



بررسی تجربی و عددی فروریزی جاذب انرژی هیبریدی فلز-کامپوزیت تحت بارگذاری شبه استاتیک

مهدی طیبباتی¹، حامد احمدی^{2*}، غلامحسین لیاقت³

1- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

3- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی 14115-111، h_ahmadi@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق، مطالعه‌ای پارامتریک بر روی تأثیر ضخامت و لایه‌چینی لایه‌های کامپوزیتی در فروریزی جاذب انرژی هیبریدی با مقطع دایره و جنس آلومینیوم پیچیده شده با الیاف شیشه/اپوکسی به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. نمونه‌ها با استفاده از روش تریقی رزین توسط پمپ خلاء ساخته شد و تحت بار شبه استاتیک قرار گرفتند. انرژی ویژه جذب شده به عنوان معیاری برای ارزیابی جاذب‌های انرژی استفاده گردیده و همچنین نوع و نحوه عملکرد مکانیزم‌های تخریب موجود در طول فروریزی مورد بررسی کامل قرار گرفته است. در بررسی عددی، جاذب انرژی مورد استفاده توسط چند لایه المان پوسته‌ی مقید شده در نرم‌افزار ال‌اس‌داینما مدل‌سازی و اثر آغازگر با کاهش پیوسته طول لایه‌های پوسته نسبت به یکدیگر در نظر گرفته شد. ترک‌های بین لایه‌های با اتصال قید جداشونده، طبق فرمول‌بندی نیرو-جدایش مدل گردید و برای از بین بردن اثرات اندازه مش از معیار طول ناحیه چسبندگی بهره برده شده است. اکثر خواص مکانیکی مورد نیاز برای مدل‌سازی نیز با استفاده از آزمایش‌های استاندارد اندازه‌گیری گردید. نتایج تطابق قابل قبولی بین داده‌های تجربی و مدل‌سازی عددی نشان می‌دهند. با افزایش ضخامت، نیروی ماکزیمم، نیروی میانگین و انرژی جذب شده (EA) افزایش یافته است. مود فروریزی لوله آلومینیومی در جاذب انرژی آلومینیومی در مقایسه با جاذب انرژی هیبریدی، از مود آکاردیونی به الماسی تغییر شکل پیدا کرد. همچنین فروریزی الیاف به صورت پیوسته و با تشکیل لایه‌های خم شونده به بیرون همراه بوده است.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 25 فروردین 1398
پذیرش: 13 خرداد 1398
ارائه در سایت: دی 1398

کلیدواژگان:

جاذب انرژی هیبریدی فلز-کامپوزیت
کامپوزیت شیشه/اپوکسی
بارگذاری شبه استاتیکی
جذب انرژی ویژه

Experimental and numerical investigation on crushing of metal-composite hybrid energy absorber under a quasi-static loading

Mahdi Tayyebati, Hamed Ahmadi*, Gholamhossein Liaghat

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, h_ahmadi@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 10 March 2019
Accepted 18 May 2019
Available December 2019

Keywords:

Metal-Composite hybrid energy absorber
Glass/epoxy composite
Quasi-static loading
Specific energy absorption

Abstract

In this paper, a parametric study on the effect of thickness and stacking sequence of composite layers in a hybrid energy absorber with an aluminum tube wrapped with glass/epoxy composite layers has been experimentally and numerically investigated. The samples were fabricated by vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) and tested under a quasi-static crushing load. Specific absorbed energy was used as a criterion for evaluating. In addition, the type and mode of failure mechanisms during the crushing have been thoroughly investigated. The energy absorbers used by the multi-layered shell element is modeled in Ls-Dyna software and the effect of the trigger is considered with continuous reduction of the length of the shell layers relative to each other. The interlayer cracks are modeled according to the force-separation formulation and are used to eliminate the mesh size effects from the adhesion length criterion. Most of the mechanical properties required for modeling were also measured using standard tests. The results show an acceptable correlation between experimental data and numerical modeling. As the thickness increased, the maximum force, mean force, and absorbed energy (EA) increased. Aluminum Crash mode in aluminum tube compared to hybrid tube, it has been transformed from accordion to diamond. In addition, fiber collapse has been associated with the formation of outward bending layers.

1- مقدمه

هواپیما، خودروسازی (شامل بدنه و سپرها) دریایی (شامل قایق‌ها و تجهیزات فراساحلی) و تجهیزات ورزشی (شامل دوچرخه، راکت تنیس، تخته اسکی و ...) افزایش چشمگیری

امروزه، استفاده از مواد کامپوزیتی در حوزه‌های گوناگون صنعتی از جمله صنایع هوافضا (شامل بال، بدنه و پروانه موتور

خواهد شد [5, 9].

ضخامت کامپوزیت تأثیرات مختلفی بر روی میزان جذب انرژی دارد. گاهی افزایش ضخامت کامپوزیت موجب لایه لایه شدن⁴ و کاهش جذب انرژی می شود [10]. از طرفی در برخی از مقالات با افزایش ضخامت کامپوزیت، جذب انرژی افزایش پیدا کرده است [11, 12]. علاوه بر آن کامپوزیت ها خواص ویژه ای در بارگذاری ضربه ای داشته اند [12]. تأثیرات نسبت ضخامت کامپوزیت به قطر بیرونی بر روی انرژی جذب شده برای جاذب انرژی کامپوزیتی کربن/اپیک بررسی شده است [13, 14]. فارلی [15] معادله ای غیرخطی بر حسب این نسبت برای جذب انرژی جاذب انرژی کامپوزیتی بدست آورده است. کاهش این نسبت موجب افزایش میزان جذب انرژی می شود. جهت گیری الیاف نیز تأثیر به سزایی در میزان جذب انرژی در لوله کامپوزیتی دارد [14]. با فرض اینکه محور لوله راستای صفر را نشان بدهد، با افزایش زاویه الیاف، انرژی ویژه جذب شده توسط جاذب انرژی کامپوزیتی افزایش می یابد. برای جهت گیری³ $[\pm 15]$ ، پدیده جدایش و لایه لایه شدن کامپوزیت و در نتیجه کاهش انرژی جذب شده مشاهده شده است. این پدیده لزوم وجود الیاف در جهت دیگر برای افزایش جذب انرژی نشان می دهد.

با توجه به قابلیت کاربردی بودن جاذب های انرژی در وسایل نقلیه، ماکزیمم نیرو در حین فروریزی یکی از پارامترهای مهم محسوب می شود. تأثیرات نیروی ماکزیمم در طول تصادف بر روی مهره های کمر و ستون فقرات سرنشین ها بررسی شده است [16]. در یک جاذب انرژی ایده آل نسبت نیروی میانگین بر نیروی ماکزیمم برابر یک است. برای رسیدن به این هدف، استفاده از مکانیزم های آغازگر برای شروع فروریزی پیوسته، کنترل مود فروریزی، جلوگیری از شکست ناگهانی جاذب انرژی و در نتیجه کاهش سرعت قابل قبول برای اتومبیل توصیه شده است. از این رو مکانیزم های آغازگر مختلفی مانند پخ⁵ با زوایای مختلف [17]، الگوهای برج کلیسا⁶ و لاله⁷ [18]، الگوی فنجان⁸ و روش های ابتکاری [19, 20] برای لوله های کامپوزیتی با سطح مقطع مربعی [21] و دایروی [22] مورد بررسی قرار گرفته اند. برای مکانیزم های آغازگر

داشته است. استفاده از کامپوزیت با الیاف بلند به علت عملکرد مطلوب در حال افزایش است و دلیل آن را می توان کاهش محسوس وزن نسبت به مواد مورد استفاده در گذشته دانست. در سال های گذشته به استفاده از الیاف به عنوان تقویت کننده برای فلزات در صنایع هوایی و خودروسازی نیز توجه شده است. استفاده از چندلایه های الیافی-فلزی¹ در بال و بدنه هواپیما و همچنین تقویت پارامترهای فروریزی² در کراش باکس ها³ از جمله موارد فوق می باشد. استفاده از مواد هیبریدی به کاهش وزن، کاهش سروصدا و لرزش، افزایش راندمان مصرف سوخت و کاهش آلایندگی های سوختی منجر خواهد شد [1]. همچنین می توان برای جذب انرژی ضربه حاصل از موج انفجار [2] و ضربه سرعت بالا [1] و نیز برای مقاوم سازی و افزایش استحکام سازه های فلزی در جهت به کار گیری در صنایع و یا محیط دریا [4, 5] از آنان استفاده کرد. کامپوزیت ها به دلایل مختلف، تقویت کننده یا جایگزین مناسبی برای قطعات فلزی محسوب می شوند که برجسته ترین آن ها، نسبت استحکام و سفتی به وزن بالای آن ها است. علاوه بر خواص مکانیکی قابل توجه، انعطاف زیاد در طراحی از دیگر مزیت های کامپوزیت ها است که با استفاده از این مواد، هر سازه ای را می توان متناسب با کاربرد آن با دقت بالا طراحی، چینش و بهینه سازی کرد. با وجود همه این مزیت ها، هنوز موانعی در استفاده از اینگونه مواد در کاربردهای عملی بخصوص در حوزه فروریزی وجود دارد [6, 7]. از همین رو تحقیقات فراوانی در راستای مدل سازی عددی فروریزش، آسیب و جذب انرژی در سازه های هیبریدی انجام شده است.

از مکانیزم های جذب انرژی در الیاف تقویت شده با ماتریس پلیمری می توان به شکست الیاف و ماتریس، جدایش بین لایه ای، کمانش الیاف در مقیاس میکرو، خرد شدن الیاف و اصطکاک اشاره کرد. در بار فشاری، کمانش الیاف در مقیاس میکرو به دلیل ترد بودن ماتریس پلیمری و سفتی پایین آن و یا اتصال ضعیف بین ماتریس و الیاف، رخ خواهد داد [8]. تخریب کامپوزیت ها با تخریب مکانیزم آغازگر صورت گرفته و با تشکیل ترک های بین لایه ای و درون لایه ای همراه است. بنابراین اگر تخریب لوله کامپوزیتی با تغییر شکل پلاستیک لوله فلزی همراه شود، یک جاذب انرژی سبک وزن همراه با مود فروریزی پیوسته و مکانیزم های جذب انرژی فعال ساخته

⁴ Delamination

⁵ Chamfering

⁶ Steeple

⁷ Tulip

⁸ Crush cups

¹ Fiber Metal Laminates (FML)

² Crashworthiness

³ Crash box

نتیجه گرفتند که توانایی این مدل ماده در پیش‌بینی تخریب در کامپوزیت‌ها تا حدودی قابل اعتماد است ولی نیازمند ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

در جاذب‌های انرژی هیبریدی ضخامت هر یک از اجزا به صورت مطلق و نسبی بر میزان جذب انرژی و همچنین مود فروریزی جاذب انرژی تأثیر داد. به طور مثال، با افزایش ضخامت کامپوزیت امکان لایه‌لایه شدن محتمل‌تر خواهد بود و در نتیجه کاهش جذب انرژی به دلیل کاهش استحکام مجموع لایه‌های کامپوزیت و یا افزایش جذب انرژی به دلیل تأثیر بیشتر مکانیزم لایه‌لایه شدگی را به همراه خواهد داشت. همچنین ضخامت بالای کامپوزیت، موجب کم‌اندام کلی سازه به جای کم‌اندام محلی می‌شود و جذب انرژی سازه به طور محسوسی کاهش می‌یابد. در عین حال به طور مشخص مطالعاتی روی تأثیر ضخامت بر میزان جذب انرژی و همچنین تغییر لایه‌چینی و زوایای الیاف وجود ندارد. از این‌رو در این مقاله به بررسی جهت‌گیری الیاف، لایه چینی و همچنین ضخامت کامپوزیت بر میزان جذب انرژی به صورت تجربی و عددی پرداخته شده است.

2- پژوهش‌های تجربی

2-1- روش ساخت قطعات

جاذب انرژی هیبریدی از لوله آلومینیومی به طول 200 میلی‌متر و قطر داخلی 40 میلی‌متر و ضخامت 1 میلی‌متر، پیچیده شده با الیاف تک جهته شیشه نوع E با چگالی سطحی $200 \frac{gr}{m^2}$ و به روش تزریق رزین با استفاده از پمپ خلاء⁶ (رزین ML506 و سخت‌کننده HA11 با نسبت ترکیب 100 به 13) ساخته شد. لایه‌چینی مطابق جدول 1 صورت گرفته است. برای جلوگیری از چسبندگی الیاف به لایه‌های بالایی، یک لایه پارچه داکرون بر روی الیاف پیچیده و به ترتیب لایه‌های توری تنفسی و کیسه خلاء روی آن قرار داده شد. فرایند آب‌بندی نیز با استفاده از چسب مخصوص انجام گردید. بعد از انجام فرایند تزریق رزین، قطعه به مدت 48 ساعت در فشار پمپ (یک بار) رها شد. سپس به مدت 7 روز قطعه در دمای محیط جهت پخت ثانویه (پخت محیطی) قرار گرفته است. در نهایت آغازگر به صورت پخ 45 درجه با استفاده از سوهان بر روی لبه بالایی آن ایجاد گردید. شکل 1 فرایند ساخت و قطعه نهایی را نشان می‌دهد.

لوله‌های فلزی می‌توان از پخ، ایجاد یک ناپیوستگی¹ [23، 24]، الگوهای سینوسی² [25، 26] و استفاده از سرپوش [27] برای جلوگیری از فروریزی ناگهانی مورد بررسی قرار گرفته اند.

به دلیل غیرعملی بودن بررسی تمام پارامترها به صورت تجربی، شبیه‌سازی عددی نقش مهمی در تعیین میزان تأثیر هر پارامتر و طراحی آزمایش دارد. استراتژی‌هایی که برای شبیه‌سازی تخریب و جذب انرژی در کامپوزیت‌ها به ویژه برای مدل‌سازی فروریزی در این مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد به طور کلی به دو دسته میکرومکانیک و ماکرومکانیک تقسیم بندی می‌شوند. شبیه‌سازی با دیدگاه میکرومکانیک نیازمند مدل‌سازی جداگانه الیاف و ماتریس با استفاده از المان حجمی است که حجم محاسباتی بالایی را در پی خواهد داشت [28] و برای مدل‌سازی در حوزه فروریزی و مطالعه بر روی سازه در مقیاس واقعی عملاً امکان‌پذیر نیست [29]. مدل‌سازی فروریزی با دیدگاه ماکرومکانیک که از نظر محاسباتی بسیار با صرفه است به دو دسته تقسیم می‌شود. در دسته اول کل لوله با یک تک لایه المان پوسته مدل‌سازی شده و تحت بار قرار می‌گیرد. المان‌های ناحیه فروریزی بعد از جذب کامل انرژی حذف شده و المان‌های ردیف بعدی تحت بار قرار می‌گیرند. در دسته دوم که با در نظر گرفتن چند لایه المان پوسته به عنوان لایه‌های کامپوزیت انجام می‌شود، هرچند حجم محاسباتی نسبت به دسته اول بیشتر است اما مود فروریزی با تشکیل لایه‌های خم‌شونده به واقعیت نزدیک‌تر است. در این روش تخریب داخل لایه‌ای با استفاده از معادلات ساختاری موجود برای کامپوزیت‌ها و لایه‌لایه شدگی با استفاده از قیدها، تماس‌ها و یا المان‌های چسبنده انجام می‌شود.

پالانیول و همکاران به بررسی تأثیرات لایه لایه شدن، رشد ترک محوری و عیوب ناشی از ساخت در کامپوزیت‌ها با استفاده از المان پوسته³ پرداخته‌اند [30]. استفاده از مدل ماده آسیب پیشرفته کامپوزیت⁴ در نرم‌افزار ال‌اس‌داینا⁵ به عنوان مدل ماده شماره 54/55 برای مدل‌سازی کامپوزیت‌ها به صورت پوسته بسیار مرسوم است [31، 32]. فرابولی و همکاران [33] به تفصیل پارامترهای تأثیرگذار در فروریزی جاذب انرژی در مدل ماده 54/55 را بررسی کرده و نتایج خود را وابسته به پارامترهایی که با سعی و خطا جای‌گذاری شده‌اند دانسته و

¹ Hole discontinuities

² Sinusoidal relief patterns

³ Shell

⁴ Enhanced-Composite-Damage

⁵ Ls-Dyna

⁶ Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM)

شد. لوله‌ها بر روی صفحه پایینی دستگاه قرار داده شده و صفحه بارگذاری بر آن مماس شد.

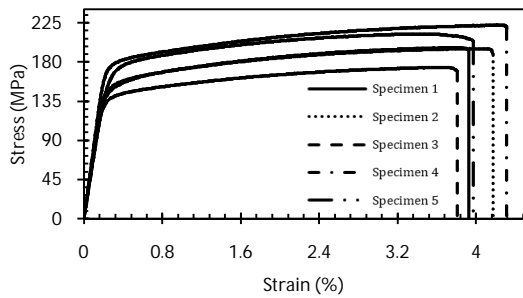


Fig. 3 Stress-strain diagram for 5 aluminum samples

شکل 3 نمودار تنش-کرنش برای 5 نمونه آلومینیومی

جدول 2 پارامترهای حاصل از آزمایش کشش نمونه آلومینیومی

Table 2 Parameters derived from Aluminum Tensile Test

شماره نمونه	مدول الاستیسیته (GPa)	استحکام نهایی (MPa)	کرنش شکست (%)
1	69/99	193	3/9
2	72/13	187	4/1
3	69/69	168	3/8
4	84/15	216	4/3
5	71/96	203	3/9

جدول 3 خواص مکانیکی و استحکام نهایی تک لایه کامپوزیتی [11]

Table 3 Mechanical properties and final strength of a Lamina composite [11]

Value	Symbol	مشخصه
2000	ρ	چگالی $\frac{kg}{m^3}$
42/68	E_1	مدول الاستیسیته (GPa)
11/24	$E_2 = E_3$	مدول برشی (GPa)
4/86	G_{12}	ضریب پواسون
0/25	ν_{12}	استحکام کششی (MPa)
703	X_T	استحکام فشاری (MPa)
24/5	Y_T	استحکام برشی (MPa)
500	X_c	
90	Y_c	
40/47	S	

جدول 4 خواص بین لایه‌های آلومینیوم با کامپوزیت و لایه‌های کامپوزیتی با یکدیگر [34, 11]

Table 4 Interlaminar Properties [11, 34]

Value	Symbol	مشخصه
9	$NFLS$ (MPa)	خواص شکست بین لایه‌های تنش نرمال شکست
20	$SFLS$ (MPa)	خواص شکست شیشه/پوکسی تنش برشی شکست
22	$NFLS$ (MPa)	خواص شکست بین لایه‌های تنش نرمال شکست
57	$SFLS$ (MPa)	خواص شکست شیشه/پوکسی تنش برشی شکست

جدول 1 مشخصات نمونه‌های هیبریدی

Table 1 Specifications of hybrid specimens

نمونه	ضخامت کامپوزیت (mm)	تعداد لایه‌ها	زاویه الیاف	وزن (g)
1	1/2	6	$[0/90]_3$	100
2	1/5	8	$[0_4/90_4]$	160
3	1/5	8	$[0_2/\pm 45_4/90_2]$	160
4	2/5	16	$[0_8/90_8]$	235
5	2/5	16	$[0_2/90_2]_4$	235
6	2/5	16	$[0_4/\pm 45_8/90_4]$	235
7	3/5	24	$[0_{12}/90_{12}]$	325



Fig. 1 Manufacturing process and final parts of hybrid samples

شکل 1 فرایند ساخت و قطعات نهایی نمونه‌های هیبریدی

2-2- خواص مکانیکی

برای انجام مدل‌سازی عددی، به مجموعه‌ای از خواص مکانیکی آلومینیوم و کامپوزیت مورد استفاده، نیاز بود. خواص مکانیکی کششی برای آلومینیوم با استفاده از استاندارد ASTM E8 برای لوله، استفاده و استخراج شد (شکل‌های 2 و 3). بدین صورت که پس از وایرکات لوله آلومینیومی طبق استاندارد، آزمایش کشش روی نمونه‌ها صورت گرفته و خواص مکانیکی معادل آن استخراج شد. خواص مکانیکی آلومینیوم و کامپوزیت و خواص بین‌لایه‌ای به ترتیب در جدول‌های 2 تا 4 گزارش شده است. بعضی از این خواص از مراجع [11, 33] استخراج شده است.



Fig. 2 Tensile test specimens for aluminum according to ASTM E8 standard

شکل 2 نمونه آزمایش کشش برای آلومینیوم طبق استاندارد ASTM E8

2-3- آزمایش‌های شبه استاتیکی

آزمایش‌های شبه‌استاتیکی در دستگاه آزمایش یونیورسال¹ کشش و فشار (شکل 4) با ظرفیت نیروسنج 300KN انجام

¹ Universal

همچنین برای مدل‌سازی رشد ترک‌های محوری داخل لایه‌ای و همچنین حذف المان‌ها بعد از جذب انرژی کامل از Add_Erosion برای کامپوزیت استفاده گردید و در آن کرنش حجمی حذف المان برابر 0/9 قرار داده شد [11]. شکل 5 نمونه مش زده شده را نشان می‌دهد.

2-3- مدل ساختاری Mat_24 برای آلومینیوم (Piecewise Linear Plasticity)

مدل ماده 24 در نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا، یک مدل ماده الاستوپلاستیک با قابلیت تعریف دلخواه قسمت پلاستیک نمودار تنش کرنش است. در این مدل ماده، قابلیت تعریف نرخ وابستگی به سرعت نیز وجود دارد. معیار حذف المان در این مدل ماده، کرنش پلاستیک و یا مینیمم گام زمانی است. اگر المان‌ها به کرنش شکست² برسند و یا گام زمانی حلگر از میزان مشخصی که در مدل ماده تعریف شده، کوچکتر شود؛ نرم افزار آن المان‌ها را از محاسبات حذف خواهد کرد. برای مدل‌سازی لوله آلومینیومی از معیارهای حذف المان و Erosion استفاده نشده است.

ورودی‌های این مدل برای ناحیه الاستیک، مدول الاستیسیته و برای در نظر گرفتن پلاستیسیته می‌توان از سه روش زیر استفاده کرد:

- مدول مماسی در ناحیه پلاستیک
 - معرفی 8 نقطه بر روی ناحیه پلاستیک نمودار تنش-کرنش
 - معرفی کامل قسمت پلاستیک نمودار تنش-کرنش
- در این پژوهش با صفر در نظر گرفتن کرنش شروع ناحیه پلاستیک، قسمت پلاستیک نمودار تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم به نرم افزار معرفی شده است.
- در جدول 5، خواص مکانیکی ورودی نرم افزار برای آلومینیوم گزارش شده است. این خواص مطابق با نتایج نمونه آزمایش شماره 1 آورده شده است.

جدول 5 خواص مکانیکی وارد شده در Ls-Dyna برای آلومینیوم
Table 5 Mechanical properties incorporated in Ls-Dyna for aluminum

Value	Symbol	مشخصه
2700	ρ	چگالی $\frac{kg}{m^3}$
69/99	E	مدول الاستیسیته (GPa)
0/3	ν_{12}	ضریب پواسون
135	σ_y	تنش تسلیم (MPa)

² Failure strain

پس از آن بارگذاری با نرخ 5 میلی‌متر بر دقیقه صورت پذیرفت که با تقسیم این سرعت بر طول آزاد لوله، نرخ کرنش تقریبی $4/2 \times 10^{-4} s^{-1}$ بدست می‌آید که کاملاً در محدوده شبه استاتیکی است. بارگذاری تا طول 100 میلی‌متر ادامه یافت و خروجی نیرو-جابجایی توسط کامپیوتر ثبت و از آن برای استخراج دیگر پارامترهای فروریزی استفاده گردید.

3- مدل‌سازی عددی

1-3- استراتژی مدل‌سازی

مدل سازی لوله فلزی از المان پوسته نوع 16 ELFORM با اندازه تقریبی 1×1 میلی‌متر و 5 NIP (پنج نقطه انتگرال‌گیری در راستای ضخامت) با ضخامت 1، قطر 40 و ارتفاع 200 میلی‌متر صورت گرفت. برای لوله کامپوزیتی هر دو لایه کامپوزیت، 1 لایه المان پوسته نوع 16 ELFORM مدل شده است. برای هر المان، با استفاده از گزینه ICOMP، دو نقطه انتگرال‌گیری در راستای ضخامت در نظر گرفته شد که هر نقطه بیانگر یک لایه از پارچه الیاف کامپوزیت است. تماس بین لوله فلزی با لایه‌های کامپوزیتی و لایه‌های کامپوزیتی با یکدیگر به صورت قید جداشونده¹ در نظر گرفته شد. برای در نظر گرفتن آغازگر طول لایه‌های پوسته به ترتیب تقریباً به اندازه طول یک المان کاهش داده شده است.

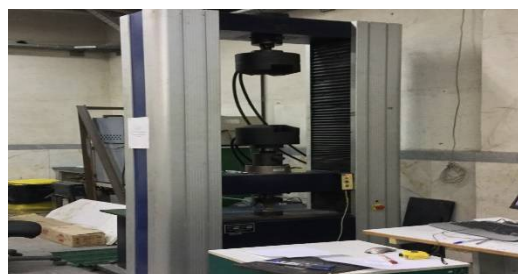


Fig. 4 Universal apparatus for quasi-static testing

شکل 4 دستگاه یونیورسال برای آزمایش شبه استاتیکی

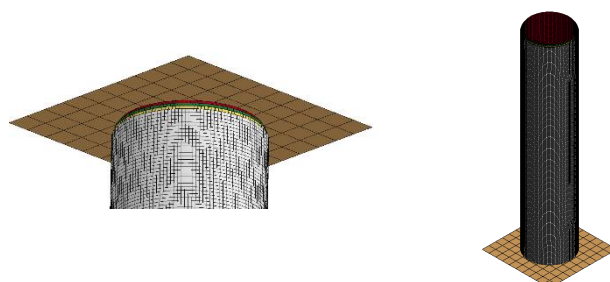


Fig 5 Numerical model of hybrid tube, loading plate, 45° chamfer

شکل 5 مدل عددی لوله هیبریدی، صفحه بارگذاری و پخ 45 درجه

¹ Tiebreak contact

در میان 21 پارامتر مورد نیاز برای تعریف مدل ساختاری Mat 54/55، 12 پارامتر خواص الاستیک و استحکامها بر اساس آزمایش‌های استاندارد بدست آمد و دیگر پارامترها برابر مقدار اولیه خود نرم‌افزار قرار داده شد. در جدول 6 پارامترهای مذکور معرفی شده است.

جدول 6 پارامترهای مورد نیاز برای مدل ماده 54/55 در Ls-Dyna [35]

Table 6 Requirements for Mat_55/54 in Ls-Dyna [35]

پارامتر	تعریف	مقدار پیشنهادی
RO	جرم بر واحد حجم	خواص ماده
EA	مدول یانگ در جهت الیاف	خواص ماده
EB	مدول یانگ در جهت ماتریس	خواص ماده
PRBA	ضریب پواسون	خواص ماده
GAB	مدول برشی	خواص ماده
DFAILT	کرنش شکست کششی در جهت الیاف	خواص ماده
DFAILC	کرنش شکست فشاری در جهت الیاف	خواص ماده
DFAILM	کرنش شکست کششی و فشاری در جهت ماتریس	برابر یا بزرگ‌تر بیشینه مقدار YC/EB یا YT/EB
DFAILS	کرنش شکست برشی	خواص ماده
EFS	کرنش شکست مؤثر	EFS = 0
TFAIL	حذف المان بر اساس گام زمانی	عددی بسیار کوچک، غیر صفر
ALPH	پارامتر غیرخطی تنش برشی	$1E - 3 \leq ALPH \leq 1$
SOFT	پارامتر کاهش مقاومت المان‌های تحت فروریزی	با آزمایش و خطا کالیبره شود.
FBRT	پارامتر کاهش استحکام کششی الیاف پس از شکست ماتریس	$0 \leq FBRT \leq 1$
YCFAC	پارامتر کاهش استحکام فشاری الیاف پس از شکست ماتریس	$0 \leq YCFAC \leq (XC/YC)$
BETA	ضریب وزنی برای تنش برشی در محاسبه تنش در راستای کششی الیاف	
XC	استحکام شکست فشاری در راستای الیاف	خواص ماده
XT	استحکام شکست کششی در راستای الیاف	خواص ماده
YC	استحکام شکست فشاری در راستای ماتریس	خواص ماده
YT	استحکام شکست فشاری در راستای ماتریس	خواص ماده
SC	استحکام برشی	خواص ماده

3-4- اتصال بین لایه‌ای جداشونده³

برای مدل‌سازی اتصال بین لایه‌ای و همچنین لایه لایه شدگی از اتصال جداشونده⁴ با آپشن 8 استفاده شده است. جدایش لایه‌ای در این نوع اتصال طبق رابطه (6) آغاز می‌شود [35].

3-3- مدل ساختاری Mat_54/55 برای کامپوزیت (Enhanced-Composite-Damage)

مدل ساختاری 54 نرم‌افزار ال‌اس‌دینا، اصلاح شده معیارهاشین است که در آن سطح تسلیم به صورت یک تابع درجه دوم کامل¹ برحسب ضرایب نامتغیر² تانسور تنش برای مواد ایزوتروپ عرضی (کامپوزیت‌های تک جهته) در نظر گرفته می‌شود و ضرایب آن برای چهار حالت شکست فشاری و کششی در جهات الیاف و ماتریس، با ساده سازی‌های مربوطه بدست آمده است.

1. معیار شکست کششی در راستای الیاف [35]:

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

در رابطه (1)، σ_{aa} ، σ_{ab} ، X_T و S_C به ترتیب، تنش در راستای 1، تنش در راستای 2-1، استحکام کششی محوری و استحکام برشی می‌باشد. با قرار دادن مقدار β برابر 1، رابطه‌هاشین بدست می‌آید. بعد از ایجاد شکست در هر یک از نقاط انتگرال‌گیری المان در راستای ضخامت، خواص الاستیک شامل G_{ab} ، E_b ، E_a و ν_{ba} و ν_{ab} برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند.

2. شکست فشاری در راستای الیاف [35]:

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

در رابطه (2)، X_C استحکام فشاری محوری بوده و بعد از شکست مقادیر E_a ، ν_{ba} و ν_{ab} برابر صفر می‌شوند.

3. شکست کششی در راستای ماتریس [35]:

$$\left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_C}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

در رابطه (3)، σ_{bb} و Y_T به ترتیب تنش در راستای عرضی و استحکام کششی عرضی بوده و ضرایب E_b ، ν_{ba} و G_{ab} بعد از شکست برابر صفر قرار داده می‌شوند.

شکست فشاری در راستای ماتریس [35]:

$$\left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_C}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_C}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{bb}}{Y_C} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_C}\right)^2 = 1 \quad (4)$$

در رابطه (4)، Y_C استحکام فشاری در راستای عرضی بوده و ν_{ba} و ν_{ab} ، G_{ab} ، E_b بعد از شروع شکست برابر صفر می‌شوند.

در صورت استفاده از مدل ساختاری 55 معیار شکست در حالت فشاری در راستای رزین مطابق رابطه Tsi-Wu، که همانند حالت قبل یک معیار درجه دوم است، می‌شود [35].

$$\frac{\sigma_{bb}^2}{Y_C Y_T} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_C}\right)^2 + \frac{(Y_C - Y_T) \sigma_{bb}}{Y_C Y_T} = 1 \quad (5)$$

³ Tie-Break

⁴ Contact automatic surface to surface - Tiebreak

¹ Quadratic

² Invariants

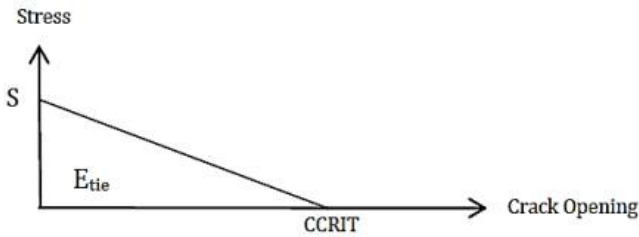


Fig. 6 Load-separation principle diagram for tiebreak contact

شکل 6 نمودار قانون نیرو- جدایش برای اتصال جداشونده

4- نتایج و بحث

برای بررسی رفتار جاذب انرژی آلومینیومی و هیبریدی، چهار پارامتر شامل نیروی ماکزیمم اولیه، نیروی میانگین، جذب انرژی ویژه (SEA³) رابطه (10) و بازده نیروی فروریزی⁴ رابطه (11) بدست آورده شده و با نتایج حاصل از مدل عددی مقایسه شده‌اند. در این روابط، M_c ، L_c و P_{mean} و P_{max} به ترتیب نمایانگر جرم تیوب در قسمت فروریخته، جرم تیوب در قسمت فروریخته، نیروی میانگین فروریزی و نیروی ماکزیمم فروریزی است.

$$SEA = \frac{W}{M_c} = \frac{\int_0^{L_c} F dx}{\rho A L_c} = \frac{P_{mean}}{\rho A} \quad (10)$$

$$CLE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} \quad (11)$$

در شکل 7 لوله فروریخته هیبریدی و آلومینیومی بعد از آزمایش شبه استاتیکی نشان داده شده است. مود فروریزی لوله آلومینیومی در جاذب انرژی فلزی به صوت متقارن محوری (آکاردئونی) بوده که با اضافه شدن کامپوزیت به آن در جاذب انرژی هیبریدی به نامتقارن محوری (الماسی) تغییر یافته است. استفاده از کامپوزیت شیشه/اپوکسی علاوه بر تغییر مود فروریزی لوله آلومینیومی، موجب افزایش نیروی ماکزیمم اولیه، نیروی میانگین، جذب انرژی ویژه و بازده نیروی فروریزی شده است.



Fig. 7 Comparison of the hybrid tube crushing mode with aluminum tube

شکل 7 مقایسه مود فروریزی لوله هیبریدی با لوله آلومینیومی

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFLS}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{SFLS}\right)^2 = 1 \quad (6)$$

در این رابطه 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 است. برای از بین بردن این اثر از مدل ناحیه چسبندگی¹ ارائه شده توسط تورن استفاده شده است. در این مدل از رابطه رایس (رابطه (6)) برای بدست آوردن طول ناحیه چسبندگی استفاده شده است تا رابطه‌ای بین استحکام باند، نرخ آزاد شدن انرژی بین لایه‌های بدست آید [36].

$$l_{cz} = \frac{9\pi}{32} E \frac{G_c}{(\tau^0)^2} \quad (7)$$

$$N_e = \frac{l_{cz}}{l_e} \quad (8)$$

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

در رابطه (7)، G_c نرخ آزاد شدن انرژی یا چقرمگی شکست بوده و طبق این رابطه، برای از بین بردن اثرات اندازه مش، با ثابت در نظر گرفتن چقرمگی شکست بین لایه ای به عنوان خاصیتی فیزیکی، با در نظر گرفتن طول ناحیه چسبندگی که از ضرب طول المان (l_e) در تعداد المانی که در این ناحیه وجود دارد (N_e^0)، یعنی با قرار دادن رابطه (8) در (7) مقدار استحکام باند (رابطه (9)) بدست می‌آید. با قرار دادن مقادیر چقرمگی مود I و II در این رابطه به ترتیب مقادیر NFLS و SFLS بدست می‌آیند. همچنین برای تعریف این نوع تماس، پارامتر CCRIT که حداکثر جدایش بین دو سطح متصل شده است و همچنین سطح زیر نمودار نیرو-جدایش و میزان انرژی جذب شده (E_{tie}) را نشان می‌دهد (شکل 6)، نیز باید معین گردد. از آنجا که برخلاف استحکام بین لایه‌ای، میزان جذب انرژی بین لایه‌ای در فروریزی چندان مؤثر نیست، مقدار این پارامتر در مدل‌سازی برابر صفر قرار داده شد [37].

تماس بین لوله فلزی به صورت قید جداشونده در نظر گرفته شد. با استفاده از این نوع تماس، که از ویژگی‌های آن قابلیت استفاده در بین لایه‌های پوسته است، می‌توان لایه‌لایه شدگی را با حجم محاسباتی بسیار کمتر از المان‌های حجمی چسبندگی² شبیه سازی کرد.

³ Specific Energy Absorption

⁴ Crush Force Efficiency

¹ Cohesive Zone

² Cohesive

در کلیه نمونه‌های آزمایش شده، فروریزی به صورت پیوسته با ایجاد لولای پلاستیکی در لوله آلومینیومی و تشکیل لایه‌های خم‌شونده (در جاذب انرژی هیبریدی) به بیرون انجام شد. دلیل این مسئله را می‌توان در مناسب بودن مشخصات هندسی و به طور خاص نسبت ضخامت به قطر و طول مناسب، بکار بردن آغازگر به صورت پخ 45 درجه، استحکام بالای الیاف و رزین و نوع لایه‌چینی مورد استفاده دانست. قسمت خطی ابتدای نمودارها مربوط به رفتار الاستیک لوله آلومینیومی و لایه‌های کامپوزیتی بوده و تا ایجاد نیروی ماکزیمم در نمودار نیرو-جابجایی ادامه پیدا می‌کند. تخریب با لهیدگی آغازگر شروع شده و با تشکیل اولین لولای پلاستیک (کمانش محلی) ادامه می‌یابد. سپس با ایجاد یک ترک بین لایه‌ای در وسط ضخامت کامپوزیت، لایه‌های بیرون‌ریز از لوله آلومینیومی و یکدیگر جدا می‌شوند. از آنجا که مواد مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها شفاف هستند، ایجاد ترک مود یک بین لایه‌ای میان لایه‌های کامپوزیت و سطح لوله آلومینیومی تا حدودی قابل مشاهده است. این پدیده موجب افت ناگهانی نیرو در نمودار نیرو-جابجایی خواهد شد (شکل 11). همچنین لایه‌های خمیده ایجاد شده در تمام آزمایش‌ها به صورت یکپارچه باقی ماندند و به قطعات ریز متلاشی نشدند که علت آن را می‌توان در تک‌جهته بودن پارچه‌های مورد استفاده جستجو کرد. بعد از نیروی ماکزیمم، منحنی نیرو افت کرده و حول مقدار ثابتی (نیروی میانگین) تناوب می‌کند که نشان دهنده تخریب پیوسته است و با ادامه یافتن لایه‌لایه شدگی و خمیدگی لایه‌ها به بیرون همراه است.

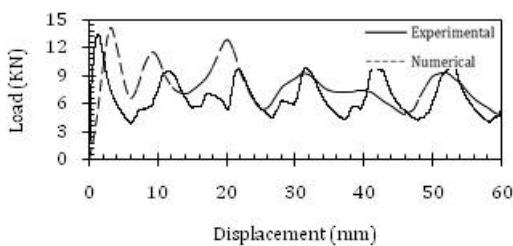


Fig. 9 Force-displacement diagram of Aluminum tube

شکل 9 نمودار نیرو-جابجایی لوله آلومینیومی

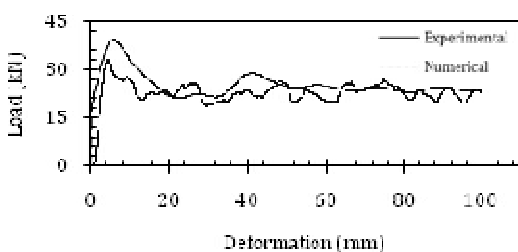


Fig. 10 Force-displacement diagram of sample 1

شکل 10 نمودار نیرو-جابجایی نمونه 1

برای تحلیل درست رفتار جاذب‌های انرژی و تحلیل تأثیر پارامترهای مختلف، بررسی دقیق مکانیزم‌هایی که در ایجاد تخریب و جذب انرژی نقش دارند، ضروریست. با دقت در شکل 8 مشخص است که مکانیزم‌های مختلفی در این مسئله نقش دارند. این مکانیزم‌ها عبارتند از تشکیل لولای پلاستیک در لوله آلومینیومی، پیچ‌خوردگی فشاری الیاف، شکست فشاری ماتریس، ایجاد ترک‌های بین‌لایه‌ای مود I، II و ترکیبی، مقامت به خم شدگی لایه‌های تشکیل شده و اصطکاک بین لایه‌ها، خرد شدن الیاف و تشکیل گوه در ترک مرکزی¹ و صفحه بارگذاری. همچنین در لایه‌های خم‌شونده به بیرون شکست کششی الیاف و ماتریس و ایجاد ترک‌های داخل لایه‌ای محوری هم قابل مشاهده است که در جذب انرژی نقش دارند.

نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی در شکل‌های 9 تا 17 نشان داده شده‌اند. همچنین پارامترهای فروریزی شامل نیروی ماکزیمم، نیروی میانگین، راندمان طول فروریزی، جذب انرژی کل و جذب انرژی ویژه در جدول 7 نشان داده شده‌اند. شکل 9 نشان دهنده نمودار نیرو-جابجایی جاذب انرژی فلزی و شکل 17 بیان‌کننده مقایسه‌ای بین نمودار نیرو-جابجایی جاذب انرژی فلزی و هیبریدی است.

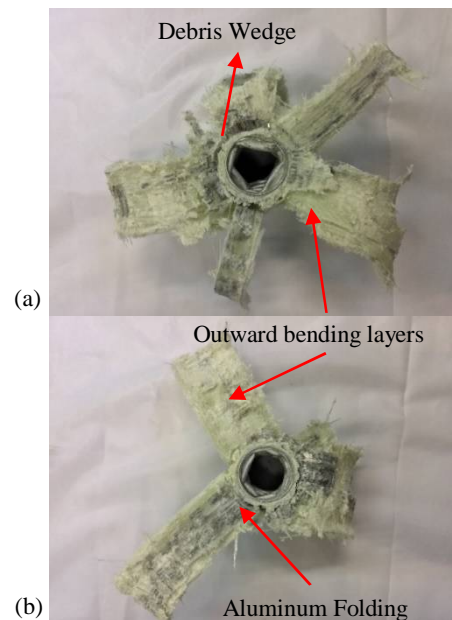


Fig. 8 Upper view of the hybrid tubes collapsed a) Sample 4 ($[0_8/90_8]$) b) Sample 7 ($[0_{12}/90_{12}]$)

شکل 8 نمای بالایی لوله‌های هیبریدی فروریخته (a) نمونه 4 ($[0_8/90_8]$) (b) نمونه 7 ($[0_{12}/90_{12}]$)

¹ Debris Wedge

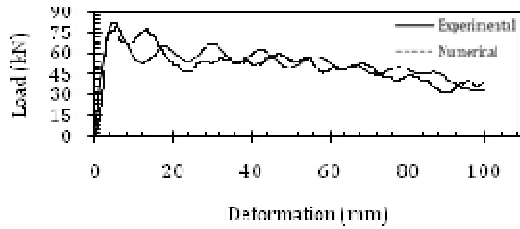


Fig. 16 Force-displacement diagram of sample 7

شکل 16 نمودار نیرو-جابجایی نمونه 7

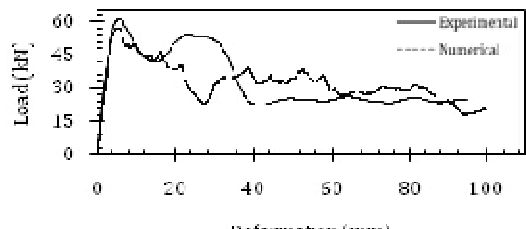


Fig. 11 Force-displacement diagram of sample 2

شکل 11 نمودار نیرو-جابجایی نمونه 2

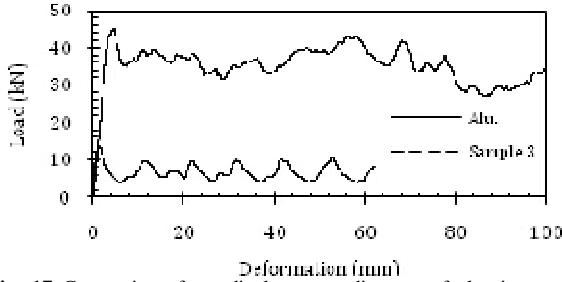


Fig. 17 Comparison force-displacement diagram of aluminum tube with sample 3

شکل 17 مقایسه نمودار نیرو-جابجایی فروریزی لوله آلومینیومی با نمونه 3

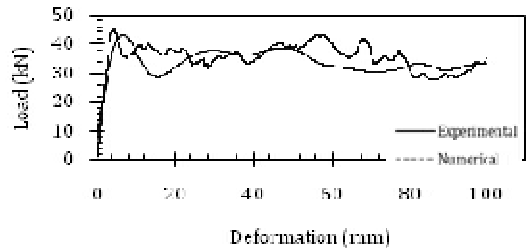


Fig. 12 Force-displacement diagram of sample 3

شکل 12 نمودار نیرو-جابجایی نمونه 3

جدول 7 مقایسه نتایج آزمایش فروریزی جاذب انرژی آلومینیومی و هیبریدی با شبیه سازی عددی

Table 7 Comparison of the results of experimental crashworthiness parameter with numerical simulation

Specimen		EA(kJ)	SEA(kJ/kg)	P_{max} (kN)	P_{mean} (kN)	CLE%
AL. Tube	Exp.	0/41	8/22	13/44	7/12	50/47
	Num.	0/42	8/32	14/2	6/88	48/45
	Error %	2/5	2/4	5/6	1/5	4
1	Exp.	2/27	22/65	34/99	22/65	68/67
	Num.	2/52	25/20	39/04	25/22	64/6
	Error %	11/45	11/26	11/76	11/34	5/93
2	Exp.	3/23	20/49	56/94	32/29	56/7
	Num.	3/28	20/50	60/58	32/76	54/08
	Error %	1/58	0/05	6/39	1/47	4/63
3	Exp.	3/14	19/99	45/36	35/37	77/97
	Num.	3/38	21/13	43/27	33/8	78/11
	Error %	4/37	5/68	4/61	4/42	0/18
4	Exp.	4/36	19/32	68/34	43/57	63/76
	Num.	4/22	17/96	68/73	47/21	68/69
	Error %	3/14	7/05	0/57	8/35	7/73
5	Exp.	4/22	17/87	76/2	42/23	55/41
	Num.	3/77	16/04	80/62	38/16	49/33
	Error %	10/76	10/23	5/79	9/62	10/90
6	Exp.	4/04	16/85	58/8	40/43	68/77
	Num.	3/6	15/32	64/48	35/96	55/77
	Error %	10/98	9/09	9/65	11/08	18/9
7	Exp.	5/08	15/73	79/56	50/81	63/86
	Num.	5/3	16/31	81/9	52/96	64/66
	Error %	4/36	3/67	2/94	4/24	1/26

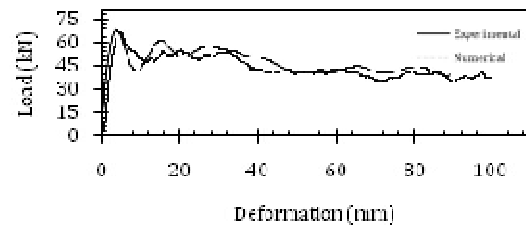


Fig. 13 Force-displacement diagram of sample 4

شکل 13 نمودار نیرو-جابجایی نمونه 4

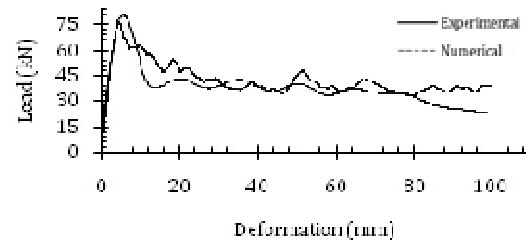


Fig. 14 Force-displacement diagram of sample 5

شکل 14 نمودار نیرو-جابجایی نمونه 5

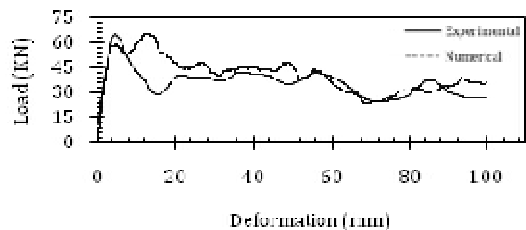


Fig. 15 Force-displacement diagram of sample 6

شکل 15 نمودار نیرو-جابجایی نمونه 6

در جدول 7 به بررسی پارامترهای فروریزی برای جاذب انرژی فلزی و هیبریدی و مقایسه آن با نتایج مدل سازی عددی پرداخته شده است.

نسبت به وزن با افزایش ضخامت کاهش یافته است. در شکل‌های 19 و 20 تأثیر ضخامت به ترتیب بر میزان جذب انرژی و جذب انرژی ویژه و نیروی ماکزیمم و میانگین نمایش داده شده است.

با مقایسه‌ای که در شکل‌های 21 و 22 بین سه نوع لایه‌چینی $[0_2/90_2]_4$ ، $[0_8/90_8]$ و $[0_4/\pm 45_8/90_4]$ در ضخامت ثابت برای دو پارامتر جذب انرژی ویژه و ماکزیمم نیروی طول فروریزی، انجام شده؛ میزان جذب انرژی ویژه در لایه‌چینی $[0_8/90_8]$ بیشتر از دو نمونه دیگر بوده است. علت این مساله را می‌توان در افزایش استحکام در راستای محوری و همچنین مقاومت بیشتر نمونه در برابر تنش محیطی (هوب) و وجود الیاف صفر درجه در کمترین فاصله از لوله‌ی آلومینیومی دانست. الیاف صفر درجه موجب افزایش استحکام جاذب انرژی در راستای محوری لوله شده و علاوه ایجاد معایبی مانند افزایش نیروی ماکزیمم، نتایج مطلوبی مانند افزایش انرژی جذب شده ویژه به همراه خواهد داشت. همچنین جذب انرژی لایه‌چینی $[0_2/90_2]_4$ بیشتر از لایه‌چینی $[0_4/\pm 45_8/90_4]$ بوده است، علت این پدیده را می‌توان افزایش تعداد لایه‌های صفر درجه دانست. کمترین مقدار نیروی ماکزیمم برای لایه‌چینی $[0_4/\pm 45_8/90_4]$ بوده که کمترین مقدار الیاف را در راستای صفر درجه داشته است.

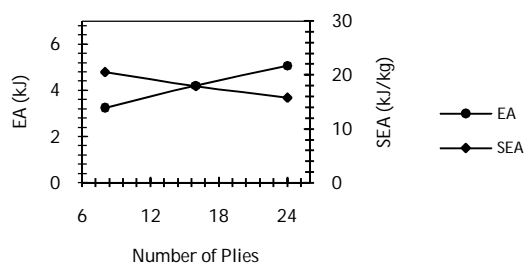


Fig. 19 Energy absorption and Specific energy absorption parameters in terms of the number of layers

شکل 19 تغییر پارامترهای جذب انرژی و جذب انرژی ویژه فروریزی بر حسب تعداد لایه‌ها در لایه‌چینی $[0_n/90_n]$

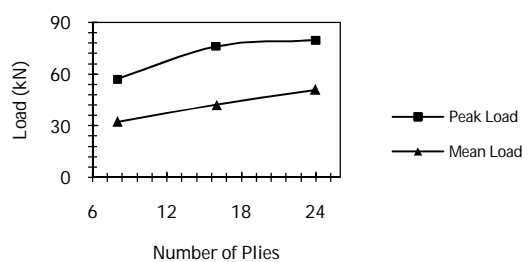


Fig. 20 Maximum and average load parameters of the crush length in terms of the number of layers

شکل 20 تغییر پارامترهای ماکزیمم و نیروی میانگین بر حسب تعداد لایه‌ها در لایه‌چینی $[0_n/90_n]$

اختلاف پارامترهای فروریزی بین نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی کمتر از 13% بوده که نشان می‌دهد مدل عددی توانایی پیش‌بینی تغییرات ضخامت و لایه چینی و تغییر زاویه الیاف را دارد. استفاده از المان پوسته و مدل ماده MAT_54/55 برای مدل‌سازی کامپوزیت در جاذب‌های انرژی؛ علاوه بر کاهش زمان حل و توانایی محاسبه‌ی پارامترهای فروریزی، مودهای فروریزی را به طور مطلوبی شبیه‌سازی کرده است. در شکل 18 مدل عددی نمونه شماره 4 نمایش داده شده است. در این نمونه علاوه بر اختلاف 7% پارامترهای فروریزی بین نمونه‌های آزمایشگاهی با مدل‌سازی عددی، نمای مطلوبی از مودهای فروریزی مانند تشکیل لولای پلاستیک در لوله آلومینیومی، ایجاد ترک‌های بین‌لایه‌ای مود I، II و ترکیبی و خم شدگی لایه‌ها به بیرون را نشان داده است.

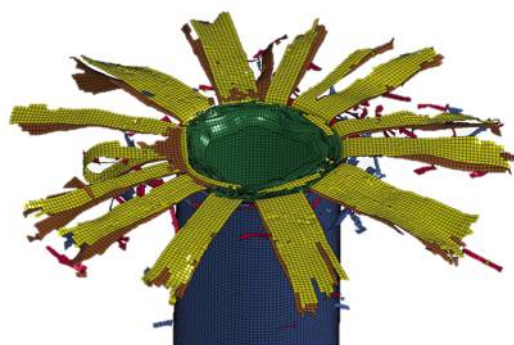


Fig. 18 The numerical crushing model of the hybrid tube

شکل 18 مدل عددی فروریزی لوله هیبریدی

همان‌طور که اشاره شد، ضخامت جاذب انرژی، فاکتور بسیار مهم و تأثیرگذاری در رفتار این گونه‌سازه‌هاست. در طی آزمایش‌های شبه استاتیکی انجام شده بر روی چهار ضخامت مختلف، رفتاری تقریباً خطی در تغییرات نیروی ماکزیمم، نیروی میانگین و جذب انرژی ویژه به عنوان تابعی از ضخامت و تعداد لایه‌ها بدست آمد که در شکل‌های 19 و 20 نشان داده شده است.

افزایش میزان نیروی ماکزیمم به طور مستقیم به ضخامت و حجم آغازگر بستگی دارد. چراکه در حین فروریزی آغازگر، بدنه اصلی لوله تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. بنابراین با افزایش ضخامت آن، افزایش نیروی ماکزیمم مشاهده می‌شود. افزایش نیروی میانگین و جذب انرژی را می‌توان به افزایش ضخامت لایه‌های خم شونده، افزایش سفتی خمشی آن‌ها و در نتیجه نیاز به نیرو و انرژی بیشتر برای خم شدن آن‌ها نسبت داد. اما کاهش میزان جذب انرژی ویژه نشان می‌دهد که حجم تخریب

استراتژی مدل‌سازی می‌توان برای بهینه‌سازی هندسی و لایه چینی جاذب‌های انرژی هیبریدی استفاده کرد.

6- مراجع

- [1] Shin, K. C., Lee, J. J., Kim, K. H., Song, M. C. & Huh, J. S., "Axial crush & bending collapse of an aluminum/GFRP hybrid square tube & its energy absorption capability," *Composite Structures*, Vol. 57, No. 1-4, pp. 279-287, Jul. 2002.
- [2] Palanivelu, S., Paeppegem, W. V., Degrieck, J., Vantomme, J., Kakogiannis, D., Ackeren, J. V., Hemelrijck D. V., Wastiels J., "Crushing & energy absorption performance of different geometrical shapes of small-scale glass/polyester composite tubes under quasi-static loading conditions," *Composite Structures*, Vol. 93, No. 2, pp. 992-1007, Jan. 2011.
- [3] Khodadadi, A., Liaghat, G., Ahmadi, H. & Bahramian, A., "Experimental & numerical analysis of high velocity impact on Kevlar / Epoxy composite plates," In Persian, *Journal of Science & Technology of Composites*, 2016.
- [4] Zhao, X. L. & Zhang, L., "State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures," *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 8, pp. 1808-1823, Aug. 2007.
- [5] Hollaway, L. C. & Cadei, J., "Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites," *Progress in Structural Engineering & Materials*, Vol. 4, No. 2, pp. 131-148, 2002.
- [6] Rajabiehfard, R., Darvizeh, A., Tavoli, M. Ali, Sadeghi, H., Moghadam, M., & Noorzadeh, N., "An investigation into the behavior of cylindrical shells with different thickness distributions under axial quasi-static & impact loadings," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 269-280, 2017.
- [7] Choubini, M., Liaghat, G. H., & Pol, M. H., "Investigation of energy absorption & deformation of thin walled tubes with circle & square section geometries under transverse impact loading," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, 2015.
- [8] Deslauriers, P., *Numerical modeling of composite structures for advanced automotive applications*. ProQuest, 2006.
- [9] Shin, K. C., Lee, J. J., Kim, K. H., Song, M. C., & Huh, J. S., "Axial crush & bending collapse of an aluminum/GFRP hybrid square tube & its energy absorption capability," *Composite Structures*, Vol. 57, No. 1-4, pp. 279-287, Jul. 2002.
- [10] Bambach, M. R., Elchalakani, M., & Zhao, X. L., "Composite steel-CFRP SHS tubes under axial impact," *Composite Structures*, Vol. 87, No. 3, pp. 282-292, Feb. 2009.
- [11] Ebrahimkhani, Liaghat, M., G., & Ahmadi, H., "Experimental and Numerical Investigation of

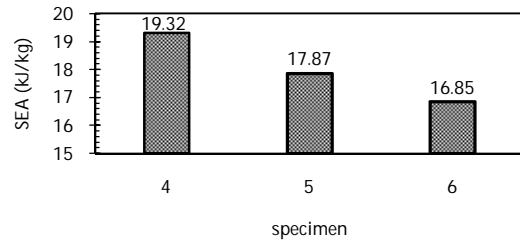


Fig. 21 Comparison of the specific energy absorption according to the staking sequence in the same number of layers (16 layers)

شکل 21 مقایسه میزان جذب انرژی ویژه بر حسب نوع لایه چینی در تعداد لایه ثابت (16 لایه)

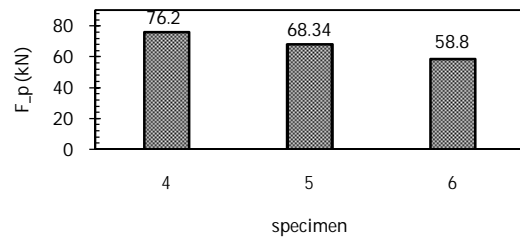


Fig. 22 Comparison of the maximum load in terms of the staking sequence in the same number of layers (16 layers)

شکل 22 مقایسه نیروی ماکزیمم بر حسب نوع لایه چینی در تعداد لایه ثابت (16 لایه)

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جاذب‌های انرژی هیبریدی ساخته شده از آلومینیوم و الیاف شیشه و رزین اپوکسی تحت بار شبه استاتیکی مورد آزمایش فروریزی قرار گرفتند و به صورت عددی مدل‌سازی شدند. در آزمایش‌ها مود فروریزی آکاردئونی و الماسی مشاهده شد و خروجی نتایج شبیه‌سازی، نمودار نیرو-جابجایی، تطابق مناسبی با داده‌های تجربی داشت. با اضافه شدن کامپوزیت به لوله آلومینیومی، جذب انرژی ویژه به طور میانگین 140% افزایش داشته است. با افزایش تعداد لایه‌های کامپوزیت، مقدار انرژی جذب شده افزایش یافته ولی مقدار انرژی جذب شده بر واحد وزن کاهش می‌یابد. در ضخامت ثابت استفاده از الیاف در راستای عمود بر محور استوانه در بیرونی‌ترین لایه‌ها، جذب انرژی بیشتری نسبت به بقیه حالات ممکن دارد. روابط ساختاری مدل به تفصیل بررسی شد، با استفاده از خواص مکانیکی قطعه که از مجموعه‌ای از آزمایش‌های استاندارد به دست می‌آیند، توانایی پیش‌بینی و مدل‌سازی آسیب و فروریزی در سازه‌های کامپوزیتی را دارد. این در حالی است که استفاده از برخی مدل‌های ساختاری موجود در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی عددی، مستلزم سعی و خطا و به دست آوردن پارامترهای عددی متعددی است. از این

- of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 233, No. 11, pp. 3917–3935, 2019.
- [24] Cheng, Q., Altenhof, W., & Li, L., "Experimental investigations on the crush behaviour of AA6061-T6 aluminum square tubes with different types of through-hole discontinuities," *Thin-Walled Structures*, Vol. 44, No. 4, pp. 441–454, 2006.
- [25] Qureshi, O. M. & Bertocchi, E., "Crash behavior of thin-walled box beams with complex sinusoidal relief patterns," *Thin-Walled Structures*, Vol. 53, pp. 217–223, Apr. 2012.
- [26] Lee, S., Hahn, C., Rhee, M., & Oh, J.-E., "Effect of triggering on the energy absorption capacity of axially compressed aluminum tubes," *Materials & Design*, Vol. 20, No. 1, pp. 31–40, 1999.
- [27] Nadaf Oskouei, M. P. B. A. & Khodarahmi, H., "Numerical & Experimental Study of Diamond Collapse of a Thin Wall Tube Energy-Absorber with Caps under Dynamic Axial Loading," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. October, pp. 169–178, 2015.
- [28] Aidi, B. & Case, S. W., "Experimental & numerical analysis of notched composites under tension loading," *Applied Composite Materials*, Vol. 22, No. 6, pp. 837–855, 2015.
- [29] Siromani, D., Awerbuch, J., & Tan, T.-M. M., "Finite element modeling of the crushing behavior of thin-walled CFRP tubes under axial compression," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 64, pp. 50–58, Aug. 2014.
- [30] Palanivelu, S., Van Paepegem, W., Degrieck, J., Kakogiannis, D., Van Ackeren, J., Van Hemelrijck, D., ... & Vantomme, J., "Parametric study of crushing parameters & failure patterns of pultruded composite tubes using cohesive elements & seam, Part I: Central delamination & triggering modelling," *Polymer Testing*, Vol. 29, No. 6, pp. 729–741, Sep. 2010.
- [31] Mamalis, A. G., Manolacos, D. E., Ioannidis, M. B., & Papapostolou, D. P., "The static & dynamic axial collapse of CFRP square tubes: Finite element modelling," *Composite Structures*, Vol. 74, No. 2, pp. 213–225, 2006.
- [32] Huang, J. & Wang, X., "Numerical & experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes," *Composite Structures*, Vol. 91, No. 2, pp. 222–228, 2009.
- [33] Feraboli, P., Wade, B., Deleo, F., Rassaian, M., Higgins, M., & Byar, A., "LS-DYNA MAT54 modeling of the axial crushing of a composite tape sinusoidal specimen," *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, Vol. 42, No. 11, pp. 1809–1825, 2011.
- [34] Sabouri, H., Liaghat, G., & Sadighi, M., "Experimental, Analytical and Numerical Investigation of Ballistic Impact of Blunt Projectile into Asymmetric GLARE Targets," PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat modares university, Tehran, 2011. (In Persian)
- Crushing Performance of Composite Energy Absorber with Hourglass Section," MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat modares university, Tehran, 2011. (In Persian)
- [12] Song, H. W., Wan, Z. M., Xie, Z. M., & Du, X. W., "Axial impact behavior & energy absorption efficiency of composite wrapped metal tubes," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 385–401, Apr. 2000.
- [13] Farley, G. L., "Effect of fiber & matrix maximum strain on the energy absorption of composite materials," *Journal of composite materials*, Vol. 20, No. 4, pp. 322–334, 1986.
- [14] Babbage, J. M. & Mallick, P. K., "Static axial crush performance of unfilled & foam-filled aluminum-composite hybrid tubes," *Composite Structures*, Vol. 70, No. 2, pp. 177–184, Sep. 2005.
- [15] Farley, G. L., "Effect of specimen geometry on the energy absorption capability of composite materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 20, No. 4, pp. 390–400, 1986.
- [16] Laananen, D. H. & Winkelman, K. L., "Analysis of energy-absorbing seat configurations for aircraft," *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 1, No. 4, pp. 355–368, 1996.
- [17] Ramakrishna, S., "Microstructural design of composite materials for crashworthy structural applications," *Materials & Design*, Vol. 18, No. 3, pp. 167–173, Oct. 1997.
- [18] Palanivelu, S., Paepegema, W. V., Degrieck, J., Ackeren, J. V., Kakogiannis D., Hemelrijck, D. V., Wastiels, J., Vantomme, J., "Experimental study on the axial crushing behaviour of pultruded composite tubes," *Polymer Testing*, Vol. 29, No. 2, pp. 224–234, Apr. 2010.
- [19] Siromani, D., Henderson, G., Mikita, D., Mirarchi, K., Park, R., Smolko, J., ... & Tan, T. M., "An experimental study on the effect of failure trigger mechanisms on the energy absorption capability of CFRP tubes under axial compression," *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, Vol. 64, pp. 25–35, Sep. 2014.
- [20] Eshkoo, R. A., Oshkovr, S. A., Sulong, A. B., Zulkifli, R., Ariffin, A. K., & Azhari, C. H., "Effect of trigger configuration on the crashworthiness characteristics of natural silk epoxy composite tubes," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 55, No. 1, pp. 5–10, Dec. 2013.
- [21] Feraboli, P., "Development of a Corrugated Test Specimen for Composite Materials Energy Absorption," *Journal of Composite Materials*, Vol. 42, No. 3, pp. 229–256, 2008.
- [22] Niknejad, A., Kharaman-Nia, I., "Experimental Study on Double-Walled Copper & Carbon / Epoxy Composite Tubes under the Axial Loading," In Persian, *Mechanics of Advanced Composite Structures (Semnan)*, Vol. 2, pp. 71–79, 2014.
- [23] Ahmadi, A. & Asgari, M., "Efficient crushable corrugated conical tubes for energy absorption considering axial & oblique loading," *Proceedings*

- models,” *Engineering fracture mechanics*, Vol. 74, No. 10, pp. 1665–1682, 2007.
- [37] McGregor, C., Vaziri, R., & Xiao, X., “Finite element modelling of the progressive crushing of braided composite tubes under axial impact,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, No. 6, pp. 662–672, Jun. 2010.
- [35] K. U. M. V. LS-DYNA, “Vol. 2: Material Models”, Livermore Software Technology Corporation, California, USA, 2007.
- [36] Turon, A., Davila, C. G., Camanho, P. P., & Costa, J., “An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone