



Semnan University



Research Article

Theoretical, Experimental and Numerical Analysis of Behavior of Adhesive Bonded Joints Thin-Walled Aluminum-Composite Structures Under Axial Loading

Reza Rahmani ^a, Hamed Saeidi Googarchin ^{a,*}

^a School of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-01-14

Revised: 2024-05-05

Accepted: 2024-05-28

Keywords:

Hybrid thin-walled structure;
Adhesive bonded joints;
Theoretical model;
local reinforcement;
Crashworthiness;
Ply angle composite.

ABSTRACT

Aluminum-composite hybrid structures have the ability to absorb high energy under crushing axial load. In this research, by using the advantages of adhesive bonding, the local reinforcement of square aluminum energy absorber has been done by composite. In this regard, a theoretical analysis has been proposed to predict the average collapse force of hybrid structures. The validity of the theoretical model has been confirmed by experimental results. In this study, four L-shaped composites are locally attached to the rectangle from inside the aluminum structure using Araldite 2015 glue. Finite element model is developed to analyze these hybrid structures. Five different modes of fiber arrangement angle [15,-15], [45,-45], [90,90], [0,90] and [0,90] are considered for the composite. Similarly, the number of composite layers varies from 2 to 8 layers. The proposed theoretical model can quickly predict the average collapse force and dissipated energy of the structure when the geometrical parameters and mechanical properties of the composite and metals are given. The results showed that compared to aluminum and aluminum-composite energy absorbers, due to the adhesive connection between aluminum and composite in the locally reinforced aluminum-composite sample, the composite absorbed energy by following the aluminum collapse pattern and creating continuous failure and collapse modes. It increased only 155.75% for aluminum and 22.99% for aluminum-composite. Among the selected cases, the optimal number of composite layers for locally reinforced aluminum-composite energy absorber is 4 layers and the optimal angle for internal reinforcement is [0,90].

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32967.2606>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: hsaeidi@iust.ac.ir

How to cite this article:

Saeidi Googarchin, H., & Rahmani, R. (2024). Theoretical, Experimental and Numerical Analysis of Behavior of Adhesive Bonded Joints Thin-Walled Aluminum-Composite Structures Under Axial Loading. Journal of Modeling in Engineering, 22(79), 293-310. doi: 10.22075/jme.2024.32967.2606

تحلیل تئوری، آزمایشگاهی و عددی رفتار سازه‌های اتصال چسبی جدار نازک آلومینیوم – کامپوزیت تحت بارگذاری محوری

رضا رحمانی^۱، حامد سعیدی گوگرچین^{۱*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴	در این تحقیق، با استفاده از مزایای اتصال چسبی، تقویت موضعی جاذب انرژی آلومینیوم مربعی شکل توسط کامپوزیت صورت گرفته است. در این رابطه یک تحلیل تئوری برای پیش‌بینی نیروی متوسط لهیدگی سازه‌های هیبریدی پیشنهاد شده است. صحت مدل تئوری با نتایج تجربی تأیید شده است. در این مطالعه چهار کامپوزیت ال - شکل با استفاده از چسب آرالدیت ۲۰۱۵ به صورت موضعی به چهار گوشه از داخل سازه آلومینیومی متصل شده‌اند. مدل المان محدود برای تحلیل این ساختارهای هیبریدی توسعه داده شده است. پنج حالت مختلف از زاویه چینش الیاف [۱۵ و -۱۵]، [۴۵ و -۴۵]، [۹۰ و -۹۰]، [۹۰ و ۰] و [۰ و ۹۰] برای کامپوزیت در نظر گرفته شده است. همین‌طور تعداد لایه‌های کامپوزیت از ۲ تا ۸ لایه متفاوت می‌باشند. مدل تئوری پیشنهادی می‌تواند به سرعت نیروی متوسط لهیدگی و انرژی مستهلک شده سازه را هنگامی که پارامترهای هندسی و خواص مکانیکی کامپوزیت و فلزات داده شده‌اند، پیش‌بینی کند. نتایج نشان داد که در مقایسه با جاذب‌های انرژی آلومینیوم و آلومینیوم - کامپوزیت، به دلیل اتصال چسبنده بین آلومینیوم و کامپوزیت در نمونه تقویت‌شده موضعی آلومینیوم - کامپوزیت، کامپوزیت با پیروی از الگوی فروریزش آلومینیوم و ایجاد حالت‌های شکست و فروریزش پیوسته، جذب انرژی را نسبت به حالت آلومینیوم تنها ۱۵۵٪ و نسبت به حالت آلومینیوم - کامپوزیت ۲۲٪ افزایش داد. در میان حالت‌های انتخابی، تعداد بهینه لایه‌های کامپوزیتی برای جاذب انرژی تقویت‌شده موضعی آلومینیوم - کامپوزیت، ۴ لایه و زاویه بهینه برای تقویت داخلی [۰ و ۹۰] است.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸	
واژگان کلیدی:	
سازه جدار نازک هیبریدی، اتصالات چسبی، مدل تئوری، تقویت موضعی، قابلیت ضربه‌پذیری، زاویه الیاف کربن.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32967.2606>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

خودرو شده و با روند توسعه فعلی به‌خوبی سازگار شده است [۲]. فناوری سبک‌سازی خودرو یک کاربرد یکپارچه است از جمله بهینه‌سازی ساختاری، مواد جدید و فرایندهای تولیدی پیشرفته. اگرچه تحقیقات زیادی در مورد روش‌های سبک کردن وسیله نقلیه وجود دارد؛ اما سیستم نظری و روند تجزیه و تحلیل این روش‌ها باید بیشتر بهبود یابد [۳]. روش معمول برای بهینه‌سازی اجزای خودرو جهت سبکی

طراحی سبک^۲ یک روش مؤثر برای کاهش مصرف انرژی است. با این حال، چگونگی اطمینان از قابلیت ضربه‌پذیری سازه خودرو یک مشکل فنی چالش‌برانگیز در فرایند طراحی سبک است [۱]. به‌منظور دستیابی به طراحی سبک بدون کاهش عملکرد ایمنی وسایل نقلیه، تعداد زیادی از محققان تحقیقات متعددی انجام داده‌اند که منجر به توسعه صنعت

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hsaeidi@iust.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

² Lightweight

استناد به این مقاله:

سعیدی گوگرچین، حامد، و رحمانی، رضا. (۱۴۰۳). تحلیل تئوری، آزمایشگاهی و عددی رفتار سازه‌های اتصال چسبی جدار نازک آلومینیوم-کامپوزیت، تحت بارگذاری محوری. مدل سازی در مهندسی، ۲۲(۷۹)، ۲۹۳-۳۱۰. doi: 10.22075/jme.2024.32967.2606

ورق‌های تقویت شده اندکی کمتر از ورق‌های ساده است. همچنین مشخص شد که ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ میلی‌متر با لچکی دارای عملکرد بهتری نسبت به بقیه ورق‌ها می‌باشد [۹]. سان و همکاران [۱۰]، با معرفی مقاطعی با تعداد گوشه‌های اضافه شونده که یک‌شکل مقطع چندگوشه محدب را تشکیل می‌داد، رفتار لهدگی را تحت ضربه محوری مورد بررسی قرار دادند. هدف آن‌ها بررسی تأثیر افزایش تعداد گوشه‌ها بدون افزایش محیط مقطع روی ظرفیت جذب انرژی بود. آن‌ها برای این منظور نمونه‌ها را در نرم‌افزار LS-Dyna شبیه‌سازی نموده و علاوه بر این از تحلیل تئوری برای پیش‌بینی نیروی لهدگی میانگین و انرژی جذب شده استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش تعداد گوشه‌ها منجر به افزایش جذب انرژی می‌شود. بیشترین افزایش راندمان جذب انرژی مقدار ۱۱ درصد و با همان مقدار ماده مصرف شده در ساخت مقطع گزارش شد. سعیدی و همکاران [۱۱] ویژگی‌های جذب انرژی لوله‌های چندسلولی مخروطی بهبودیافته توسط فوم‌ها بررسی نمودند. برای فرایند جذب انرژی، یک رابطه تئوری برای نشان دادن بار میانگین لهدگی لوله‌های پر شده با فوم با در نظر گرفتن ترکیبی از میانگین بار لهدگی لوله‌های پر نشده، فوم پرکننده و مقاومت اصطکاکی بین آن‌ها (تعامل اثرات) ارائه نمودند.

علوی نیا و خدابخش تأثیر فاصله لوله‌های جدار نازک متداخل بر رفتار مکانیکی و جذب انرژی آن‌ها از طریق شبیه‌سازی با نرم‌افزار اجزاء محدود LS-Dyna بررسی کردند. با شبیه‌سازی دو لوله متداخل جدار نازک استوانه‌ای از جنس‌های آلومینیوم و فولاد تحت بار محوری ضربه‌ای، رفتار جذب انرژی لوله‌ها با افزایش فاصله آن‌ها مورد بررسی قرار دادند و فاصله بهینه لوله‌ها برای بیشینه کردن مقدار جذب انرژی به دست آوردند [۱۲]. زمانی و ایزدپناه به بررسی فروریزش لوله‌های کامپوزیتی پر شده از فوم پلی‌یورتان تحت بارگذاری فشاری با سرعت‌های متفاوت پرداختند. مبتنی بر مدل اعتبارسنجی شده در نرم‌افزار المان محدود، تحلیلی پارامتریک به منظور استخراج تأثیر ضخامت سازه، زاویه بارگذاری و چگالی فوم پلی‌یورتان بر میزان جذب انرژی انجام گرفته شد [۱۳].

ژو و همکاران [۱۴] برای مقایسه عملکرد قابلیت ضربه

بیشتر با قابلیت ضربه‌پذیری^۲، استفاده از فولاد با استحکام بالا یا برخی مواد کامپوزیتی مانند کامپوزیت پلی‌استر با الیاف شیشه‌ای^۴ و کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن^۵ است. با این حال، قیمت بالای این مواد به طور مستقیم هزینه تولید خودرو را افزایش خواهد داد. علاوه بر استفاده از مواد جدید، یک راه‌حل جایگزین استفاده از ساختارهای جدار نازک تقویت‌شده است که پتانسیل بهبود قابلیت ضربه‌پذیری سازه را دارند. این سازه‌ها معمولاً توسط فرایندهای جوشکاری مرسوم در طراحی سازه خودرو به هم متصل نمی‌شوند و نیاز به استفاده از روش‌های جدید برای اتصال از جمله اتصالات چسبی، احساس می‌شود. [۴-۷].

استفاده از مواد کامپوزیتی در حوزه‌های گوناگون صنعتی از جمله صنایع خودروسازی افزایش چشمگیری داشته است. کامپوزیت‌ها به دلایل مختلف، جایگزین مناسبی برای قطعات فلزی محسوب می‌شوند که برجسته‌ترین آن‌ها، نسبت استحکام و سفتی به وزن بالاست استفاده از چندلایه‌های الیافی - فلزی^۶ در بال و بدنه هواپیما و نیز تقویت پارامترهای ضربه‌پذیری در کراش باکس‌ها^۷ از جمله موارد فوق است. با وجود همه این مزیت‌ها، هنوز موانعی در استفاده از این‌گونه مواد در کاربردهای عملی بخصوص در حوزه قابلیت ضربه‌پذیری وجود دارد و بیشتر تحقیقات این حوزه بر روی قطعات فلزی انجام شده است [۷].

دامغانی نوری و همکاران به بررسی جاذب‌های استوانه‌ای ساخته شده از ورق‌های مشبک تحت بارگذاری ضربه‌ای پرداختند. این نوع جاذب‌ها دارای وزن خیلی کمی نسبت به نمونه‌های مشابه دارند و اغلب به صورت مطلوبی دچار تاخوردگی می‌شوند. دامغانی نوری و همکاران تحقیق خود را بر روی نمونه‌هایی با زاویه صفر و زاویه نود درجه انجام دادند. آن‌ها دریافتند که جاذب‌های با زاویه سلول صفر دارای فروریزش متقارن بوده و ظرفیت جذب انرژی بالایی داشتند و جاذب‌های با زاویه سلول نود دچار کمناش کلی شده و مقدار جذب انرژی مناسبی نداشتند [۸]. موسوی‌زاده و همکاران یک بررسی آزمایشگاهی روی ورق‌های فولادی تخت و انحادار و همچنین تقویت شده به وسیله سخت‌کننده‌های عمود بر صفحه ورق یا همان لچکی، تحت اثر ضربه ناشی از سقوط آزاد وزنه، انجام دادند. آن‌ها با انجام این پژوهش دریافتند که مقدار انرژی جذب شده توسط

⁶ Fiber Metal Laminates

⁷ Crash box

³ Crashworthiness

⁴ GFRP

⁵ CFRP

از مدل‌های آسیب در کامپوزیت و تعیین مدل ناحیه چسبناک مناسب برای پیش‌بینی رفتار چسب، یک مدل عددی جهت بررسی رفتارهای گسیختگی در سازه و اتصالات در حین فرایند جذب انرژی پرداخته شده است. در واقع، می‌توان به طور خلاصه گفت که ارائه یک مدل تئوری جدید که البته در ارائه آن از تئوری‌های قبلی نیز الهام گرفته شده است، استفاده از لایه‌های چسب برای اتصال لایه‌های CFRP به لوله آلومینیومی و بررسی هم‌زمان اثر زاویه کامپوزیت بر مقدار بیشینه نیرو انرژی جذب شده و از همه مهم‌تر پوشانده شدن تنها بخشی از لوله آلومینیومی که همان گوشه‌های لوله هستند (پوشش موضعی)، از جمله نوآوری‌های تحقیق حاضر می‌باشد. شایان ذکر است که این نتایج تحقیق نشان داد که به‌منظور ارائه یک تئوری قابل قبول و موفق باید دو عامل نیروهای غشایی که هم در کامپوزیت و هم در فلز ایجاد می‌شوند و نیز لولاهای پلاستیک به وجود آمده در سازه را هم‌زمان لحاظ کرد و مقدار انرژی جذب شده توسط این دو مکانیزم را محاسبه نمود.

۲- مکانیک سازه جاذب انرژی آلومینیوم/کامپوزیت

یکی از اهداف پژوهش حاضر ارائه راه‌حلی تئوری است تا به کمک آن بتوان مقدار انرژی لازم برای له کردن و فروریزش جاذب‌های انرژی هیبریدی را تحت بارمحوری، پیش‌بینی کرد. همچنین سعی بر آن است که بتوان مقدار نیروی لازم برای این کار را نیز به کمک روش تئوری تعیین نمود. جاذب انرژی در نظر گرفته شده در این تحقیق، متشکل از دو بخش فلزی و کامپوزیتی است که به کمک چسب به هم متصل شده‌اند. سطح مقطع این جاذب در شکل (۱) نشان داده شده است. فرض می‌شود بارمحوری F به سازه وارد می‌شود و به میزان δ آن را فشرده می‌کند؛ بنابراین، باتوجه به این که کار انجام شده توسط این نیرو به صورت انرژی در سازه ذخیره می‌گردد، می‌توان نوشت [۱۸]:

$$\int_0^{\delta_f} F(\delta) d\delta = \int_A [t_m \sigma_m d\varepsilon + t_c \sigma_c d\varepsilon] dA + \sum_i \int_L M_i^i d\alpha^i dL \quad (1)$$

در رابطه (۱) سه اندیس وجود دارد که شامل m ، c و 0 می‌باشند. اندیس m نشان‌دهنده پارامترهای مربوط به فلز^۸

پذیری یک لوله آلومینیومی را با یک لوله CFRP برای به دست آوردن پیکربندی‌های مختلف ترکیب کردند و این پیکربندی‌ها در معرض بارگذاری شبه استاتیک قرار گرفتند. این بررسی به‌وضوح مفهوم هزینه و اهمیت ترتیب قرارگیری ساختاری اجزا سازه هیبرید را در طول تولید جاذب‌های انرژی هیبریدی را به تصویر کشید. حاتمی و همکاران به بررسی و مقایسه نظری و عددی رفتار دینامیکی یک مدل متشکل از چهار میله و چهار مفصل الاستیک-پلاستیک تحت اثرات اینرسی در دو حالت تک سلولی و دو سلولی پرداختند [۱۵]. آن‌ها با انجام این مطالعه دریافتند که فروریزش جاذب به صورت متقارن دو سوپه خواهد بود. همچنین مقایسه و بررسی نتایج درستی فرضیات و روش‌های به کار رفته را در هر دو حالت تک سلولی و دو سلولی به اثبات رساند. بامباچ و همکارانش [۱۶] رفتار یک سازه هیبریدی فلزی کامپوزیتی را تحت بارمحوری شبه استاتیکی به‌صورت تئوری و تجربی مطالعه کردند. فلز استفاده شده از جنس فولاد و کامپوزیت زمینه پلیمری و از الیاف کربن بودند. نیروی متوسط را به‌صورت تئوری محاسبه شده و با نتایج تئوری و تجربی مطابق خوبی داشته‌اند. شن و همکاران [۱۷] رفتار فروریزش لوله‌های هیبریدی آلومینیوم CFRP با تعداد لایه‌های مختلف CFRP از طریق آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی مورد بررسی قرار دادند و با یک لوله آلومینیومی خالص مقایسه کردند. آن‌ها بیان نمودند که باتوجه به نتایج تجربی، ظرفیت جذب انرژی همه نمونه‌ها با افزایش تعداد لایه‌های CFRP تا چهار لایه حالت تغییر شکل لوله‌های هیبریدی را از فاز فلزی مسلط به فاز CFRP غالب تبدیل کرد. این تبدیل همچنین منجر به افزایش تعداد لوب‌های فروریخته و کاهش فاصله خرد شدن مؤثر می‌شود که منجر به تغییر شکل پلاستیک شدیدتر دیواره‌های لوله هیبریدی می‌شود.

در این پژوهش به بررسی تجربی، عددی و تحلیلی رفتار جاذب‌های انرژی اتصال چسبی آلومینیوم-الیاف کربن تحت بارمحوری شبه‌استاتیکی پرداخته شده است. بدین منظور ابتدا به توسعه یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی رفتار جاذب‌های انرژی هیبریدی با استفاده از تئوری المان گوشه‌ها پرداخته شده و برای راستی‌آزمایی روابط ارائه‌شده، نیروی میانگین لهیدگی و میزان جذب انرژی با نمونه‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. سپس با استفاده

^۸ Metal

شکل (۲-الف) نشان می‌دهد که یک طول موج از لهیدگی که دارای طول $2H$ است، به شکل چهار مثلث متوالی به گونه‌ای که در این شکل نشان داده شده است، تغییر فرم می‌دهد. مثلث اول و چهارم تحت فشار و مثلث‌های دوم و سوم تحت کشش می‌باشند. زوایای این مثلث‌ها نیز همان‌طور که دیده می‌شود برابر 45° یا 90° درجه می‌باشند. با توجه به متقارن بودن مسئله در یک طول موج، تنها نیمی از آن در نظر گرفته شده است. بنابراین نیمه بالایی طول موج که طول کلی آن برابر H است لحاظ شده است. این نیمه نیز خود از دو نیمه به ارتفاع $H/2$ تشکیل شده است. حال اگر $H/2$ پایین این بخش در نظر گرفته شود به مثلث دوم مربوط می‌شود. این مثلث دوباره در شکل (۳) نشان داده شده است. مقدار تنش در مناطق تغییر شکل داده غشا، ثابت و برابر σ_0 است که به آن تنش سیلان^{۱۰} گفته می‌شود. مقدار تنش سیلان را می‌توان از رابطه (۲) تعیین نمود [۱۹].

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sigma_y \sigma_u}{1+n}} \quad (2)$$

که در این رابطه σ_y و σ_u به ترتیب تنش تسلیم و استحکام نهایی و n نیز نمای کرنش سختی می‌باشد. در بخش‌های تغییر شکل یافته علاوه بر تنش سیلان مقدار ضخامت t_m نیز ثابت در نظر گرفته می‌شود. لذا، اگر در ناحیه مورد بحث چه در نیمه سمت راست المانی به طول C_1 و ضخامت t_m و عرض dh و چه در نیمه سمت چپ المانی به طول C_2 و ضخامت t_m و عرض dh در نظر گرفته شود، مقدار نیروی اعمال شده به آن برابر خواهد بود با [۱۷]:

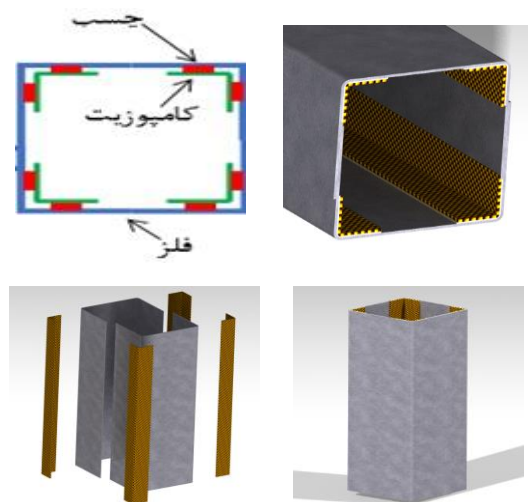
$$dF = \sigma_0 t_m dh \quad (3)$$

با توجه به هندسه سازه، اگرچه مقدار جابه‌جایی نقطه اثر این جزء نیرو برای دو نیمه چپ و راست یکسان است؛ اما مقدار این جابه‌جایی در راستای محور سازه متفاوت است لذا، مسئله باید به صورت انتگرالی حل شود. اگر مقدار جابه‌جایی مذکور مطابق شکل (۵) برابر s در نظر گرفته شود کار انجام شده توسط آن برابر خواهد بود با:

$$dW = s dF \quad (4)$$

باید دقت کرد که جمله اول رابطه (۱)، یعنی $\int_A [t_m \sigma_m d\varepsilon]$ نشان‌دهنده کار انجام شده توسط نیروهای غشایی فلز است، کار نیز برابر با حاصلضرب نیرو

اندیس C نشان‌دهنده پارامترهای مربوط به کامپوزیت^۹ و اندیس 0 نیز نشان‌دهنده حالتی است که فلز کاملاً وارد ناحیه پلاستیک شده است. در سمت راست رابطه (۱)، سه جمله وجود دارد که جمله اول نشان‌دهنده انرژی ذخیره شده به واسطه نیروهای غشایی در فلز، جمله دوم نشان‌دهنده انرژی ذخیره شده به واسطه نیروهای غشایی در کامپوزیت و جمله سوم نیز کاری است که لولاهای پلاستیک ایجاد شده در فلز انجام می‌دهند. در ادامه به محاسبه این مقادیر پرداخته می‌شود.



شکل ۱- نمونه شماتیک سازه آلومینیوم-کامپوزیت

زمانی که این جاذب انرژی تحت بارگذاری محوری قرار می‌گیرد، با تداوم اعمال بار محوری دچار چین‌خوردگی‌های متوالی می‌شود که دارای طول موج‌های مشخصی هستند. فرض شده است طول این چین‌خوردگی‌ها برابر $2H$ باشد. در ابتدا گوشه‌ای از این سازه یا همان جاذب انرژی در نظر گرفته می‌شود. این گوشه که در واقع برابر یک برش یک‌چهارم از سازه است در شکل (۲-الف) نشان داده شده است. لولاهای پلاستیک ایجاد شده در آن در حین اعمال بار و در حالت نهایی نیز به ترتیب در شکل‌های (۲-ب) و (۲-پ) نشان داده شده‌اند. در واقع، شکل (۲-الف) نشان‌دهنده نحوه تغییر فرم ایجاد شده در سازه است. جملات سمت راست معادله (۱) را می‌توان به شرح ذیل محاسبه نمود.

۱-۲- انرژی ذخیره شده به واسطه نیروهای غشایی در فلز

¹⁰ Flow stress

⁹ Composite

$$\int_A [t_m \sigma_m d\varepsilon] dA = \frac{1}{2} \sigma_0 t_m H^2 \quad (۹)$$

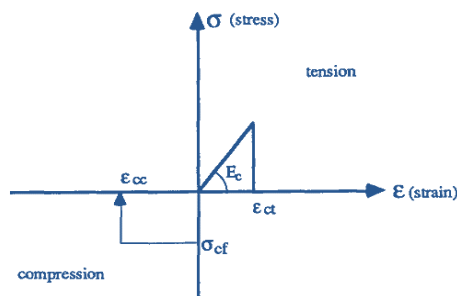
کمیت به‌دست‌آمده انرژی غشایی فلز یا همان کار انجام‌شده توسط نیروهای غشایی فلز است. اگر این کمیت را برحسب گشتاور پلاستیک کامل (M_0) نوشته شود، خواهیم داشت:

$$\int_A [t_m \sigma_m d\varepsilon] dA = 2M_0 \frac{H^2}{t_m} \quad (۱۰)$$

که در آن $M_0 = \frac{1}{4} \sigma_0 t_m^2 H^2$.

۲-۲- انرژی ذخیره‌شده به‌واسطه نیروهای غشایی در کامپوزیت

برای تعیین انرژی ذخیره‌شده به‌واسطه نیروهای غشایی در کامپوزیت باید به نمودار تنش - کرنش آن توجه شود. چراکه، خواص کششی و فشاری کامپوزیت باهم یکی نیستند. یک نمونه نمودار تنش - کرنش کامپوزیت در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل ۳- یک نمونه نمودار تنش-کرنش کامپوزیت [۱۸]

در میزان جابه‌جایی محل اثر نیرو می‌باشد. حال اگر المانی به طول C_2 و ضخامت t_m و عرض dh در نظر گرفته شود مقدار نیروی وارد شده به این المان را می‌توان از رابطه (۳) به دست آورد. میزان جابه‌جایی محل اثر نیروی این المان نیز طبق شکل (۴) برابر s می‌باشد. لذا، کار انجام شده توسط این المان را می‌توان از رابطه (۴) محاسبه نمود. بنابراین، کار کل نیروی غشایی در فلز برای یک مثلث شکل (۲-الف) برابر $\int dW$ است و چون در هر گوشه چهار عدد از این مثلث‌ها وجود دارد لذا، بر اساس آنچه که گفته شد برای محاسبه جمله اول رابطه (۱) می‌توان از رابطه (۵) استفاده کرد:

$$\int_A [t_m \sigma_m d\varepsilon] dA = 4 \int dW = 4W \quad (۵)$$

باید توجه کرد که خواص کششی و فشاری فلز یکسان در نظر گرفته شده است؛ بنابراین با توجه به شکل (۴) می‌توان گفت:

$$\frac{H}{2} - h = s \quad (۶)$$

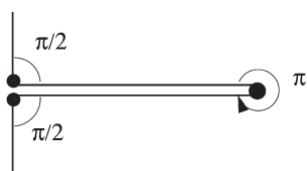
با جای‌گذاری رابطه (۶) در رابطه (۴) خواهیم داشت:

$$dW = \sigma_0 t_m \left(\frac{H}{2} - h \right) dh \quad (۷)$$

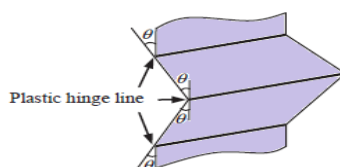
لذا:

$$W = \frac{1}{8} \sigma_0 t_m H^2 \quad (۸)$$

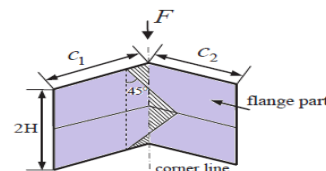
بنابراین، رابطه (۵) خواهد شد:



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۲- الف: المان‌های کشش. ب: خطوط لولای خمشی. ج: شماتیک لولاها پس از بارگذاری [۲۰].

باتوجه‌به نمودار شکل (۳) می‌توان دریافت که در زمانی که کامپوزیت تحت کشش قرار گیرد، باتوجه‌به آن که مدل ماده آن صلب-پلاستیک کامل است لذا، مقدار تنش به وجود آمده در آن تابع کرنش اعمال شده نمی‌باشد و مقدار آن ثابت است که این مقدار ثابت σ_{cc} می‌باشد. بنابراین، برای مثلث‌های یک و چهار شکل (۲-الف) که حالت فشاری در آن‌ها حاکم است می‌توان نوشت:

لذا، برای محاسبه جمله دوم رابطه (۱) باید آن را به دو بخش فشاری و کششی تقسیم نمود [۱۸].

$$\int_A [t_c \sigma_c d\varepsilon] dA = \int_A [t_c \sigma_{cc} d\varepsilon] dA + \int_A [t_c \sigma_{ct} d\varepsilon] dA \quad (۱۱)$$

بنابراین در رابطه (۱۱) تنش نهایی کامپوزیت در فشار و σ_{ct} تنش نهایی کامپوزیت در کشش است.

$$\int_0^{h_f} \varepsilon^2 dh = \int_0^{h_f} \left(\frac{s}{c}\right)^2 dh = \frac{-1}{3c^2} \left[s_f^3 - \left(\frac{H}{2}\right)^3 \right] = \frac{1}{3c^2} \left[\frac{H^3}{8} - c^3 \varepsilon_{ct}^3 \right] \quad (15)$$

و نیز:

$$\int_{h_f}^{\frac{H}{2}} \varepsilon^2 dh = \int_{h_f}^{\frac{H}{2}} \varepsilon_{ct}^2 dh = \varepsilon_{ct}^2 s_f = c \varepsilon_{ct}^3 \quad (16)$$

بنابراین، معادله (۱۴) خواهد شد:

$$\frac{t_c E_c}{2} \int_0^{\frac{H}{2}} \varepsilon^2 (cdh) = \frac{t_c E_c c}{2} \left(\frac{H^3}{24c^2} + \frac{2c \varepsilon_{ct}^3}{3} \right) \quad (17)$$

و باتوجه به این که حالت کششی در دو مثلث ایجاد می شود و مقدار c می تواند c_1 یا c_2 باشد لذا، انرژی غشایی جذب شده توسط کامپوزیت در حالت کششی خواهد شد:

$$\int_A [t_c \sigma_{ct} d\varepsilon] dA = t_c E_c c_1 \left(\frac{H^3}{24c_1^2} + \frac{2c_1 \varepsilon_{ct}^3}{3} \right) + t_c E_c c_2 \left(\frac{H^3}{24c_2^2} + \frac{2c_2 \varepsilon_{ct}^3}{3} \right) \quad (18)$$

۳-۲- انرژی ذخیره شده به واسطه ایجاد لولاهای

پلاستیک در فلز

باتوجه به شکل (۲-ب) می توان گفت که در طول موج در نظر گرفته شده در این شکل سه لولای پلاستیک ایجاد می شود که یکی در ابتدا طول موج با زاویه $\frac{\pi}{2}$ و یکی نیز در انتهای آن با زاویه $\frac{\pi}{2}$ و یکی نیز در قسمت میانی آن با زاویه π همچنین باتوجه به این که طول بخش در نظر گرفته شده برابر است با $c = c_1 + c_2$ لذا، می توان گفت:

$$\sum_i \iint_L M_0^i d\alpha^i dL = M_0 \left(\frac{\pi}{2} + \pi + \frac{\pi}{2} \right) \quad (19)$$

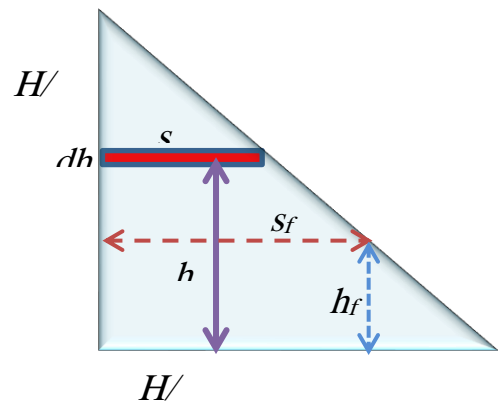
$$(c_1 + c_2) = 2\pi (c_1 + c_2) M_0$$

اکنون می توان باتوجه به معادلات (۱۰)، (۱۲)، (۱۸) و (۱۹) مقدار انرژی کل جذب شده برای یک گوشه سازه را محاسبه نمود. بر اساس معادلات مذکور می توان نوشت:

$$E_{Comer} = 2M_0 \frac{H^2}{t_m} + \frac{1}{4} \sigma_{cc} t_c H^2 + t_c E_c c_1 \left(\frac{H^3}{24c_1^2} + \frac{2c_1 \varepsilon_{ct}^3}{3} \right) + t_c E_c c_2 \left(\frac{H^3}{24c_2^2} + \frac{2c_2 \varepsilon_{ct}^3}{3} \right) + 2\pi (c_1 + c_2) M_0 \quad (20)$$

$$\int_A [t_c \sigma_{cc} d\varepsilon] dA = 2 \times \left(\frac{1}{8} \sigma_{cc} t_c H^2 \right) = \frac{1}{4} \sigma_{cc} t_c H^2 \quad (12)$$

اما در حالت کششی یعنی مثلث های دوم و سوم شکل (۲-الف) اوضاع کمی متفاوت است و باید دقت بیشتری نمود. در اینجا باید به دو نکته مهم توجه شود. اول آن که در حالت کششی تنش تابعی از مقدار کرنش است و دیگر مستقل از آن نیست. دوم آن که مقدار جابه جایی نیرو (یعنی s) در این حالت از صفر تا $H/2$ نمی باشد چرا که بعد از آن که در کامپوزیت کرنش ε_{ct} به وجود آمد، کامپوزیت دچار گسیختگی می شود و دیگر نیرو تحمل نمی کند. بنابراین محدوده تغییر s از صفر تا s_f می باشد که $\varepsilon_{ct} = \frac{s_f}{c}$ مقدار c می تواند c_1 یا c_2 باشد. برای درک بهتر به شکل (۴) مراجعه شود.



شکل ۴- دومین مثلث نشان داده شده در شکل (۲-الف) و تغییر طول بحرانی (s_f)

باتوجه به نمودار تنش - کرنش کامپوزیت که در شکل (۳) ارائه شده است، بهتر است انتگرال مورد نظر را به شکل زیر محاسبه کرد.

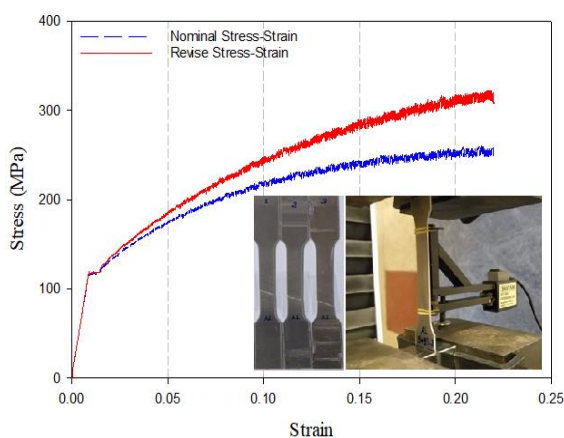
$$\int_A [t_c \sigma_{ct} d\varepsilon] dA = t_c \int_A \left[\frac{1}{2} E_c \varepsilon^2 \right] dA = \frac{t_c E_c}{2} \int_0^{\frac{H}{2}} \varepsilon^2 (cdh) \quad (13)$$

باتوجه به شکل (۴) معادله (۱۳) را باید به صورت زیر نوشت:

$$\frac{t_c E_c}{2} \int_0^{\frac{H}{2}} \varepsilon^2 (cdh) = \frac{t_c E_c c}{2} \left(\int_0^{h_f} \varepsilon^2 dh + \int_{h_f}^{\frac{H}{2}} \varepsilon^2 dh \right) \quad (14)$$

حال انتگرال های سمت راست معادله (۱۴) را جداگانه حساب می شوند:

نقاط تمرکز تنش، با استفاده از دستگاه آزمون کشش سنتام و با سرعت 2 mm/min نمونه‌ها را آزموده و استخراج نتایج صورت گرفته است.



شکل ۵- منحنی تنش- کرنش مهندسی و واقعی برای آلیاژ ۳۱۰۵Al

در شکل (۵)، تصویری از نمونه‌های آزمایشگاهی تست کشش، فرایند انجام آزمون و نتایج تغییر تنش برحسب کرنش نمایش داده شده است.

مشخصات آلومینیوم مورد استفاده در پژوهش حاضر نیز در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات آلومینیوم مورد استفاده در پژوهش حاضر

AL-3105	واحد	نماد	پارامتر مکانیکی
۶۹	Gpa	E	مدول الاستیک
۲۷۰۰	kg/m^3	ρ	چگالی
۱۴۹	Mpa	σ_y	تنش تسلیم
۰/۳۳	%	ν	ضریب پواسون
۲۲۲	Mpa	σ_f	تنش نهایی

برای ساخت قطعات کامپوزیتی در این پژوهش از الیاف کربن T200 با چگالی ۱۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، تک‌جهته با رزین اپوکس LY5052 و سخت‌کننده 5052 استفاده شده است که مشخصات آن‌ها در جدول (۲) آورده شده است.

باتوجه به تحقیقات صورت گرفته و پژوهش‌هایی که پیش از این انجام شده [۲۳]، چسب آرالدیت ۲۰۱۵ به عنوان چسب سازه‌ای این مطالعه انتخاب شده است. چسب ذکر شده محصول شرکت آلمانی Huntsman است و در صنایع مختلفی از جمله خودروسازی و صنایع هوافضا کاربرد دارد. این چسب از دو جزء تشکیل شده است. از ویژگی‌های مهم

شایان ذکر است که در اکثر مراجع یک ضریب برای سمت چپ معادله (۱) در نظر گرفته می‌شود. به این ضریب، ضریب فاصله لهدگی مؤثر (η) گفته می‌شود و مقدار آن معمولاً ۰/۷۵ در نظر گرفته می‌شود [۲۱].

باتوجه به آنچه که گفته شد اگر مقدار میانگین نیروی اعمال شده به طول موج در نظر گرفته شده، برابر F_m در نظر گرفته شود می‌توان نوشت:

$$F_m \times 2H \times \eta = 2M_0 \frac{H^2}{t_m} + \frac{1}{4} \sigma_{cc} t_c H^2 + t_c E_c c_1 \left(\frac{H^3}{24c_1^2} + \frac{2c_1 \varepsilon_{cl}^3}{3} \right) + t_c E_c c_2 \left(\frac{H^3}{24c_2^2} + \frac{2c_2 \varepsilon_{cl}^3}{3} \right) + 2\pi(c_1 + c_2)M_0 \quad (21)$$

که از این رابطه مقدار F_m به راحتی قابل محاسبه است. اکنون اگر از تابع F_M برحسب H مشتق گرفته شده و برابر صفر قرار داده شود می‌توان مقدار H بهینه را محاسبه نمود. نتایج به دست آمده از این تحلیل در بخش‌های بعدی این پژوهش با نتایج تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی مقایسه گردیده است.

۳-آزمون تجربی

برای اعتبارسنجی روابط تحلیلی ارائه شده در بخش ۲، آزمون بارگذاری محوری شبه استاتیکی بر روی نمونه‌های جاذب انرژی اتصال چسبی آلومینیوم-کامپوزیت انجام شده است.

نمونه‌های جاذب انرژی در سه دسته تمام آلومینیوم، پوسته کامل کامپوزیت بر روی آلومینیوم و تقویت موضعی آلومینیوم با کامپوزیت، با اتصال داخلی ساخته شده و با نرخ بارگذاری 5 mm/min مورد آزمون قرار گرفتند.

در ادامه به مواد، روش ساخت، شرایط آزمون اشاره شده است.

۳-۱- مواد

سازه مدنظر از سه جز اصلی فلزی، تقویت‌کننده‌های ال-شکل کامپوزیتی و چسب تشکیل شده است. برای قسمت‌های فلزی از آلومینیوم Al-3105 استفاده شده است. برای افزایش دقت مدل‌سازی عددی طبق استاندارد ASTM-E8 [۲۲] اقدام به نمونه‌برداری از ورقه‌های مورد استفاده در ساخت قسمت‌های آلومینیومی سازه شده است. بعد از برش کاری نمونه‌ها با استفاده از واترجت و آماده‌سازی سطوح مقطع گلوبی شکل به منظور از بین بردن

شدید هوا وجود داشته باشد و دمای اتاق نیز باید ثابت نگه داشته شود. بعد از قراردادن قسمت‌های مختلف در کنار یکدیگر، با استفاده از فیکسچر و واشرها، آن‌ها در کنار هم ثابت می‌گردند تا حدی که قسمتی از چسب به صورت فیلت از لبه‌ها بیرون بیاید.



شکل ۶- ایجاد فیلت چسب در لبه‌های اتصال.

۳-۳- روش ساخت نمونه کامپوزیتی

در این پژوهش کامپوزیت‌ها از الیاف کربن به صورت دستی یک‌بار دور نمونه ساخته شده و یک‌بار با استفاده از قالب‌های L شکل و با کمک اتصال چسبی به صورت موضعی در گوشه‌های نمونه چسبانده شدند. فرایند لایه‌گذاری دستی یکی از قدیمی‌ترین و درعین حال اصلی‌ترین روش‌های ساخت قطعات کامپوزیتی است. این روش از چندین مرحله تشکیل می‌شود که عبارت‌اند از واکس‌زدن سطح قالب، اعمال فیلم جداکننده، اعمال لایه‌ی ژل‌کوت، قرار دادن یک لایه الیاف تیشو جهت تقویت لایه‌ی ژل‌کوت، اعمال رزین و قراردادن لایه‌ها به میزان موردنیاز و در صورت نیاز قراردادن لایه رویی. برای راندن حباب‌های هوای گیر افتاده در حین لایه‌گذاری از غلتک برای صاف کردن سطح استفاده شده است.

لایه‌های الیاف با آرایش [۹۰/۹۰] در سه حالت ۲، ۴ و ۸ لایه روی قالب چیده شد. جهت‌گیری و استحکام نهایی سازه کامپوزیت را مشخص می‌کند. رزین با مخلوط کردن ۷۲/۴۷٪ اپوکسی و ۲۷/۵۳٪ هاردنر، آماده گردید و سپس کامپوزیت به مدت ۷ روز در دمای اتاق پخت شد.

در تقویت موضعی ابتدا کامپوزیت بر روی قالب آهنی شکل ساخته شدند و سپس گوشه‌های آن برای به دست آوردن هندسه L شکل به وسیله واتر جت بریده و به قطعه چسبانده شدند.

مشخصات هندسی قسمت‌های مختلف سازه در شکل (۷) آورده شده است.

این چسب می‌توان به استحکام برشی و پوست‌کنی بالا و مقاومت خوب در برابر نفوذ آب اشاره کرد. از طرفی دیگر به دلیل این‌که فرآیند پخت این چسب در دمای اتاق صورت می‌گیرد، دیگر نیازی به دستگاه خلأ و کوره نمی‌باشد.

جدول ۲- مشخصات کامپوزیت مورد استفاده در پژوهش حاضر

کمیت مکانیکی	کشش		فشار		برش
	طولی	عرضی	طولی	عرضی	
مدول یانگ Gpa	۱۵۳۹۰	۸۷۰۰	۱۴۷۰۰۰	۱۰۲۵۰	۴۶۸۰
چگالی kg/m^3	۱۶۷۰	-	-	-	-
استحکام نهایی Mpa	۲۳۵۰	۳۳	۱۱۲۰	۱۸۶	۶۵
ضریب پواسون	۰/۳۵	۰/۰۳	۰/۲۸۸	-	-

در جدول ۳ خواص چسب آرال دیت ۲۰۱۵ آورده شده است.

جدول ۳- خواص مکانیکی چسب آرال دیت ۲۰۱۵ [۲۲]

مقدار	واحد	کمیت مکانیکی
۱۸۵۰	MPa	E, مدول الاستیسیته
۰/۳۳	---	ν , ضریب پواسون
۱۲/۶۳	MPa	σ_y , تنش تسلیم
۲۱/۶۳	MPa	σ_f , استحکام کششی
۴/۷۷	MPa	ϵ_f , کرنش گسیختگی کششی
۵۶۰	MPa	G, مدول برشی
۱۴/۶	MPa	τ_y , تنش تسلیم برشی
۱۴/۹	MPa	τ_f , استحکام برشی
۴۳/۹	MPa	γ_f , کرنش گسیختگی برشی
۰/۵۶۹	N/mm	G_{IC} , چقرمگی در شکست
۴/۸۶۸	N/mm	G_{IIC} , چقرمگی در برش

۳-۲- طراحی و ساخت نمونه‌ها

پس از انجام مراحل برش کاری و خم‌کاری نمونه‌ها و بعد از این‌که بر روی لبه‌های چسبیده به طور کامل عملیات آماده‌سازی صورت گرفت، دو جزء چسب را با یکدیگر مخلوط شدند. سپس ضخامت یکنواختی از فیلم چسب بر روی چسبیده‌ها ایجاد شد که در شکل (۶) نمونه چسب کاری شده نشان داده شده است. این نکته نیز قابل ذکر است که در همه مراحل اعمال چسب نباید در اتاق جریان

زیر تیوب قرار گرفت. مدت زمان آزمون ۲۴ دقیقه بوده و حداکثر جابجایی فک متحرک ۱۲۰ mm است. به‌منظور ثبت وقایع در شرایط مختلف، یک دوربین عکس‌برداری و فیلم‌برداری در نظر گرفته شده است. از طرفی از یک زمان‌سنج به‌منظور دقت در تطبیق نتایج خروجی از دستگاه و مشاهدات بصری برای توصیف وقایع رخ داده در حین آزمون استفاده شد.

۴- مدل‌سازی‌های عددی

۴-۱- روند مدل‌سازی

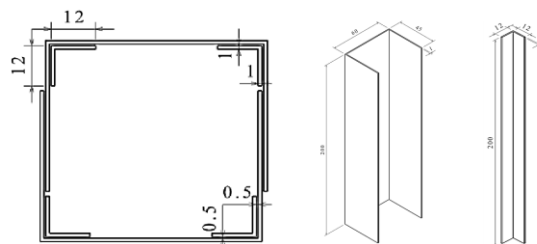
برای مدل‌سازی مربع فلزی، دو قطعه C شکل به طول ۶۰ میلی‌متر و عرض ۴۵ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر رسم و سپس المان‌بندی شدند. ضخامت فلز ۱ میلی‌متر با NLOCL^{۱۱} صفر است. از المان پوسته^{۱۲} نوع^{۱۳} ELFORM^{۱۶} با اندازه تقریبی ۱×۱ میلی‌متر استفاده شده است. قطعات ال شکل کامپوزیتی ۸ و ۲،۴ لایه، به‌صورت لایه‌هایی از المان پوسته مدل شده است. همچنین برای مدل‌سازی رشد ترک‌های محوری داخل لایه‌ای و همچنین حذف المان‌ها بعد از جذب انرژی کامل از گزینه Add_Erosion برای المان‌های کامپوزیت استفاده گردید و در آن کرنش حجمی حذف المان برابر ۰/۹ قرار داده شد.

۴-۲- مدل ماده MAT_24 برای آلومینیوم

(Piecewise Linear Plasticity)

مدل ماده ۲۴ در نرم‌افزار LS-Dyna، یک مدل ماده الاستوپلاستیک^{۱۴} با قابلیت تعریف دلخواه قسمت پلاستیک نمودار تنش-کرنش می‌باشد که این امر سبب افزایش دقت شبیه‌سازی می‌شود. در این مدل ماده، قابلیت تعریف نرخ وابستگی به سرعت^{۱۵} نیز موجود است. معیار شکست در این مدل ماده، کرنش پلاستیک و یا مینیمم گام زمانی^{۱۶} است. ناحیه پلاستیک در این مدل ماده، طبق نمودار تنش کرنش حقیقی وارد می‌شود. نرخ کرنش برای این مدل ماده، از سه تئوری کوپر-سایموند^{۱۷}، Scale yield stress و فرمولاسیون ویسکوپلاستیک^{۱۸} پیروی کرده که هرکدام از این تئوری‌ها برای مدل‌سازی قابل انتخاب می‌باشد.

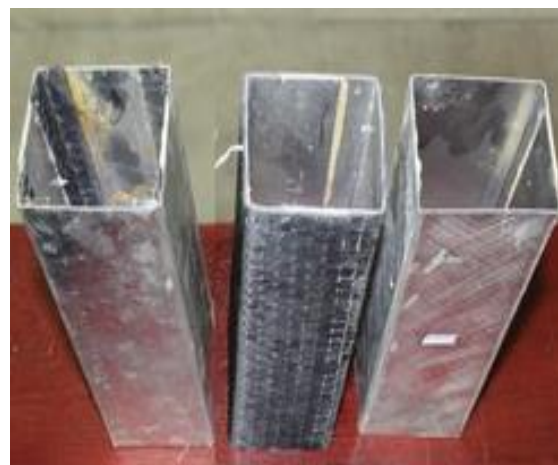
در این پژوهش، برای استفاده از مدل ماده MAT_24 و بر اساس استاندارد ASTM E8 نمونه‌هایی مطابق نمونه‌های



شکل ۷- مشخصات هندسی سازه جاذب انرژی آلومینیوم - کامپوزیت

۴-۳- آزمون فشار شبه استاتیکی

بعد از قراردادن قسمت‌های آلومینیومی و کامپوزیتی بر روی یکدیگر، با استفاده از فیکسچر و واشرها، آن‌ها در کنار هم ثابت شدند، به‌گونه‌ای که قسمتی از چسب به‌صورت فیلت از لبه‌ها بیرون باشد. سپس قطعات متصل شده به مدت ۷ روز در دمای اتاق پختند. در پایان نیز، فیکسچرها جدا شدند و نمونه‌ها آماده آزمون گردیدند (شکل ۸).



شکل ۸- نمونه‌های ساخته شده

آزمونی که بر روی نمونه انجام شد از نوع جابجایی فشاری در راستای محور نمونه‌ها بود. در این مرحله فک متحرک دستگاه با سرعت 5 mm/min به سمت پایین حرکت و نمونه را له می‌کند. پس‌ازاینکه فک متحرک بر روی سطح نمونه چسبانده شد به مقدار 1 KgF تا 4 KgF پیش بار به‌منظور از بین بردن لقی‌های موجود اعمال گردید. قطعه بر روی فک پایینی ثابت می‌شود و این فک به‌عنوان تکیه‌گاه عمل می‌کند. به‌منظور جلوگیری از سرخوردن قطعه در طول مراحل اعمال جابجایی فشاری، یک تکه سمباده زیر

¹⁵ Rate dependency

¹⁶ Minimum time step size

¹⁷ Cowper-Symonds with deviatoric strain rate

¹⁸ Viscoplastic formulation

¹¹ Location of reference surface for three dimensional shell elements

¹² Shell

¹³ Fully integrated shell element modified for higher accuracy

¹⁴ Elasto-plastic material

در رابطه (۲۶)، Y_c به استحکام فشاری در راستای عرضی ضرایب ν_{ab} و $\nu_{ba} \cdot G_{ab} \cdot E_b$ بعد از شکست برابر صفر قرار داده می‌شوند.

۴-۴- اتصال بین لایه‌ای

برای مدل‌سازی اتصال بین لایه‌ای و همچنین لایه‌لایه شدگی از اتصال جداشونده^{۲۰} استفاده شد و جدایش بین لایه‌ای در این نوع اتصال طبق رابطه (۲۷) آغاز می‌شود.

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFLS}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{SFLS}\right)^2 = 1 \quad (27)$$

در اینجا σ_s و σ_n تنش‌های نرمال و برشی سطح تماس و NFLS و SFLS استحکام نرمال و برشی قید هستند. بعد از برقرار شدن رابطه آغاز تخریب، تنش‌ها طبق تابع خطی از فاصله جدایش کاهش پیدا می‌کنند. قابل توجه است که مدل‌سازی لایه‌لایه شدگی به روش اجزاء محدود به شدت به اندازه مش بندی وابسته می‌باشد. برای از بین بردن این اثر از مدل ناحیه چسبندگی^{۲۱} ارائه شده توسط تورن استفاده شد. در این مدل از رابطه رایس (رابطه ۲۷) برای به دست آوردن طول ناحیه چسبندگی می‌شود تا رابطه‌ای بین استحکام باند، نرخ آزاد شدن انرژی بین لایه‌ای به دست آید [۲۴].

$$L_{cz} = \frac{9\pi}{32} E \frac{G_c}{(\tau^0)^2} \quad (28)$$

$$N_e = \frac{L_{cz}}{L_e} \quad (29)$$

$$\tau^0 = \sqrt{\frac{9\pi E G_c}{32 N_e l_e}} \quad (30)$$

با قراردادن رابطه (۲۹) در (۲۸) مقدار استحکام باند (رابطه (۳۰)) به دست می‌آید و با قرار دادن مقادیر چقرمگی مود I و II در این رابطه به ترتیب مقادیر NFLS و SFLS به دست می‌آیند.

تماس بین قطعه فلزی و کامپوزیتی به صورت قید جداشونده^{۲۲} در نظر گرفته شد. با استفاده از این نوع تماس که از ویژگی‌های آن قابلیت استفاده در بین لایه‌های پوسته است، لایه‌لایه شدگی را با حجم محاسباتی بسیار کمتر نسبت به المان‌های حجمی چسبنده^{۲۳} می‌توان شبیه‌سازی کرد.

واقعی از لوله بریده شده و تحت آزمون کشش قرار گرفته است. سپس از خواص مکانیکی طبق نتایج به دست آمده از آزمون کشش نمونه‌های آلومینیومی در مدل ماده استفاده شده است.

۳-۴- مدل ماده MAT_54/55 برای کامپوزیت (Enhanced-Composite-Damage)

مدل ساختاری ۵۴ نرم‌افزار LS-Dyna، اصلاح شده معیار فون مایز می‌باشد که در آن سطح تسلیم به صورت یک تابع درجه دو مکمل برحسب ضرایب نامتغیر^{۱۹} تانسور تنش برای مواد ایزوتروپ عرضی (کامپوزیت‌های تک جهته) در نظر گرفته شده و ضرایب آن برای چهار حالت شکست فشاری و کششی در جهات الیاف و ماتریس، با ساده‌سازی‌های مربوطه به دست می‌آید. در این رابطه موارد زیر را داریم:

۱. معیار شکست کششی در راستای الیاف [۲۴]

$$\left(\frac{\sigma_{aa}}{X_T}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 = 1 \quad (23)$$

در رابطه (۲۳) σ_{aa} و X_T به ترتیب، تنش در راستای ۱، تنش در راستای ۱-۲، استحکام کششی محوری و استحکام برشی می‌باشند. بعد از ایجاد شکست در هر یک از نقاط انتگرال‌گیری المان در راستای ضخامت، خواص الاستیک شامل E_a ، E_b ، G_{ab} و ν_{ab} برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند.

۲. شکست فشاری در راستای الیاف [۲۴]

$$\left(\frac{\sigma_{aa}}{X_c}\right)^2 = 1 \quad (24)$$

در رابطه (۲۴)، X_c استحکام فشاری محوری بوده و بعد از شکست مقادیر ν_{ab} و $\nu_{ba} \cdot E_a$ برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند.

۳. شکست کششی در راستای ماتریس [۲۴]

$$\left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 = 1 \quad (25)$$

در رابطه (۲۵)، Y_c و σ_{bb} به ترتیب تنش در راستای عرضی و استحکام کششی عرضی بوده و ضرایب ν_{ab} و $\nu_{ba} \cdot E_a$ بعد از شکست برابر صفر قرار داده می‌شوند.

۴. شکست فشاری در راستای ماتریس [۲۴]

$$\left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1\right] + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 = 1 \quad (26)$$

²² Tiebreak

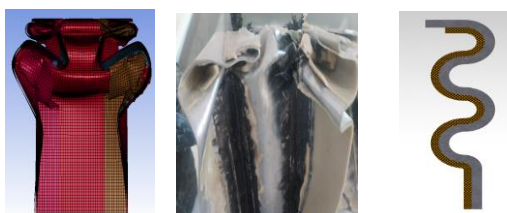
²³ Cohesive

¹⁹ Quadratic

²⁰ Contact automatic surface to surface - Tiebreak

²¹ Cohesive Zone

می‌دهد که محدوده خطاهای موجود در روش‌های تئوری و عددی خیلی زیاد نیست و می‌توان با تقریب خوبی درستی این دو روش را پذیرفت. بر اساس این جدول بیشترین خطای روش تئوری ۱۳/۲٪ و بیشترین خطای روش عددی برابر ۶/۹٪ می‌باشد. منشأ خطا در روش تئوری فرض‌های ساده‌کننده‌ای است که در نظر گرفته شده‌اند و یا تقریب زدن تنش سیلان در فلز به کمک رابطه (۲). در روش عددی نیز تعداد و ابعاد المان‌ها و غیره و نیز خطاهایی که در حین اندازه‌گیری خواص مکانیکی فلز و کامپوزیت اتفاق می‌افتد.



شکل ۹- مقایسه بین (الف) مدل تئوری پیش‌بینی شده و نتایج حاصل از (ب) آزمایش و (ج) مدل‌سازی عددی برای کامپوزیت با زاویه ۹۰

جدول ۵- میزان جذب انرژی و نیروی میانگین لهیدگی برای سازه با چینش الیاف ۹۰ و ۹۰

کد نمونه	تعداد لایه	میزان جذب انرژی (J)			نیروی میانگین لهیدگی (KN)		
		تئوری	آزمایشگاهی	عددی	تئوری	آزمایشگاهی	عددی
۳	۲	۱۴۶۴	۱۶۸۷	۱۵۹۵	۱۲/۳۶	۱۴/۲۵	۱۵/۱۱
۸	۴	۱۴۹۷	۱۶۸۹	۱۶۶۸	۱۴/۳۹	۱۶/۰۱	۱۶/۴۳
۱۳	۸	۱۵۴۱	۱۷۴۳	۱۶۲۲	۱۵/۳۲	۱۶/۶۳	۱۶/۹۱

جدول ۶- مقادیر قدرمطلق خطا بر حسب درصد، برای روش تئوری و عددی نسبت به روش آزمایشگاهی برای اعداد ارائه شده در جدول ۶

کد	تعداد	میزان جذب انرژی (J)		نیروی میانگین لهیدگی (KN)	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی
۳	۲	۱۳/۲	۵/۴	۱۳/۲	۶/۰
۸	۴	۱۱/۳	۱/۲	۱۰/۱	۲/۶
۱	۸	۱۱/۵	۶/۹	۷/۹	۱/۷

برای استفاده از مدل تورن [۲۵] در شبیه‌سازی عددی به‌منظور تعریف خواص بین کامپوزیت و فلز آلومینیوم، به دو مقدار چقرمگی مود I و II نیاز می‌باشد. مقادیر این دو پارامتر از مرجع [۲۶] اقتباس شده است. همچنین مقادیر چقرمگی مود I و II بین دو لایه کامپوزیتی توسط آزمون DCB و طبق استانداردهای ASTM D 5528 و D 7905 از مرجع [۲۶] و [۲۷] اقتباس شده‌اند. در جدول (۴) خواص بین لایه‌های کامپوزیت با آلومینیوم و لایه‌های کامپوزیت با یکدیگر آورده شده است.

جدول ۴- خواص بین لایه‌های آلومینیوم با کامپوزیت و لایه‌های کامپوزیتی با یکدیگر [۲۶] و [۲۷]

مقدار	نماد	مشخصه	پارامتر مکانیکی
۹	$NFLS$ (MPa)	تنش نرمال شکست	خواص شکست بین آلومینیوم و کربن/اپوکسی
۲۰	$SFLS$ (MPa)	تنش برشی شکست	خواص شکست بین لایه‌های کربن/اپوکسی
۲۵۴/۰۳	GIC (J/m ²)	چقرمگی مود I	خواص شکست بین لایه‌های کربن/اپوکسی
۱۱۸۲	GIC (J/m ²)	چقرمگی مود II	خواص شکست بین لایه‌های کربن/اپوکسی
۲۲	$NFLS$ (MPa)	تنش نرمال شکست	خواص شکست بین لایه‌های کربن/اپوکسی
۵۷	$SFLS$ (MPa)	تنش برشی شکست	خواص شکست بین لایه‌های کربن/اپوکسی

۵- تحلیل نتایج

در این بخش ابتدا مقادیر به دست برای نیروی میانگین و میزان جذب انرژی سازه‌های هیبریدی از مدل تئوری، با نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی و مدل‌سازی عددی با هم مقایسه شده است و پس از آن به تحلیل نتایج به‌دست‌آمده پرداخته شده است.

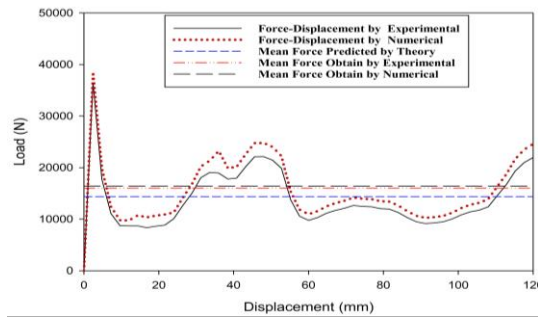
۵-۱- اعتبار سنجی روابط تئوری

در شکل (۹) مقایسه بین مدل تئوری پیش‌بینی شده و نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و مدل‌سازی عددی قابل مشاهده است. نتایج این حالت به عنوان نمونه ارائه شده است.

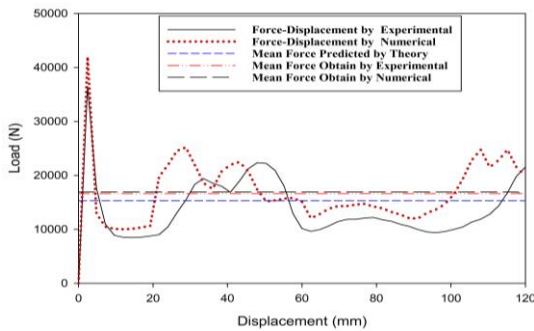
در جدول ۵ و شکل (۱۰)، مقایسه‌ای بین نمودار نیروی-جابجایی، نیروی میانگین و جذب انرژی به‌دست‌آمده از رابطه تئوری که در بخش ۲ ارائه گردید با آزمایش و مدل‌سازی آورده شده است که نشان‌دهنده تطابق خوب آن‌ها می‌باشد. مقادیر قدرمطلق خطا بر حسب درصد، برای روش تئوری و عددی نسبت به روش آزمایشگاهی برای اعداد ارائه شده در جدول ۶ ارائه شده است. این جدول نشان

۲-۵- تحلیل پارامتری سازه

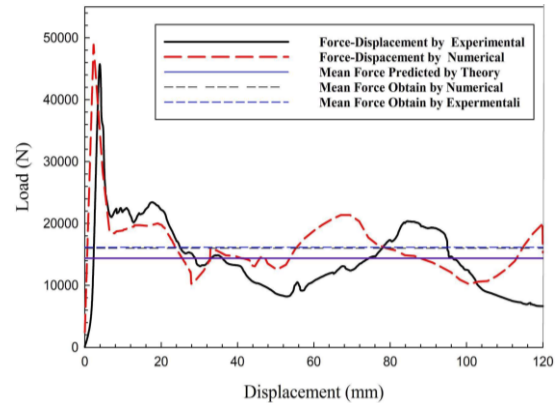
پس از حصول اطمینان از صحت شبیه‌سازی‌های موجود در نمونه‌های تقویت موضعی، تمام آلومینیوم/کامپوزیت و تمام آلومینیوم با استفاده از نرم‌افزار المان محدود LS-Dyna بررسی پارامتری مشخصه‌های جذب انرژی به کمک شبیه‌سازی عددی صورت گرفت. در جدول ۷ نمونه‌های شبیه‌سازی شده معرفی و میزان جذب انرژی مخصوص در آن‌ها محاسبه شده است.



(ب)

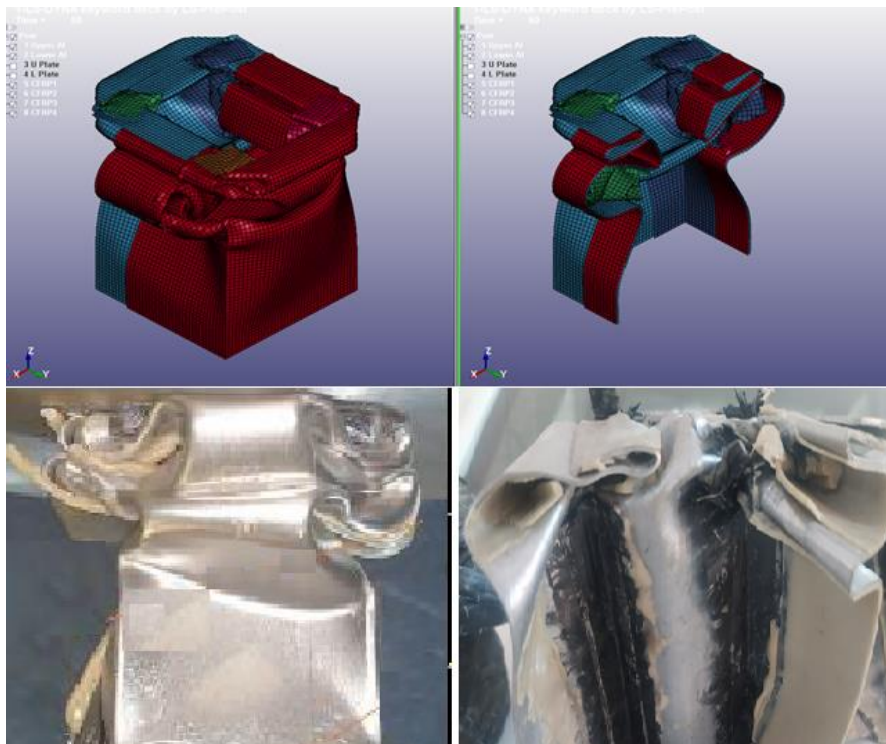


(ج)



(الف)

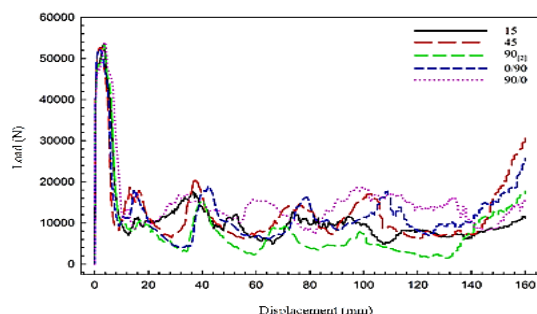
شکل ۱۰- مقایسه‌ای بین نمودار نیروی-جابجایی و نیروی به‌دست‌آمده از رابطه با آزمایش تجربی و مدل‌سازی در نمونه آلومینیوم - کامپوزیت (الف) با زاویه چینش الیاف ۹۰ درجه دولایه. (ب) زاویه چینش الیاف ۹۰ درجه چهارلایه. (ج) زاویه چینش الیاف ۹۰ درجه هشت لایه.



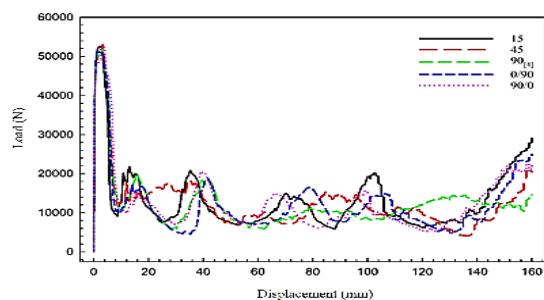
شکل ۱۱- مقایسه‌ای بین تغییر شکل‌های ظاهری به‌دست‌آمده از آزمایش تجربی و مدل‌سازی عددی در نمونه آلومینیوم - کامپوزیت با زاویه چینش الیاف ۹۰ درجه دولای

جدول ۷- مشخصه‌های جذب انرژی نمونه‌ها که به کمک شبیه‌سازی عددی تعیین شده‌اند

کد نمونه	زاویه چینش الیاف	تعداد لایه	جذب انرژی EA (J)	نیروی ماکزیمم لهیدگی $F_{max}(KN)$	نیروی میانگین لهیدگی $F_{mean}(KN)$	جذب انرژی ویژه SEA(J)	درصد نیروی میانگین به نیروی ماکزیمم CFE (%)
۱	-۱۵/۱۵	۲	۱۸۸۸/۶۱	۴۳/۳۱	۱۵/۵۹	۹/۵۴	۳۵/۹۹
۲	-۴۵/۴۵	۲	۱۶۶۴/۱۶	۳۷/۶۰	۱۳/۷۲	۸/۴۱	۳۶/۴۸
۳	۹۰/۹۰	۲	۱۵۹۵/۰۱	۳۶/۷۷	۱۴/۲۵	۸/۵۳	۳۸/۷۵
۴	۰/۹۰	۲	۱۷۸۰/۰۲	۲۸/۰۸	۱۴/۷۴	۸/۹۹	۵۲/۴۹
۵	۹۰/۰	۲	۱۷۱۸/۷۸	۲۶/۵۸	۱۴/۲۱	۸/۶۸	۵۲/۴۶
۶	-۱۵/۱۵	۴	۱۹۲۰/۰۶	۵۳/۰۷	۱۵/۸۱	۹/۷۰	۲۹/۷۹
۷	-۴۵/۴۵	۴	۲۰۴۴/۲۳	۴۰/۹۱	۱۶/۹۷	۱۰/۳۳	۴۱/۴۸
۸	۹۰/۹۰	۴	۱۶۶۸/۰۴	۳۶/۴۶	۱۳/۶۱	۸/۳۸	۳۷/۳۲
۹	۰/۹۰	۴	۱۷۵۶/۶۹	۴۸/۳۶	۱۴/۵۰	۸/۸۷	۲۹/۹۸
۱۰	۹۰/۰	۴	۲۴۷۳/۰۲	۴۵/۴۸	۲۰/۴۱	۱۲/۵۰	۴۴/۸۷
۱۱	-۱۵/۱۵	۸	۱۸۳۳/۸۰	۵۰/۱۸	۱۵/۱۰	۹/۲۶	۳۰/۰۹
۱۲	-۴۵/۴۵	۸	۳۱۱۳/۸۱	۴۱/۰۹	۱۷/۴۶	۱۰/۶۸	۴۲/۴۸
۱۳	۹۰/۹۰	۸	۱۶۲۲/۱۱	۳۶/۴۹	۱۳/۶۴	۸/۳۰	۳۷/۳۸
۱۴	۰/۹۰	۸	۲۲۳۲/۰۳	۴۵/۲۸	۱۸/۴۱	۱۱/۲۸	۴۰/۶۵
۱۵	۹۰/۰	۸	۱۹۹۶/۶۲	۵۱/۷۱	۱۶/۵۶	۱۰/۰۹	۳۲/۰۲
۱۶	تمام آلومینیوم	-	۹۶۶/۹۳	۲۵/۸۸	۷/۹۶	۵/۹۶	۳۰/۷۵
۱۷	پوسته کامل کامپوزیت بر روی آلومینیوم	۴	۲۰۱۰/۶۵	۳۴/۹۷	۱۶/۱۴	۸/۳۰	۴۶/۱۵



شکل ۱۲- نمودار نیرو-جاب‌جایی برای زاویه الیاف مختلف متعلق به نمونه‌های تقویت‌شده موضعی کامپوزیتی ۲ لایه



شکل ۱۳- نمودار نیرو-جاب‌جایی برای زاویه الیاف مختلف متعلق به نمونه‌های تقویت‌شده موضعی کامپوزیتی ۴ لایه

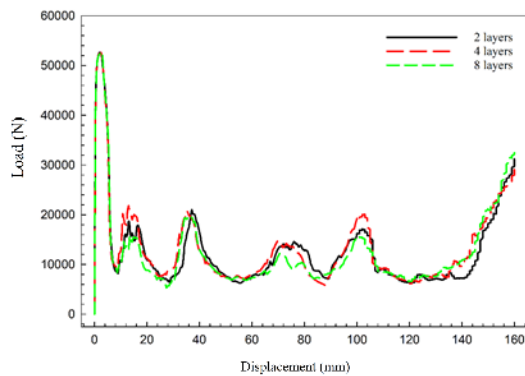
همان‌طور که از جدول ۷ قابل مشاهده است زاویه‌بندی الیاف و تعداد لایه‌های کامپوزیت تأثیر بسزایی در جذب انرژی در سازه هیبریدی دارند. حال آنکه به دلیل پدیده لایه‌لایه شدن لزوماً تعداد لایه بالاتر در مدل ۸ لایه موجب جذب انرژی خیلی بیشتری نگردیده است این مطلب در شکل (۱۱) نیز به چشم می‌خورد. شکل (۱۱) نتایج حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی را برای حالت ۸ لایه نشان می‌دهد. همچنین به دلیل الگوهای فروریزی منظم زاویه ۹۰/۰ بهترین جذب انرژی را از خود نشان می‌دهد. در ادامه نمودارهای مقایسه‌ای این نمونه‌ها بر اساس تقویت موضعی کامپوزیت در درون تعداد لایه کامپوزیت و زاویه چینش الیاف کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۵- مقایسه نمونه‌های تقویت کامپوزیتی در داخل قطعه از نظر زاویه برای تعداد لایه‌های مختلف

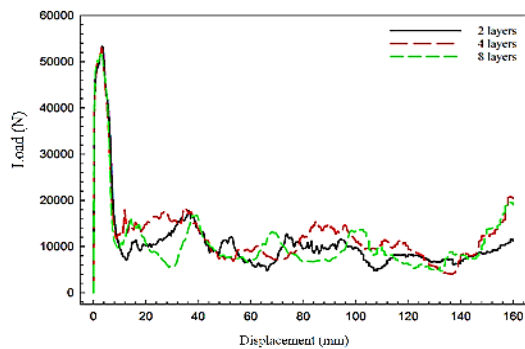
در شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) به بررسی و مقایسه نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌های تقویت‌شده موضعی با کامپوزیت از درون قطعه پرداخته‌اند.

۴-۵- مقایسه نمونه‌های تقویت کامپوزیتی در درون قطعه از نظر لایه در زوایای لایه‌چینی مختلف

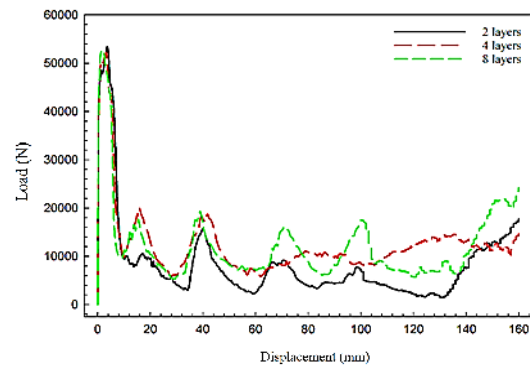
در شکل‌های (۱۷) تا (۲۰) به بررسی و مقایسه نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌های تقویت‌شده موضعی با کامپوزیت از درون قطعه پرداخته شده است. این نمودارها برای زوایای مختلف ارائه شده‌اند و نشان‌دهنده اثرات تعداد لایه‌های تقویت‌کننده بر نمودار مذکور هستند.



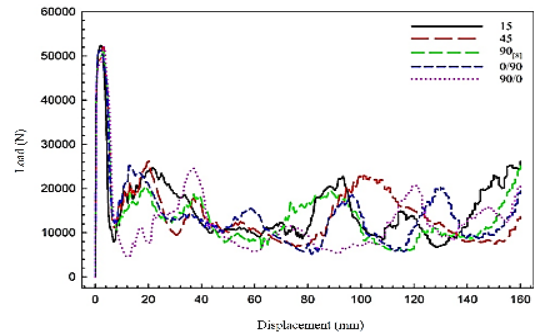
شکل ۱۷- نمودار نیرو-جاب‌جایی مقایسه تأثیر تعداد لایه کامپوزیت برای نمونه‌های تقویت‌شده موضعی کامپوزیتی در زاویه الیاف ۱۵-۱۵+ درجه



شکل ۱۸- نمودار نیرو-جاب‌جایی مقایسه تأثیر تعداد لایه کامپوزیت برای نمونه‌های تقویت‌شده موضعی کامپوزیتی در زاویه الیاف ۴۵-۴۵+ درجه

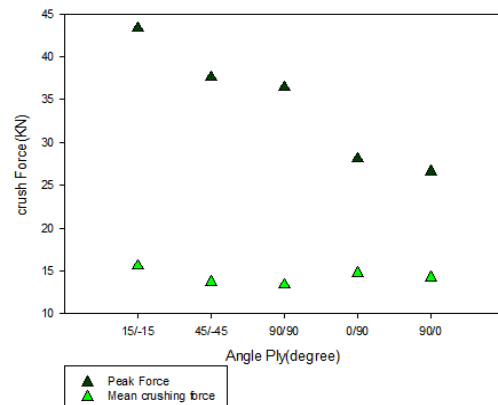


شکل ۱۹- نمودار نیرو-جاب‌جایی مقایسه تأثیر تعداد لایه کامپوزیت برای نمونه‌های تقویت‌شده موضعی کامپوزیتی در زاویه الیاف ۹۰ درجه

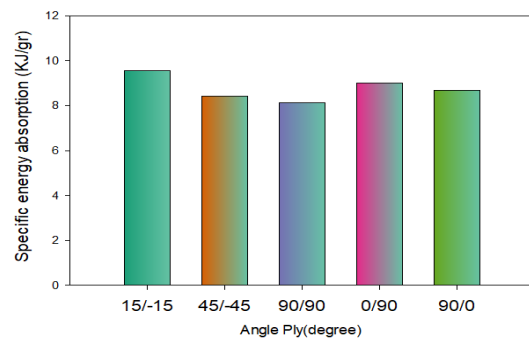


شکل ۱۴- نمودار نیرو-جاب‌جایی برای زاویه الیاف مختلف متعلق به نمونه‌های تقویت‌شده موضعی کامپوزیتی ۸ لایه

شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) نشان می‌دهند که انطباق خوبی میان نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف برای تعداد لایه‌های مختلف وجود دارد. لذا، می‌توان به صحت روش تئوری ارائه شده پی برد. در شکل (۱۵) مقایسه بین نیروی ماکزیمم لهیدگی و نیروی میانگین لهیدگی در سازه‌های تقویت‌شده دولایه آورده شده است. شکل (۱۶) نیز نمودار تأثیر زاویه الیاف بر میزان جذب انرژی ویژه نمونه‌های تقویت‌شده کامپوزیتی ۲ لایه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- نمودار تأثیر زاویه الیاف بر نیرو ماکزیمم و نیرو میانگین برای نمونه‌های تقویت‌شده موضعی کامپوزیتی ۲ لایه



شکل ۱۶- نمودار تأثیر زاویه الیاف بر میزان جذب انرژی ویژه نمونه‌های تقویت‌شده موضعی کامپوزیتی ۲ لایه

۶- نتیجه‌گیری

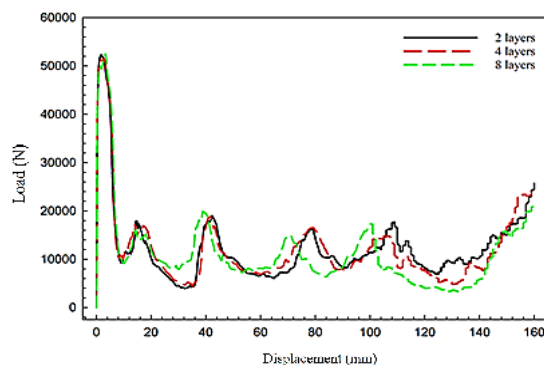
در پژوهش حاضر، اثرات زاویه لایه کامپوزیت، ضخامت و تعداد لایه‌ها بر روی رفتار جذب انرژی ساختار اتصال چسبی هیبریدی آلومینیوم تقویت‌شده با الیاف کربن تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی به صورت تحلیلی، تجربی و عددی بررسی شده است. در این مطالعه، چهار کامپوزیت ال - شکل با استفاده از چسب آرالدیت ۲۰۱۵ به صورت موضعی به چهارگوشه از داخل سازه آلومینیومی متصل شده‌اند. مدل المان محدود برای تحلیل این ساختارهای هیبریدی به کار گرفته شد. پنج حالت مختلف از زاویه چینش الیاف [۱۵ و -۱۵]، [۴۵ و -۴۵]، [۹۰ و ۹۰]، [۹۰ و ۰] و [۰ و ۰] برای کامپوزیت در نظر گرفته شده است. همین‌طور تعداد لایه‌های کامپوزیت از ۲ تا ۸ لایه متفاوت می‌باشند.

هدف این مقاله استفاده از مزایای اتصال چسبی برای تقویت موضعی جاذب انرژی آلومینیوم مربعی شکل توسط کامپوزیت و در نتیجه دستیابی به رفتار جذب انرژی مطلوب قبل از شکست در اتصال و بدون تغییر شکل ناهمگن سازه در عین حال کاهش وزن سازه در مقایسه با روش‌های سنتی مانند پوشاندن کامل کامپوزیت در اطراف آلومینیوم است. با انجام این تحقیق نتایج ذیل حاصل شدند.

۱- مدل تئوری پیشنهادی که برای پیش‌بینی نیروی متوسط لهیدگی و انرژی جذب‌شده ارائه شده است می‌تواند به درستی نیروی متوسط لهیدگی و انرژی مستهلک شده سازه را هنگامی که پارامترهای هندسی و خواص مکانیکی کامپوزیت و فلز آلومینیوم داده شده‌اند، پیش‌بینی کند. نتایج به دست آمده انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایش‌های تجربی و مدل‌سازی عددی نشان دادند به طوری حداکثر خطا برابر ۱۳/۲٪ بود.

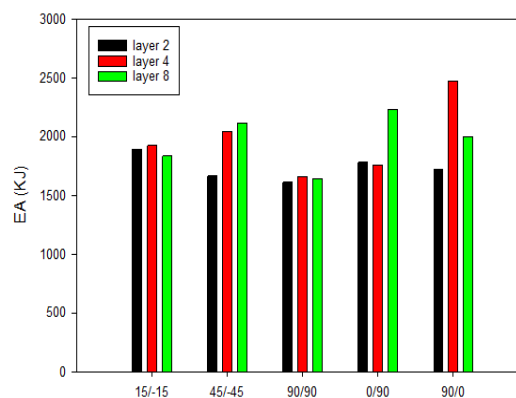
۲- برای ارائه یک تئوری قابل قبول و موفق باید دو عامل نیروهای غشایی (که در کامپوزیت و فلز ایجاد می‌شوند) و لولاهای پلاستیک به وجود آمده را سازه را هم‌زمان لحاظ کرد و مقدار انرژی جذب شده توسط این دو مکانیزم را محاسبه نمود.

۳- نتایج به دست آمده نشان دادند که در مقایسه با جاذب‌های انرژی آلومینیوم و آلومینیوم/کامپوزیت، به دلیل اتصال چسبیده بین آلومینیوم و کامپوزیت در نمونه تقویت‌شده موضعی آلومینیوم-کامپوزیت، کامپوزیت با پیروی از الگوی فروریزش آلومینیوم و ایجاد حالت‌های



شکل ۲۰- نمودار نیرو-جابجایی مقایسه تأثیر تعداد لایه کامپوزیت برای نمونه‌های تقویت‌شده موضعی کامپوزیتی در زاویه الیاف ۰/۹۰ درجه به صورت موضعی از درون قطعه

علاوه بر مواردی که ذکر شد، شکل (۲۱) نمودار تأثیر تعداد لایه‌های کامپوزیت بر میزان جذب انرژی ویژه نمونه‌های تقویت‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲۱- نمودار تأثیر تعداد لایه‌های کامپوزیت بر میزان جذب انرژی ویژه نمونه‌های تقویت‌شده

شکل‌های (۱۷) تا (۲۰) نشان می‌دهند که در همه حالت‌ها، مقادیر بیشینه نمودارهای نیرو-جابجایی تا حد زیادی به یکدیگر نزدیک هستند. همچنین این شکل‌ها حاکی از آن هستند که با افزایش زاویه الیاف و محور لوله، انطباق میان بخش‌های نوسانی نمودارها در شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) کاهش پیدا می‌کند اگرچه این مسئله بر روی مساحت زیر نمودارها که همان مقدار انرژی جذب شده است تأثیرگذار نیست. علاوه بر موارد ذکر شده، با دقت به شکل‌های (۱۷) تا (۲۰) می‌توان دریافت که بخش انتهایی همه نمودارها صعودی است که علت این امر نیز آن است که زمانی که فک بالای دستگاه به جابه‌جایی‌های مربوط به این بخش از این نمودارها می‌رسد، دیگر چین‌خوردگی جدیدی در نمونه ایجاد نمی‌شود و نمونه مانند یک جسم بالک فشرده می‌شود.

کامپوزیتی برای جذب انرژی تقویت شده موضعی آلومینیوم-کامپوزیت، ۴ لایه و زاویه بهینه برای تقویت داخلی آن [۹۰ و ۰] است.

شکست و فروریزش پیوسته، جذب انرژی را نسبت به حالت آلومینیوم تنها ۱۵۵/۷۵٪ و نسبت به حالت آلومینیوم-کامپوزیت ۲۲/۹۹٪ افزایش می‌دهد.

۴- در میان حالت‌های انتخابی، تعداد بهینه لایه‌های

مراجع

- [1] H. Golivari, H. Saeidi Googarchin, A. Zaeri, and A. Keshavarzi. "Experimental and numerical investigation of the energy absorption in hybrid double-hat thin-walled structures reinforced by adhesive bonding under three-point bending." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 128 (2024): 103543.
- [2] G. Qin, L. Zheng, P. Mi, Y. Zhu, M. Li, J. Na, and Y. Wu Wang. "Influence of single or multi-factor coupling of temperature, humidity and load on the aging failure of adhesively bonded CFRP/aluminum alloy composite joints for automobile applications." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 123 (2023): 103345.
- [3] Y. Wei, X. Jin, Q. Luo, Q. Li, and G. Sun. "Adhesively bonded joints—a review on design, manufacturing, experiments, modeling and challenges." *Composites Part B: Engineering* (2024): 111225.
- [4] L. Yu, X. Gu, L. Qian, P. Jiang, W. Wang, and M. Yu. "Application of tailor rolled blanks in optimum design of pure electric vehicle crashworthiness and lightweight." *Thin-Walled Structures* 161 (2021): 107410.
- [5] L. Duan, G. Sun, J. Cui, T. Chen, A. Cheng, and G. Li. "Crashworthiness design of vehicle structure with tailor rolled blank." *Structural and Multidisciplinary Optimization* 53 (2016): 321-338.
- [6] H. Golivari, H.S. Googarchin, A. Zaeri, and A. Keshavarzi. "Experimental and numerical investigation of the energy absorption in hybrid double-hat thin-walled structures reinforced by adhesive bonding under three-point bending." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 128 (2024): 103543.
- [7] M. Ebrahimkhani, G. Liaghat, and H. Ahmadi. "Simulation of crushing performance of Composite Energy Absorber under impact loading using Continuum Damage Mechanics approach." *Modares Mechanical Engineering* 17, no. 12 (2018): 505-513. (in Persian)
- [8] M. Damghani Nouri, H. Hatami, and A. Ghodsbin Jahromi. "Experimental Investigation of Expanded Metal Tube Absorber under Axial Impact Loading." *Modares Mechanical Engineering* 15, no. 1 (2015): 371-378. (in Persian)
- [9] S.A. Mousavizadeh, M. Hosseini, and H. Hatami. "Experimental studies on energy absorption of curved steel sheets under impact loading and the effect of pendentive on the deformation of samples." *Journal of Modeling in Engineering* 18, no. 63 (2020): 27-40
- [10] H. Sun, J. Wang, G. Shen, and P. Hu. "Energy absorption of aluminum alloy thin-walled tubes under axial impact." *Journal of Mechanical Science and Technology* 30, no. 7 (2016): 3105-3111.
- [11] H.S. Googarchin, M. Pasandidehpoor, A. Mahmoodi, and M.H. Shojaeefard. "Energy absorption analysis for tapered multi-cell tubes improved by foams: theoretical development and numerical simulation." *Composite Structures* 207 (2019): 213-222.
- [12] A. Alavi Nia, and H. Khodabakhsh. "Numerical investigation of the effect of spacing in overlapping thin-walled tubes on their mechanical behavior and energy absorption." *Journal of Modeling in Engineering* 14, no. 45 (2016): 33-47. (in Persian)
- [13] E. Zamani, and M. Izadpanah. "Numerical analysis of the collapse of polyurethane foam-filled composite tubes under compressive loading at different speeds." *Journal of Modeling in Engineering* 21, no. 74 (2023): 113-124. (in Persian)
- [14] G. Zhu, G. Sun, Q. Liu and Q. Li. "On crushing characteristics of different configurations of metal-composites hybrid tubes." *Composite Structures* 175, (2017): 58-69.
- [15] H. Hatami, and A.B. Fathollahi. "Theoretical and numerical study and comparison of the inertia effects on the collapse behavior of expanded metal tube absorber with single and double cell under impact loading." *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 50, no. 5 (2018): 999-1014.
- [16] M.R. Bambach, M. Elchalakani, and X.L. Zhao. "Composite steel-CFRP SHS tubes under axial impact." *Composite Structures* 87, no. 3 (2009): 282-292.

- [17] Sh. Yong, Z. Wu, and X. Hu. "Effect of reinforcement layer number on energy absorption of aluminum-CFRP hybrid square tubes under axial loading: Experimental and numerical study." *Thin-Walled Structures* 155, (2020), 106935.
- [18] E.H. Hanefi, and T. Wierzbicki. "Axial resistance and energy absorption of externally reinforced metal tubes." *Composites Part B: Engineering* 27, (1996): 387-394.
- [19] S.P. Santosa, T. Wierzbicki, A.G. Hanssen, and M. Langseth. "Experimental and numerical studies of foam-filled sections." *International Journal of Impact Engineering* 24, no. 5 (2000): 509-534.
- [20] W. Chen, and T. Wierzbicki. "Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin-walled structures in energy absorption." *Thin-Walled Structures* 39, no. 4 (2001): 287-306.
- [21] A.A. Singace, H. Elsobky, and T.Y. Reddy. "On the eccentricity factor in the progressive crushing of tubes." *Int. J. Solids Struct* 32, (1995): 3589-3602.
- [22] ASTM, E8-99. "Standard test methods for tension testing of metallic materials." Annual book of ASTM standards. ASTM (2001).
- [23] J. Bidadi, H.S. Saeidi Googarchin, A. Akhavan, R.J.C. Carbas, and L.F.M. Da Silva. "Characterization of Bending Strength in Similar and Dissimilar Carbon-Fiber-Reinforced Polymer/Aluminum Single-Lap Adhesive Joints." *Applied Sciences* 13, no. 23 (2023): 12879.
- [24] M. Tayyebati, H. Ahmadi, and G. Liaghat. "Experimental and numerical investigation of the collapse of hybrid metal-composite energy absorbers under quasi-static loading." *Iranian Journal of Manufacturing Engineering* 6, no. 8 (2020): 54-66.
- [25] A. Turon, C.G. Davila, P.P. Camanho and J. Costa. "An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models." *Engineering Fracture Mechanics* 74, (2007): 1665-1682.
- [26] M.R. Bambach. "Axial capacity and crushing behavior of metal-fiber square tubes - Steel, stainless steel and aluminum with CFRP." *Composites Part B-Engineering* 41, (2010): 550-559.
- [27] S. Ataollahi, S.T. Taher, R. Eshkoo, A. Ariffin, and C. Azhari. "Energy absorption and failure response of silk/epoxy composite square tubes: Experimental." *Composites Part B-Engineering* 43, (2012): 542-548.