J/g)	
	مقدار	درصد تغییرات	مقدار	درصد تغییرات	مقدار	درصد تغییرات
لوله آلومینیومی ساده	۳۲۸	-	۴۰	-	۸/۲	-
لوله ترکیبی آلومینیوم/ کامپوزیت با ۵٪ همپوشانی لایه‌های کامپوزیت	۳۸۰	۱۵/۸۵٪	۴۵/۴۳	۱۳/۳۲٪	۸/۳۶	۲٪
لوله ترکیبی آلومینیوم/ کامپوزیت با ۵۰٪ همپوشانی لایه‌های کامپوزیت	۳۹۶	۲۰/۷۳٪	۵۱	۲۷/۵٪	۷/۷۶	۵/۳۶٪
لوله ترکیبی آلومینیوم/ کامپوزیت با ۲ لایه کامپوزیت	۴۱۱	۲۵/۳۰٪	۵۳	۳۵٪	۷/۶۱	۷/۱۹٪

جذب انرژی افزایش می‌یابد اما جذب انرژی ویژه کاهش می‌یابد که با نتایج زوها و همکاران [22] که روی جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی و لوله‌های ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت تحت بار محوری و مورب مطالعه‌ای انجام داده بود تطابق خوبی دارد و همچنین با نتایج زارعی [27] تطابق دارد. زارعی در پژوهش خود به این نتیجه رسیده بود که لوله‌های ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با تک لایه کامپوزیت جذب انرژی ویژه بیشتری نسبت به لوله‌های ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با دو یا سه لایه کامپوزیت دارد. از نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌ها می‌توان دریافت که با افزایش درصد همپوشانی لایه‌های کامپوزیت، طول لهیدگی موثر کاهش می‌یابد که با نتایج ژانگ و همکاران [24] تطابق خوبی دارد. آن‌ها در مقاله خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش تعداد لایه‌های کامپوزیت CFRP در لوله‌های ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت، طول لهیدگی موثر کاهش پیدا می‌کند.

همانطور که در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود، انرژی ویژه نمونه تقویت شده با همپوشانی ۵ درصدی لایه‌ها، بیشترین مقدار را نسبت به سایر نمونه‌ها دارد؛ از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد لایه‌های تقویت‌کننده موجب کاهش انرژی ویژه نمونه می‌شود و با توجه به تعریف جذب انرژی ویژه، لوله آلومینیومی با یک لایه کامپوزیت با همپوشانی ۵ درصدی لایه‌ها نسبت به سایر نمونه‌ها در حالت بهینه می‌باشد. سایر پارامترهای مهم و تاثیرگذار در عملکرد جذب‌کننده‌های انرژی نیز در جدول ۳ مقایسه شده‌اند.

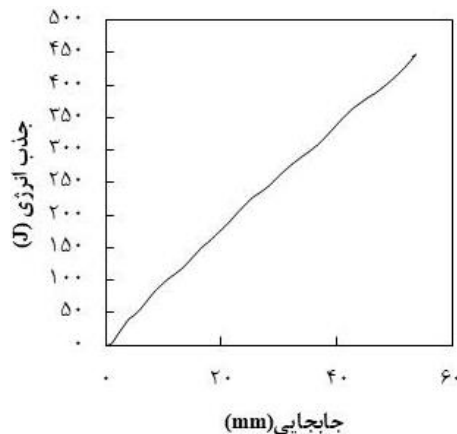
مقایسه بین بازده نیروی لهیدگی لوله آلومینیومی ساده و لوله ترکیبی آلومینیوم/ کامپوزیت با درصد همپوشانی‌های متفاوت نشان داد که لوله ترکیبی آلومینیوم/ کامپوزیت تنها در درصد همپوشانی ۵ درصد بازده نیروی لهیدگی نسبت به آلومینیومی ساده افزایش می‌یابد. در مورد لوله ترکیبی آلومینیوم/ کامپوزیت



شکل ۲۱) نمونه ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با دو لایه کامپوزیت بعد از اعمال بارگذاری.

میزان جذب انرژی نمونه پس از حدود ۵۰ میلی‌متر طول لهیدگی به ۴۱۱ ژول می‌رسد، این در حالیست که وزن نمونه نسبت به استوانه آلومینیومی حدود ۳۵ درصد افزایش یافته است. شکل ۲۲ نمودار انرژی بر حسب جابجایی را برای نمونه مورد نظر نشان می‌دهد.

برای مقایسه، جذب انرژی نمونه‌های آزمایش شده، نتایج تمامی پارامترهای تعیین کننده در جدول ۲ آورده شده است. آزمایش تجربی شبه استاتیکی روی لوله‌های ساده آلومینیومی نشان داد که این ساختار ظرفیت خوبی برای جذب انرژی دارد که با نتایج زارعی [27] تطابق خوبی را نشان می‌دهد، اگر چه در آزمایش او روی لوله آلومینیومی با سطح مقطع مستطیلی بود. مقایسه بین جذب انرژی و جذب انرژی ویژه لوله آلومینیومی ساده و لوله ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با درصد همپوشانی‌های متفاوت نشان داد که لوله ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت تنها در درصد همپوشانی ۵ درصد، میزان جذب انرژی و جذب انرژی ویژه نسبت به آلومینیومی ساده به طور همزمان افزایش می‌یابد که با نتایج ژانگ و همکاران [26] تطابق خوبی دارد. در مورد لوله‌های ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با درصد همپوشانی ۵۰ و ۱۰۰ درصد،



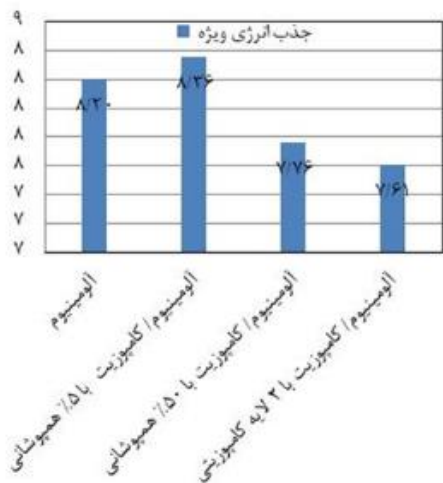
شکل ۲۲) نمودار انرژی بر حسب جابجایی برای نمونه ترکیبی آلومینیوم/ کامپوزیت دو لایه کامپوزیت.

با درصد هم‌پوشانی ۵۰ و ۱۰۰ درصد، بازده نیروی لهیدگی نسبت به لوله آلومینیومی ساده کاهش می‌یابد که با نتایج زوها و همکاران [22] که روی جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی و لوله‌های ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت تحت بار محوری و مورب مطالعه‌ای انجام داده بود تطابق خوبی دارد.

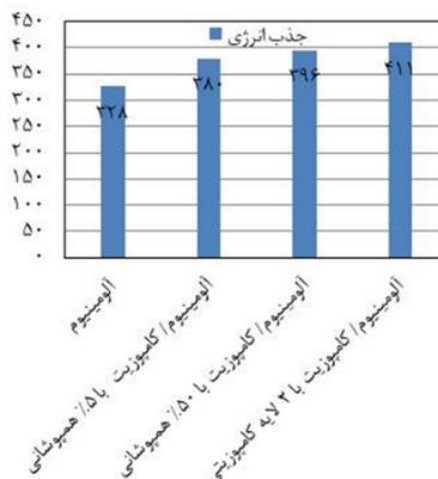
نتایج نشان می‌دهد استوانه آلومینیومی تقویت شده به وسیله کامپوزیت با هم‌پوشانی ۵ درصد، بالاترین جذب انرژی ویژه را در بین نمونه‌ها داراست. همچنین نسبت نیروی میانگین به نیروی بیشینه، نزدیکتری به عدد یک دارد. هر چه مقدار عددی این نسبت به یک نزدیکتر باشد شوک وارد بر سازه در اثر ضربه کمتر خواهد بود در حقیقت در نسبت‌های نزدیک به یک، جذب انرژی با ملایمت بیشتری انرژی ناشی از ضربه را جذب خواهد کرد که عملکرد مناسب آن را نشان می‌دهد.

جدول ۳) سایر پارامترهای مهم و تاثیرگذار در عملکرد جذب‌کننده‌های انرژی برای نمونه‌های مورد آزمایش قرار گرفته

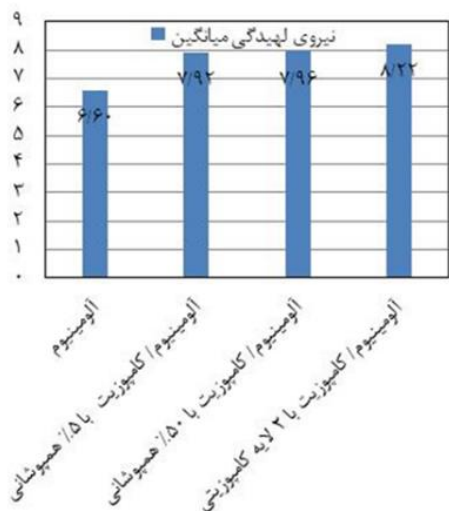
نمونه	بیشینه نیرو لهیدگی (KN)		نیروی لهیدگی میانگین (KN)		بازده نیروی لهیدگی	
	مقدار	درصد تغییرات	مقدار	درصد تغییرات	مقدار	درصد تغییرات
لوله آلومینیومی ساده	۱۲/۵۶	-	۶/۶	-	۰/۵۲	-
لوله ترکیبی آلومینیوم/ کامپوزیت با ۵٪ همپوشانی لایه‌های کامپوزیت	۱۴/۹۰	۱۸/۶۳ %	۷/۹۲	۲۰ %	۰/۵۳	۱/۹۲ %
لوله ترکیبی آلومینیوم/ کامپوزیت با ۵۰٪ همپوشانی لایه‌های کامپوزیت	۱۵/۷۰	۲۵ %	۷/۹۶	۲۱ %	۰/۵۰	۳/۸۴ %
لوله ترکیبی آلومینیوم/ کامپوزیت با ۲ لایه کامپوزیتی	۱۹/۵۰	۵۵ %	۸/۲۲	۲۴ %	۰/۴۲	۱۹/۲۳ %



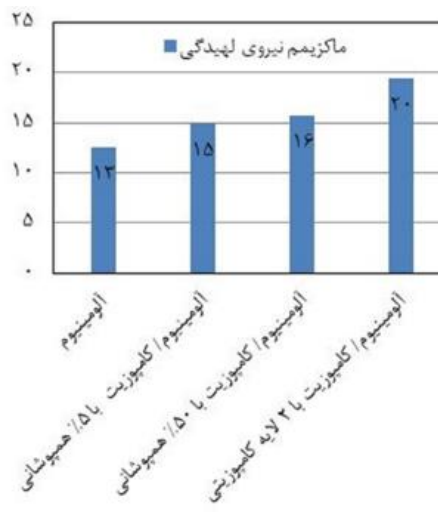
(ب)



(ف)



(د)



(ج)

شکل ۲۳) مقایسه گرافیکی شاخص‌های ضربه‌پذیری الف) جذب انرژی (EA)؛ ب) جذب انرژی ویژه (SEA)؛ ج) نیروی لهیدگی میانگین (MCF)؛ د) نیروی بیشینه لهیدگی (PCF)

**۵- نتیجه‌گیری**

در این مقاله آزمایش شبه استاتیکی محوری روی لوله‌های آلومینیومی ساده و لوله‌های ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با درصد هم‌پوشانی لایه کامپوزیت متفاوت انجام شد. برای توصیف رفتار لهیدگی لوله‌ها، جذب انرژی و جذب انرژی ویژه، نیروی لهیدگی میانگین، نیروی لهیدگی بیشینه، بازده نیروی لهیدگی در نظر گرفته شده است. ویژگی رفتار لهیدگی جالب از تجزیه و تحلیل تجربی به دست آمد. برخی از نتایج جذاب موارد زیر است.

۱- آزمایش تجربی شبه استاتیکی روی لوله‌های ساده آلومینیومی نشان داد که این ساختار ظرفیت خوبی برای جذب انرژی دارد.

۲- افزایش قابل توجهی در جذب انرژی و جذب انرژی ویژه لوله‌های ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با درصد هم‌پوشانی ۵ درصد مشاهده شد. این بدان معناست که انرژی بیشتری با وزن کمتری جذب می‌شود.

۳- مقایسه بین جذب انرژی و جذب انرژی ویژه لوله آلومینیومی ساده و لوله ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با درصد هم‌پوشانی‌های متفاوت نشان داد که لوله ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت تنها در درصد هم‌پوشانی ۵ درصد، میزان جذب انرژی و جذب انرژی ویژه به طور همزمان افزایش می‌یابد. در مورد لوله‌های ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با درصد هم‌پوشانی ۵۰ و ۱۰۰ درصد، جذب انرژی افزایش می‌یابد اما جذب انرژی ویژه کاهش می‌یابد.

۴- نیروی لهیدگی بیشینه و نیروی لهیدگی میانگین لوله‌های ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با افزایش درصد هم‌پوشانی، افزایش می‌یابد.

۵- هنگامی که درصد هم‌پوشانی از ۵۰ درصد به ۱۰۰ درصد افزایش پیدا می‌کند، بازده نیروی لهیدگی، به طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند.

۶- از میان لوله‌های بررسی شده در این پژوهش، لوله ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با درصد هم‌پوشانی ۵ درصد بهترین عملکرد از نظر شاخص‌های ضربه‌پذیری داشت.

۷- تعداد چین‌خوردگی‌های روی لوله ترکیبی آلومینیوم/کامپوزیت با درصد هم‌پوشانی‌های متفاوت، از تعداد چین‌خوردگی‌های روی لوله آلومینیوم ساده کم‌تر است.

۸- در لوله‌های استوانه‌ای آلومینیوم/کامپوزیت حالت شکست کمانش موضعی ناپایدار ساختار کامپوزیت به حالت شکست پیشرونده تغییر پیدا نمود، جایی که فرآیند شکست کامپوزیت‌ها را می‌توان به روش خاصی از طریق تغییر شکل پلاستیک به عنوان جزء فلزی هدایت کرد، در نتیجه جذب انرژی برای کل سازه‌ی ترکیبی بهبود می‌یابد.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی حاصل فعالیت نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده آنها است.

**تعارض منافع:** هیچگونه تعارض منافی با اشخاص و سازمان‌ها وجود ندارد.

**سهم نویسندگان:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.  
**منابع مالی:** منابع مالی توسط دکتر حمیدرضا زارعی تأمین شده است.

**منابع**

1- Xiao X. Modeling energy absorption with a damage mechanics based composite material model. *Journal of composite materials*. 2009;43(5):427-44.

2- Saadatfard H, Niknejad A, Liaghat G, Hatami S. Numerical analysis of energy absorption behavior of quadrangular thin-walled metal sections under the applied lateral loading by a cylindrical rigid punch. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(1):153-64. (In Persian)

3- Niknejad A, Firouzi M, Hematiyan MR, Ziaee S. Experimental, numerical and theoretical analysis of energy absorption process by aluminum profile with H-shaped thin-walled cross section. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(8):213-23. (In Persian)

4- Paluszny A. State-of-the-art review of automobile structural crashworthiness. *Automotive Applications Committee, American Iron and Steel Institute*; 1992.

5- Langseth M, Hopperstad OS. Static and dynamic axial crushing of square thin-walled aluminium extrusions. *International Journal of Impact Engineering*. 1996;18(7-8):949-68.

6- Mamalis AG, Robinson M, Manolakos DE, Demosthenous GA, Ioannidis MB, Carruthers J. Crashworthy capability of composite material structures. *Composite structures*. 1997;37(2):109-34.

7- Jacob GC, Fellers JF, Simunovic S, Starbuck JM. Energy absorption in polymer composites for automotive crashworthiness. *Journal of composite materials*. 2002;36(7):813-50.

8- Ebrahimkhani M, Liaghat G, Ahmadi H. Simulation of crushing performance of Composite Energy Absorber under impact loading using Continuum Damage Mechanics approach. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;17(12):505-13. (In Persian)

9- Mehrabani Yeganeh E, Liaghat GH, Pol MH. Experimental investigation of quasi-static perforation on laminated glass epoxy composites by indenters with different geometries. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(1):185-93. (In Persian)

10- Pirmohammad N, Liaghat GH, Pol MH, Sabouri H. Analytical, experimental and numerical investigation of sandwich panels made of honeycomb core subjected projectile impact. *Modares Mechanical Engineering*. 2014;14(6):153-64. (In Persian)

11- Ragalyi A, Mallick PK. Crashworthiness of aluminum-composite hybrid crush tubes containing filament-wound over-wraps. In *Proceedings of SAMPEACCE-DOE-SPE Midwest advanced materials and processing conferences, Dearborn, MI 2000* (pp. 420-426).

12- Song HW, Wan ZM, Xie ZM, Du XW. Axial impact behavior and energy absorption efficiency of

- 27- Zarei H, Kröger M. Optimum honeycomb filled crash absorber design. *Materials & Design*. 2008;29(1):193-204.
- 28- ASTM D3039. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials.
- 29- ASTM D3518. Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a  $\pm 45^\circ$  Laminate.
- composite wrapped metal tubes. *International Journal of Impact Engineering*. 2000;24(4):385-401.
- 13- Shin KC, Lee JJ, Kim KH, Song MC, Huh JS. Axial crush and bending collapse of an aluminum/GFRP hybrid square tube and its energy absorption capability. *Composite structures*. 2002;57(1-4):279-87.
- 14- Bouchet J, Jacquelin E, Hamelin P. Dynamic axial crushing of combined composite aluminium tube: the role of both reinforcement and surface treatments. *Composite structures*. 2002;56(1):87-96.
- 15- Najafzade Asl O, Pol M H, Rezaei Golshan N. Experimental study on the parameters affecting behavior of glass/epoxy composite tubes under axial impact loading. *Modares Mechanical Engineering*. 2018; 18 (4):79-89. (In Persian)
- 16- Hanefi E H, Wierzbicki T. Axial resistance and energy absorption of externally reinforced metal tubes. *Composites Part B: Engineering*. 1996;27(5):387-94.
- 17- Sun G, Li S, Liu Q, Li G, Li Q. Experimental study on crashworthiness of empty/aluminum foam/honeycomb-filled CFRP tubes. *Composite Structures*. 2016;152:969-93.
- 18- Shin KC, Lee JJ, Kim KH, Song MC, Huh JS. Axial crush and bending collapse of an aluminum/GFRP hybrid square tube and its energy absorption capability. *Composite structures*. 2002;57(1-4):279-87.
- 19- Zarei R. Experimental and numerical crashworthiness investigation of hybrid composite aluminum tubes under dynamic axial and oblique loadings. *International Journal of Automotive Engineering*. 2015;5(3):1084-93.
- 20- Kim HC, Shin DK, Lee JJ. Characteristics of aluminum/CFRP short square hollow section beam under transverse quasi-static loading. *Composites Part B: Engineering*. 2013;51:345-58.
- 21- Zhao XL, Zhang L. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures. *Engineering structures*. 2007;29(8):1808-23.
- 22- Zhu G, Sun G, Yu H, Li S, Li Q. Energy absorption of metal, composite and metal/composite hybrid structures under oblique crushing loading. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018;135:458-83.
- 23- Song HW, Wan ZM, Xie ZM, Du XW. Axial impact behavior and energy absorption efficiency of composite wrapped metal tubes. *International Journal of Impact Engineering*. 2000;24(4):385-401.
- 24- Shen Y, Wu Z, Hu X. Effect of reinforcement layer number on energy absorption of aluminum-CFRP hybrid square tubes under axial loading: Experimental and numerical study. *Thin-Walled Structures*. 2020;155:106935.
- 25- Zhang J, Lu B, Zheng D, Li Z. Experimental and numerical study on energy absorption performance of CFRP/aluminum hybrid square tubes under axial loading. *Thin-Walled Structures*. 2020;155:106948.
- 26- Yang H, Lei H, Lu G, Zhang Z, Li X, Liu Y. Energy absorption and failure pattern of hybrid composite tubes under quasi-static axial compression. *Composites Part B: Engineering*. 2020;198:108217.