



تحلیل تجربی و عددی نیم استوانه مشبک کامپوزیتی تقویت شده با الگوی مثلثی تحت بارگذاری ضربه سرعت بالا

سید محمد رضا خلیلی^{1*}، سید مهیار میر محمد حسین آهاری²، یاسر صدیق²

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
 2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
 * صندوق پستی 16846-13114، khalili@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 95/03/30
 پذیرش: 95/11/29

کلیدواژگان:

استوانه مشبک
 آزمون تجربی ضربه
 شبیه سازی عددی
 جذب انرژی
 آسیب

چکیده

در این مقاله فرایند ساخت قالب برای استوانه مشبک کامپوزیتی مطالعه گردیده و نمونه مشبک با استفاده از روش رشته پیچی ساخته شده است. همچنین رفتار سازه مشبک کامپوزیتی نیم استوانه‌ای با الگوی مثلثی از جنس شیشه- اپوکسی تحت بار ضربه‌ای به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. به منظور آزمون ضربه از دستگاه تفنگ گازی استفاده شده است که سرعت ورودی و خروجی از دستگاه به دست می‌آید. همچنین برای این آزمون فیکسچر مناسبی طراحی شده است. پرتابه مورد استفاده به شکل استوانه و دارای سر نیم کروی می‌باشد. شبیه سازی عددی آزمون ضربه انجام شده است و با نتایج تجربی صحت سنجی شده است. سرعت خروجی، سطح آسیب، جدایش بین پوسته و ریب به صورت تجربی و عددی با هم مقایسه شده‌اند. در نهایت به بررسی عددی اثر نوع پرتابه و زاویه لایه چینی بر روی پارامترهای ضربه پرداخته شده است. در محدوده زاویه‌های چینی 45 درجه کم‌ترین میزان سرعت خروجی پرتابه و بیش‌ترین میزان جذب انرژی را دارا می‌باشد. پرتابه سرتخت نسبت به دو پرتابه سرمخروطی و سر نیم کروی به دلایلین که سر پرتابه سطح تماس بیش‌تری با پوسته دارد، بیش‌ترین آسیب را به سازه وارد می‌کند و در نتیجه سرعت خروجی پرتابه کم‌تر و جذب انرژی سازه بیش‌تر است.

Experimental and numerical investigation on semi-cylindrical compositelatticereinforced with triangular cellssubjected to high velocity impact

Seyed Mohammad Reza Khalili^{1*}, Seyed Mahyar Mir Mohammad Hossein Ahari¹, Yaser Sedigh¹

1-Faculty of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
 * P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, khalili@kntu.ac.ir

Keywords

Cylindrical lattice
 Experimental analysis
 Numerical simulation
 Energy absorption
 Damage

Abstract

In this paper, the process of manufacture of mold for lattice cylindrical composite is studied and lattice composite samples has been manufactured by the filament winding process. Also, the structural behavior of lattice semi-cylindrical composite made by glass/Epoxy with has been studied under high velocity impact by experimental and numerical analysis. A gas gun testing machine has been used for high velocity impact test that recorded the input and output velocities. Also, for this test, suitable fixture has been designed. The cylindrical projectile with hemispherical head has been used as impactor. Numerical simulation of impact tests has been conducted by ABAQUS commercial finite element code and the results have been verified by experimental results. Output velocity, surface damage, the separation between the shell and the rib are compared experimentally and numerically. Finally, numerical investigation of the shape of the projectile and the layup orientation has been done. Results show that 45 degrees angle of layup has minimum output velocity and maximum energy absorption. Also, the projectile with flat head has been created maximum area damage, because of the less area contact with shell relative to another projectiles, therefore has less output velocity and more energy absorption.

Please cite this article using:

Khalili, S. M. R. Ahari, S. M. M. M. Sedigh, Y., "Experimental and numerical investigation on semi-cylindrical compositelatticereinforced with triangular cellssubjected to high velocity impact", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 05, No. 02, pp. 208-217, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1- مقدمه

سازه‌های کامپوزیتی مشبک با داشتن وزن کم، دارای کارایی بالا از جمله مقاومت پیچشی بالا، مقاومت در برابر رشد ترک و خرابی، نسبت استحکام و سفتی به وزن بالا بوده و همچنین با توجه به ساختار شبکه‌ای، محافظ بسیار خوب حرارتی در کاربردهای فضایی بشمار می‌روند. از سازه‌های مشبک در بدنه هواپیماها، سازه‌های هوایی، فضاپیماها، صنعت خودروسازی، صنایع کشتی سازی، صنایع نفت و مخازن تحت فشار استفاده می‌شود [1]. در حقیقت این سازه‌ها قابلیت‌های سازه‌های کامپوزیتی ساده و همچنین سازه‌های تقویت شده را با هم دارند. در این سازه‌ها به دلیل اینکه معمولاً ریب‌ها به صورت یک جهته ساخته می‌شوند دارای درصد حجمی بالا و به تبع آن استحکام زیادی در مقایسه با وزن خود می‌باشند، این عامل همچنین باعث بروز برتری دیگری در نزد این سازه‌ها نسبت به سازه‌های فلزی یا کامپوزیتی ساده و یا سازه‌های کامپوزیتی ساندویچی می‌شوند که آن احتمال بسیار کم بروز پدیده تورق در آن‌هاست. همچنین هنگامی که تمام ریب‌ها از الیاف تک جهته ساخته می‌شوند، هیچ عدم تطابقی در خواص مواد بروز نکرده که خود باعث مقاومت بالایی در برابر ضربه و خستگی نسبت به سازه‌های لایه‌چینی ساده می‌گردد.

در این مقاله روش ساخت قالب و نمونه استوانه مشبک کامپوزیتی و همچنین آزمایش ضربه سرعت بالا بر روی استوانه مشبک بررسی شده است که در ادامه پژوهش‌های انجام شده در این زمینه‌ها آورده شده است. هایبریچ و همکاران [2] در مقاله‌ای به بررسی یکی از روش‌های ساخت سازه مشبک یعنی توسعه بلوک پرداختند. در این روش از دو ابزار استفاده می‌شود یکی قسمت پایه و یکی بلوک. بلوک‌ها از مواد تراکم ناپذیر با ضریب انبساط حرارتی ساخته می‌شوند تا در هنگام پخت بلوک‌ها دچار تغییر شکل نشوند. بلوک‌ها بر روی قسمت پایه به وسیله پین نصب می‌شوند. این بلوک‌ها با فواصل خاصی کنار هم قرار می‌گیرند تا بتوانند الگوهای مشبک مختلفی با پهنای ریب مختلفی را به وجود آورند. هوانگ و همکاران [3] با استفاده از شیوه قالب گیری نرم به کمک فرآیند هم‌پخت برای کاهش قیمت اقتصادی نمودن سازه‌های پیشرفته کامپوزیتی مشبک تحقیقاتی را انجام دادند. در فرآیند پخت همزمان بخش رویه و بخش ریب‌های شبکه به صورت هماهنگ و همزمان تحت پخت قرار می‌گیرند. از جمله روش‌های دیگر می‌توان به ساخت جداگانه ریب‌ها و پوسته و چسباندن آن‌ها اشاره نمود. تسای [4] روشی را به نام تریگ برای ساخت استوانه‌ها و نمونه‌های تخت پیشنهاد کرد، در این روش لوله‌های کامپوزیتی با سطح مقطع‌هایی نظیر مربع یا مثلث (شکل دلخواه) پس از قرار گرفتن بر روی پنل یا مندرل اصلی برش خورده و برای شکل دهی صحیح شبکه، سوار می‌شوند. کیم [5] روشی را برای ساخت این سازه‌ها ارائه داد که در آن فرآیند ساخت، با ساخت یک قالب یا مندرل فلزی آغاز شده و سپس روکشی از لاستیک مذاب نظیر لاستیک که تحمل دمای بالا را دارد به آن اضافه می‌شود و در دمای اتاق لاستیک سخت می‌گردد. سپس قطعه حاصل شده از لاستیک بر روی مندرل فلزی که برای رشته پیچی در نظر گرفته شده است توسط پیچ سواری می‌شود.

گیبسون و همکارانش [6]، به صورت تجربی و عددی به بررسی جذب انرژی صفحه مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری عرضی پرداختند. در این پژوهش برای تست ضربه دامنه کوچکی از جابجایی در نظر گرفته شده است. جنس الیاف استفاده شده شیشه و رزین آن پلی پروپیلن بوده است. از شرایط مرزی سه نقطه خمش در تست‌ها و شبیه سازی المان محدود شبه استاتیکی

استفاده شده است. نتایج شبیه سازی و تست نشان داده است که این نوع سازه دارای حد آسیب خوبی می‌باشد. مشاهده شده است علی‌رغم اینکه بار بیشینه زمانیکه بارگذاری در سمت پوسته است نسبت به زمانی که بارگذاری در سمت ریب است، بیشتر می‌باشد، مقدار جذب انرژی ویژه و دامنه جابجایی زمانی که بارگذاری در سمت ریب است، بیشتر است.

جادهو و همکارانش [7]، به صورت تجربی و عددی به بررسی جذب انرژی و ارزیابی آسیب صفحه مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری عرضی با دامنه جابجایی بزرگ پرداختند. آن‌ها برای ارزیابی کیفیت ساخت صفحه مشبک از تحلیل فرکانسی استفاده کردند که هر چه قدر فرکانس نمونه-هایبهمنزودیک‌تر باشد، نشان دهنده کیفیت ساخت شبیه به هم نمونه-ها خواهد بود.

فان و همکارانش [8]، در زمینه جذب امواج میکرو توسط صفحات مشبک کامپوزیتی به پژوهش پرداختند. در این تحقیقات که بر روی رزین‌های تقویت شده با الیاف کربن و شیشه انجام شد، با ساخت چند نمونه و آزمایش آن‌ها توانایی جذب امواج میکرو در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

سانچز و همکارانش [9]، به توسعه روش عددی که قدرت پیش بینی آسیب ناشی از برخورد پرتابه با سرعت بالا روی اهداف کامپوزیتی کربن-اپوکسی را داشت، پرداختند. در این شبیه سازی در حالات نفوذ کامل، سرعت خروجی و سطح شکست محاسبه و نتایج با داده‌های تجربی اعتبار سنجی شد.

دونادن و همکارانش [10]، به بررسی مدل سه بعدی و ماندگی برای پیش بینی پاسخ دینامیکی صفحات کامپوزیتی تحت بارگذاری ضربه پرداختند. مدل استفاده شده بر طبق دیدگاه مکانیک آسیب پیوسته است که قادر است انرژی هدر رفته مربوط به هر مود و ماندگی را کنترل کند. آن‌ها به منظور تعیین تمرکز آسیب مربوط به هر مود و ماندگی و پیش بینی کاهش تدریجی سفتی در طی فرآیند آسیب متغیرهای آسیب ترمودینامیکی برگشت ناپذیر تعریف کردند. همچنین مدل عددی فرآیند ضربه را در نرم افزار ال اس داینما شبیه سازی کردند که دقت خوبی با نتایج تجربی داشته است.

وانگ و همکارانش [11]، به صورت عددی و تجربی به بررسی مشخصه-های ضربه سرعت پایین و استحکام کششی باقیمانده صفحات کامپوزیتی کربنی پرداختند. آن‌ها برای شبیه سازی فرآیند ضربه از نرم افزار آباکوس استفاده کردند و مدل و ماندگی هاشین و یاه را به کار بردند. به صورت تجربی دو مود کششی آسیب برای انرژی‌های مختلف ضربه مشاهده کردند.

هدایتیان و همکاران [12]، به بررسی رفتار بالستیک کامپوزیت مشبک استوانه‌ای با الگوی لوزی به روش تجربی و عددی پرداخت. وی به این نتایج رسید که سازه در سرعت نزدیک به حد بالستیک نسبت به سرعت بالاتر رفتاری متفاوت از خود نشان می‌دهد به این معنا که با نزدیک شدن به ریب-ها حد بالستیک افزایش می‌یابد، در حالیکه در سرعت بالاتر از حد بالستیک با نزدیک شدن به محل تقاطع ریب‌ها سرعت خروجی پرتابه افزایش یافته است.

در پژوهش حاضر روش کم هزینه و مناسب برای ساخت قالب و نمونه-های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی ارائه شده است. همچنین نحوه تست تجربی شلیک پرتابه و شبیه سازی فرآیند ضربه سرعت بالا بر روی استوانه مشبک کامپوزیتی توضیح داده شده است. در آخر به بررسی اثر نحوه لایه چینی و نوع پرتابه در سطح آسیب و جذب انرژی این سازه‌ها پرداخته شده است.

2- مراحل ساخت سازه مشبک

1-2- طراحی و ساخت قالب

سازه‌های مشبک کامپوزیتی به طور کلی به سه شکل صفحات تخت، استوانه-ای و مخروطی می‌باشند. که برای ساخت هر کدام از این هندسه‌ها روش‌های متفاوتی وجود دارد. برای این سازه‌ها قالب استفاده شده نقش بسیار مهمی در کیفیت ساخت آن‌ها دارد. برای ساخت قالب از جنس‌های مختلفی از جمله فلزات، تفلون، گچ، فوم، سیلیکون می‌توان استفاده کرد. با توجه به تولید صنعتی یا کار آزمایشگاهی نمونه و همچنین اینکه قالب برای ساخت یک نمونه یا چندین نمونه بخواهد استفاده شود و همچنین هزینه تولید آن، جنس استفاده شده برای قالب می‌تواند متفاوت باشد. به عنوان مثال اگر قالب فقط یکبار برای ساخت نمونه استفاده شود می‌توان از گچ یا فوم استفاده کرد که بعد از ساخت نمونه و برای جدا کردن نمونه از قالب تخریب قالب مشکلی نداشته باشد. در این پژوهش از دو نوع جنس (تفلون و سیلیکون) برای ساخت قالب استفاده شده است و ویژگی‌های آن‌ها گفته شده است.

1-1-2- قالب تفلونی

برای طراحی قالب از نرم افزار کتیا استفاده شد. قالب طراحی شده در شکل 1 نشان داده شده است. قالب طراحی شده به صورتی است که دو نمونه استوانه-ای می‌توان در طول قالب تولید کرد. برای قالب شیارهای مارپیچ و محیطی طوری قرار گرفته‌اند که بتوان استوانه‌های مشبک با الگوهای لوزی، شش ضلعی و مثلثی ساخت. همچنین برای اینکه نمونه مشبک را بتوان از قالب جدا کرد قالب استوانه‌ای به صورت قطعه‌های مختلف کنار هم طراحی شد. طول قالب 70 سانتی متر می‌باشد که برای ساخت آن لوله تفلونی یک متری استفاده شد. همچنین برای این قالب یک شفت داخلی لازم می‌باشد که قالب بر روی آن نصب شود و شفت به دستگاه رشته پیچی وصل شود. لوله تفلونی با استفاده از دستگاه سی ان سی ۱ چهار محوره تراشکاری شد و شیارهای مربوطه بر روی آن ایجاد گردید. برای اینکه تیکه‌های قالب بر روی شفت جاسازی شوند، بر روی شفت سوراخ‌هایی تعبیه شدند که تیکه‌های قالب با پیچ به شفت بسته می‌شوند. بخش‌های مختلف قالب در شکل 2 و قالب تفلونی ساخته شده در شکل 3 نشان داده شده است.



Fig.1 Designed mold in Catia

شکل 1 قالب طراحی شده در نرم افزار کتیا



Fig. 2 Pieces of Teflon mold

شکل 2 بخش‌های مختلف قالب تفلونی



Fig.3 Full Teflon mold

شکل 3 قالب تفلونی کامل

این قالب تفلونی ساخته شده به دلایلی که در قسمت ساخت نمونه و رشته پیچی در ادامه توضیح داده خواهد شد فقط برای تولید نمونه استوانه مشبک بدون پوسته مناسب است و به خاطر اینکه بتوان استوانه مشبک با پوسته ساخت قالبی به مراتب نرم‌تر از تفلون لازم است که به همین دلیل به ساخت قالب سیلیکونی روی آورده شد.

2-1-2- قالب سیلیکونی

برای ساخت قالب سیلیکونی به دلیل اینکه سیلیکون به صورت مایع می‌باشد، باید یک شابلونی از قبل وجود داشته باشد تا بتوان سیلیکون را درون شابلون ریخت تا بعد از پخته شدن، سیلیکون شکل آن شابلون را به خود بگیرد. همچنین سیلیکون پخته شده به دلیل نرم و منعطف بودن قابلیت تراشکاری را ندارد به همین دلیل نمی‌توان قالب استوانه‌ای سیلیکونی درست کرد و بعد روی آن شیارهای لازم برای الگوی مشبک را تراشکاری کرد. در اینجا شابلون استفاده شده همان نمونه‌هایی است که با استفاده از قالب تفلونی ساخته شده‌اند. روش ساخت به این گونه است که یک ورق آلومینیومی به اندازه طول و قطر نمونه به صورت استوانه‌ای درست شد. پس از آن استوانه آلومینیومی به دور نمونه مشبک قرار گرفت و آن را به طور کامل احاطه کرد به صورتی که تمام ریب‌ها به بدنه آلومینیوم چسبیده شد. نمونه مشبک استفاده شده برای شابلون با استفاده از قالب تفلونی ساخته شده است. در شکل 4 استوانه مشبک استفاده‌شده برای ساخت قالب و در شکل 5 استوانه آلومینیومی محاط بر نمونه نشان داده شده است.

سیلیکون لازم شد. سیلیکون مربوطه با سخت کننده‌اش به نسبت هر 100 گرم سیلیکون، 5 گرم سخت کننده با هم مخلوط شدند. سپس به طور یکنواخت دور تا دور فضای بین استوانه آلومینیومی و لوله پلاستیکی سیلیکون ریخته شد تا از پایه شابلون تا بالای استوانه کل فضای بین ریب‌ها پر از سیلیکون گردد. همچنین در طی ریختن سیلیکون شابلون کمی تکان داده می‌شد تا حباب‌های هوایی که بین مایع سیلیکون مانده است به سطح شابلون بیاید و از آن خارج شود تا قالب سیلیکونی با کیفیت بهتری به دست آید. با توجه به درصد ترکیب سیلیکون و سخت کننده مدت زمان 8 ساعت برای پخته شدن سیلیکون کافی است ولی برای اطمینان کامل به مدت 24 ساعت شابلون مربوطه باز نشد تا قالب به خوبی ساخته شود. پس از آن استوانه آلومینیومی از دور سیلیکون پخته شده باز شد و نمونه‌ای که درون سیلیکون مانده بود از داخل قالب در آورده شد. در شکل 7 قالب سیلیکونی نشان داده شده است.

2-2 ساخت نمونه

1-2-2 مواد اولیه

رزین استفاده شده اپوکسی و از نوع P200 و ساخت کشور روسیه می‌باشد و سخت کننده آن مدل H200 می‌باشد. نسبت ترکیب رزین و سخت کننده، 100 گرم رزین و 15 گرم سخت کننده است. زمان سفت شدن رزین با سخت کننده آن حدود 2 ساعت است. همچنین الیاف از شیشه نوع E با TEX1200 می‌باشد. پارچه دو جهته 0 و 90 استفاده شده برای ساخت پوسته از جنس شیشه و 400 گرمی می‌باشد یعنی جرم هر یک متر مربع پارچه 400 گرم می‌باشد.

2-2-2-رشته پیچی

برای ساخت نمونه استوانه مشبک از روش رشته پیچی استفاده شد. ابتدا از قالب تفلونی استفاده شد. قالب بر روی دستگاه رشته پیچی قرار گرفت و با قلمو روغن سیلیکون، واکس و فیلم جداکننده روی قالب و داخل شیارها مالیده شد تا جداکننده‌های شیمیایی لازم برای جداکردن نمونه از قالب استفاده شده باشد. رزین با سخت کننده با نسبت ترکیب 100 گرم رزین و 15 گرم سخت کننده مخلوط و در محفظه‌ای به اسم استخر رزین ریخته تا الیاف پس از عبور از استخر رزین به رزین آغشته و در درون شیارها به دور قالب پیچیده شوند و ریب‌ها را تشکیل دهند. برای ساخت نمونه از 500 گرم



Fig. 7 Silicone mold

شکل 7 قالب سیلیکونی

سپس استوانه آلومینیوم در یک پایه چوبی و درون آن یک لوله پلاستیکی قرار داده شد قطر استوانه آلومینیومی 12 سانتی متر و لوله-پلاستیکی 9 سانتی متر است تا ضخامت قالب سیلیکونی 1.5 سانتی متر شود که انعطاف پذیری خوبی داشته باشد. در شکل 6 شابلون ساخته آورده شده است.

پس از آماده سازی شابلون سیلیکون لازم برای ساخت تهیه گردید. با توجه به حجم بین لوله پلاستیکی و استوانه آلومینیومی تقریباً 2 کیلوگرم



Fig.4 Lattice sample made using Teflon mold

شکل 4 نمونه مشبک ساخته شده با استفاده از قالب تفلونی



Fig. 5 Aluminum cylinder inscribed on the lattice sample

شکل 5 استوانه آلومینیومی محاط بر نمونه مشبک



Fig. 6 Template made for silicone mold

شکل 6 شابلون ساخته شده برای قالب سیلیکونی



Fig. 10 Lattice sample with triangular pattern

شکل 10 نمونه مشبک با الگوی مثلثی

جدول 1 مشخصات هندسی استوانه مشبک

Table 1 Lattice cylindrical geometry

مقادیر	مشخصات
1.8	ضخامت پوسته (mm)
120	قطر نمونه (mm)
250	ارتفاع نمونه (mm)
5*6	مقطع تقویت کننده (mm×mm)
60	زاویه مارپیچ (درجه)
پارچه دو جهته 0 و 90	لایه چینی (درجه)

مشخصات هندسی استوانه مشبک ساخته شده در جدول 1 آورده شده است. طبق تجربه حاصل شده با توجه به اینکه قالب سیلیکونی نسبت به تفنون نرم تر و انعطاف پذیرتر است، جداسازی نمونه خیلی راحت تر اتفاق می افتد بدون این که کمترین صدمه ای به قطعه وارد شود. در قالب تفلونی به دلیل تقاطع ریبها، جداسازی به راحتی اتفاق نمی افتد. از این جهت قالب تفلونی برای ساختن سازه مشبک با پوسته توصیه نمی شود. البته برای ساخت قالب سیلیکونی روش دیگری هم وجود دارد به این صورت که در آن هندسه مشبک بر روی صفحه مستطیلی طراحی می گردد به طوری که بعد از آن که صفحه مستطیلی به صورت لوله شود همان شکل استوانه مورد نظر ساخته شود. در اینجا با استفاده از جنس های کم هزینه مانند پلاگسی گلس، شابلون همان هندسه مشبک مستطیلی ساخته می شود و سیلیکون مایع بر روی این شابلون ریخته می شود و شکل هندسه مشبک را به خود می گیرد که پس از پخته شدن سیلیکون می توان این صفحه مستطیلی را به صورت استوانه در آورد که قالب سازه مشبک ساخته شود. نکته ای که در این روش وجود دارد این است که وقتی دو لبه صفحه مستطیلی کنار هم قرار می گیرند تا استوانه را تشکیل دهند انطباق خیلی خوبی ندارند و کمی فاصله بین شیارها می افتد.

3- آزمایش ضربه

آزمایش ضربه سرعت بالا برای نمونه نیم استوانه کامپوزیتی مشبک با استفاده از دستگاه تفنگ گازی در مرکز تحقیقات مواد و سازه های پیشرفته و هوشمند دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی انجام گرفت.

قابلیت دستگاه به این صورت است که سرعت ورودی و خروجی را می توان ثبت کرد. برخورد در سرعت 120 m/s انجام شد. در شکل 11 دستگاه تفنگ گازی نشان داده شده است.

رزین و 75 گرم سخت کننده استفاده شد. الیاف با سرعت نیم دور بر ثانیه به دور شیارها پیچیده شدند و مدت زمان پیچش نزدیک به 1 ساعت به طول انجامید. پس از اتمام رشته پیچی، نمونه رشته پیچی شده در دمای محیط به مدت 8 ساعت پخت شد و برای پخت کامل در کوره در دمای 60 درجه سانتیگراد به مدت 4 ساعت قرار داده شد. پس از آماده شدن و پخته شدن نمونه، برای جداسازی نمونه از قالب، قطعه های مختلف قالب از روی شفت باز شدند و از همدیگر جدا گردیدند و نمونه مشبک از قالب خارج شد. به دلیل اینکه ریبها با هم تقاطع داشتند و این تقاطعها تقریباً یک خود قفلی مکانیکی ایجاد کردند، جدا کردن نمونه از قالب با کمی مشکل مواجه شد که به همین علت از پیچیدن پوسته به دور این قالب خودداری شد و برای ساخت نمونه های استوانه مشبک با پوسته از قالب سیلیکونی استفاده شد.

در استفاده از قالب سیلیکونی و رشته پیچی، تمام مراحل که برای ساخت نمونه از قالب تفلونی به کار برده شد برای قالب سیلیکونی نیز انجام شد. در اینجا پس از رشته پیچی الیاف در درون شیارها و تشکیل ریبها، برای ایجاد پوسته استوانه پارچه دو جهته به صورت دستی به دور قالب بر روی ریبها پیچیده شد، برای اینکه پوسته 4 لایه ایجاد شود، پارچه 4 دور به دور قالب پیچیده شد. پس از آن بر روی کل قالب، پلاستیکی قرار گرفت که با حرارت پلاستیک جمع شد و رزین اضافی خارج گردید. بعد از آماده شدن نمونه، استوانه از وسط برش داده شد تا دو نیم استوانه مشبک به دست آید. در شکل 8 قرارگیری قالب بر روی دستگاه رشته پیچی، در شکل 9 پیچیدن پوسته به دور ریبها و در شکل 10 نمونه مشبک ساخته شده با الگوی مثلثی نشان داده شده است.



Fig. 8 Filament winding machines

شکل 8 دستگاه رشته پیچی



Fig. 9 Lay up of skin around ribs

شکل 9 پیچیدن پوسته به دور ریبها



Fig. 13 Back view of lattice sample were tested

شکل 13 نمای پشت نمونه مشبک آزمایش شده



Fig. 14 Front view of lattice sample were tested

شکل 14 نمای جلو نمونه مشبک آزمایش شده

5- مدلسازی و تحلیل المان محدود

برای مدلسازی ریب‌ها از نرم افزار کتیا استفاده شده و سپس مدل وارد نرم افزار آباکوس گردیده و در آنجا پوسته بیرونی به ریب‌ها متصل شده است. برای مدلسازی ریب‌ها از المان حجمی جامد نوع C3D8R استفاده شده است. خصوصیات مکانیکی ریب در جدول 2 آورده شده است. الیاف در ریب‌ها به صورت تک جهته مدل شده‌اند که همان جهت و زاویه ریب‌ها را دارا می‌باشند، برای این کار برای هر شاخه ریب دستگاه مختصات محلی تعریف شده است. برای مدل کردن پرتابه از المان R3D4 استفاده شده است و یک نقطه مرجع به پرتابه اختصاص داده شده است که جرم 27 گرم به آن اعمال شده است. برای پوسته با توجه به نازکی آن از المان پوسته نوع S4R استفاده شده است. به دلیل هم‌پخت بودن ریب‌ها و پوسته در فرایند ساخت و یکپارچه شدن آن‌ها در نرم افزار برای تماس بین ریب و پوسته از قید tie استفاده شده است. همچنین برای تماس بین پرتابه با پوسته از قید تماسی surf-to-surf با فرمولاسیون روش تماسی جنبشی¹ استفاده شده است. تعداد لایه‌های پوسته



Fig.11 Gas gun

شکل 11 دستگاه تفنگ گازی



(b)



(a)

Fig. 12 (a) Fixture used in the test (b) projectile with hemispherical head

شکل 12 (a) فیکسچر استفاده شده در آزمایش - (b) پرتابه سر نیم کره‌ای

فیکسچرها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که لبه‌های نیم استوانه از بالا و پایین به صورت گیردار و دو لبه کناری به صورت پین مقید باشند (شکل 12- الف). برای آزمایش ضربه، از پرتابه استوانه‌ای آلومینیومی سر کره‌ای با قطر 22 میلی‌متر، طول 40 میلی‌متر و جرم 27 گرم استفاده شد (شکل 12- ب).

4- نتایج تجربی

در آزمایش، پرتابه با سرعت 120 متر بر ثانیه به مرکز سلول برخورد کرد و با سرعت 101 متر بر ثانیه از نمونه خارج شد. همانطور که در شکل 13 و 14 مشاهده می‌شود، به دلیل اینکه لایه‌ها به طور متقارن قرار گرفته‌اند و پارچه دوجته 0 و 90 ناحیه آسیب به صورت متقارن ایجاد شده است و ترک‌ها به صورت صلیبی شکل می‌باشند که در همان جهت 0 و 90 رشد کرده‌اند همچنین ریب‌ها از رشد ترک از یک سلول به سلول مجاور جلوگیری کرده‌اند. با استفاده از ریب‌های تک جهته کامپوزیتی، تمام الیاف به صورت متحد در راستای ریب قرار گرفته است. در این حالت می‌توان به بیشترین میزان از درصد حجمی الیاف رسید. همچنین هنگامی که تمام ریب‌ها از الیاف تک جهته ساخته می‌شوند، هیچ عدم تطابقی در خواص مواد بروز نمی‌کند به همین دلیل است که در ریب‌ها تورق الیاف دیده نشده است. در نمونه جدایش پوسته از ریب مشاهده نشد. به هر حال با توجه به روش رشته پیچی که در آن پارچه بلافاصله بعد از پیش‌الیاف بر روی ریب‌ها پیچیده شده است و به صورت هم‌زمان پخت انجام شده است، سازه به طور یکپارچه ساخته شده است و جدایی پوسته از ریب‌ها به این آسانی اتفاق نمی‌افتد.

¹ Kinematic contact method

جدول 3 خصوصیات مواد پوسته [13],[14]

چقرمگی شکست (N/mm)	استحکام (GPa)	خصوصیات الاستیک
$G_f^t = 15$	$X_t = 550$	$E_1 = 27 \text{GPa}$ (مدول الاستیک در راستای الیاف)
$G_f^c = 10$	$X_c = 110$	$E_2 = 27 \text{GPa}$ (مدول الاستیک عمود بر الیاف)
$G_m^t = 0.5$	$Y_t = 65$	$G_{12} = G_{13} = 2.5 \text{GPa}$ (مدول برشی)
$G_m^c = 1$	$Y_c = 85$	$G_{23} = 2 \text{GPa}$ (مدول برشی)
	$Z_t = 50$	$\nu_{12} = 0.272$ (ضریب پواسون)
	$Z_c = 70$	$\rho = 1.6 \text{Kg/m}^3$ (چگالی)

X_t استحکام نهایی کششی طولی، X_c استحکام نهایی فشاری طولی، Y_t استحکام نهایی کششی عرضی، Y_c استحکام نهایی فشاری عرضی، Z_t استحکام برشی طولی، Z_c استحکام برشی عرضی، G_f^t چقرمگی شکست الیاف در حالت کشش، G_f^c چقرمگی شکست الیاف در حالت فشار، G_m^t چقرمگی شکست زمینه در حالت کشش و G_m^c چقرمگی شکست زمینه در حالت فشار است. برای بررسی همگرایی مش به ازای اندازه المانها مختلف سرعت خروجی پرتابه به عنوان شاخص همگرایی در نظر گرفته شد که در نتایج آن در جدول 4 آورده شده است.

با توجه به اندازه مش و سرعت خروجی، در اندازه المان 4 و 3 مقادیر سرعت به هم نزدیک هستند یعنی سرعت همگرا شده است که برای این که زمان حل بالا نرود از اندازه المان 4 برای مش بندی استفاده شده است. نتایج حل عددی که سطح آسیب و سرعت خروجی پرتابه از تحلیل به دست آمده، در شکل 16 نشان داده شده است. مطابق شکل 16 سطح آسیب به صورت صلیبی بوده است و المانهای آسیب دیده و حذف شده تا راس مثلث و ضلع-های مجاور آن پیشرفت کرده است و شباهت زیادی به سطح آسیب ناشی از آزمون تجربی دارد. البته در نمونه تجربی ترک در راستای افقی رشد بیش-تری داشته و از ریبها کمی عبور کرده است که آن هم می تواند به دلیل یکپارچگی کم تر ریب و پوسته در آن ناحیه بوده باشد که باعث شده ترک از ریب عبور کند. همچنین سرعت خروجی در حل عددی برابر 106.8 متر بر ثانیه است که اختلاف کمی با مقدار تجربی دارد و میزان خطا به اندازه 5 درصد می باشد. در نتیجه تحلیل عددی با آزمون تجربی انجام شده صحت سنجی گردید.

6- بررسی پارامتری حل المان محدود

بعد از صحت سنجی مدل عددی، بعضی از پارامترهای ضربه به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته اند. لازم به ذکر است که سازه مشبک، الگوی مثلثی داشته و در تمام بررسی های پارامتریک سرعت ورودی پرتابه 120 متر بر ثانیه می باشد.

6-1 بررسی نوع پرتابه

در اینجا به بررسی اثر هندسه پرتابه در میزان سطح آسیب، جذب انرژی و سرعت خروجی در الگو مثلثی پرداخته شده است. پرتابه ها به صورت سر

با توجه به نمونه ساخته شده 4 لایه با ضخامت 0.45 میلی متر در نظر گرفته شده است و خصوصیات مکانیکی آن به صورت تک لایه و مطابق جدول 3 اعمال شده است. در جدول 2 و 3 راستای 1 در راستای الیاف، راستای 2 در راستای عمود بر الیاف و راستای 3 عمود بر الیاف و خارج صفحه می باشند. همچنین برای پوسته مدل آسیب تعریف شده است که از معیار شروع آسیب و پیشرفت آسیب هاشین استفاده شده است. پیشرفت آسیب بر حسب انرژی شکست مربوط به چهار حالت آسیب یعنی کشش الیاف، فشار الیاف، کشش زمینه و فشار زمینه است که در جدول 3 مقادیر خواص آن آورده شده است. پیشرفت آسیب به این معناست که زمانی که ماده به استحکام نهایی خود رسید هنوز می تواند مقاومت از خود نشان دهد و کاهش خواص بعد از شروع آسیب به صورت تدریجی است تا اینکه در چهار حالت ذکر شده در بالا ماده به واماندگی برسد. برای اعمال شرایط مرزی با توجه به فیکسچر طراحی شده، پوسته قسمت بندی شد، در قسمتی که بست کمر بندی بر سازه بسته شده است از شرایط مرزی ENCASTRE استفاده شد که تمام درجات آزادی آن گرفته شده است. برای لبه های کناری پوسته درجه آزادی جانبی آن گرفته شده است. در شکل 15 محل اعمال شرایط مرزی و همچنین محل برخورد پرتابه به استوانه نشان داده شده است. برای بارگذاری، به نقطه مرجع اختصاص داده شده به پرتابه سرعت اولیه اعمال شده است.

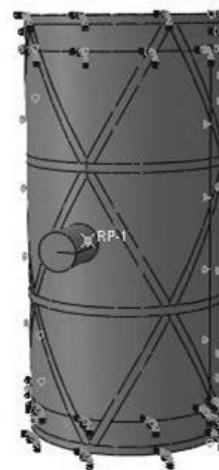


Fig.15 Boundary condition

شکل 15 شرایط مرزی

جدول 2 خصوصیات مواد ریبها [13]

مقادیر	خصوصیات الاستیک
50GPa	E_1 (مدول الاستیک در راستای الیاف)
8GPa	$E_2 = E_3$ (مدول الاستیک در راستای عمود بر الیاف)
0.428	ν_{23} (ضریب پواسون)
0.254	$\nu_{13} = \nu_{12}$ (ضریب پواسون)
2GPa	G_{23} (مدول برشی)
3GPa	$G_{13} = G_{12}$ (مدول برشی)
2Kg/m^3	ρ (چگالی)

جدول 4 بررسی همگرایی مش

Table 4 Mesh study

اندازه المان مش بندی (mm)	سرعت خروجی (m/s)
6	101
5	105
4	106.8
3	107

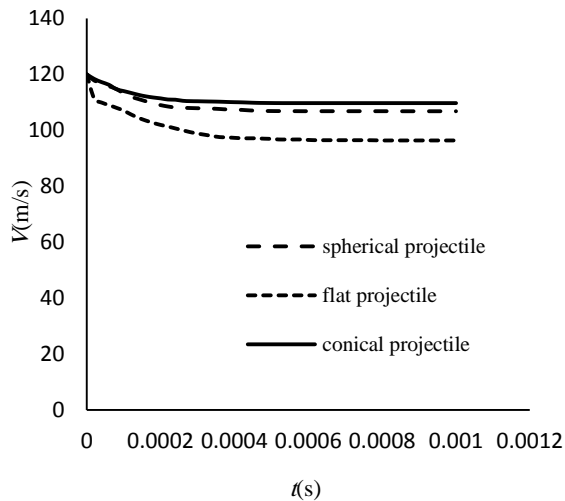


Fig.17 Velocity changes of projectile

شکل 17 تغییرات سرعت پرتابه

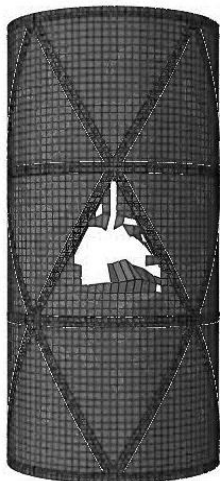


Fig. 18 Damage area of lattice sample with triangular cell under conical head projectile

شکل 18 سطح آسیب در نمونه مشبک با سلول مثلثی تحت پرتابه سر مخروطی

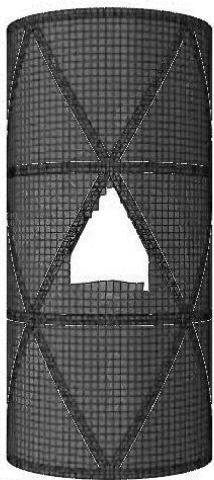


Fig. 19 Damage area of lattice sample with triangular cell under flat head projectile

شکل 19 سطح آسیب در نمونه مشبک با سلول مثلثی تحت پرتابه سر تخت

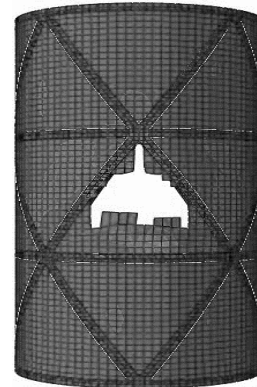


Fig. 16 Damage area of lattice sample with triangular cell under hemispherical head projectile

شکل 16 سطح آسیب در نمونه مشبک با سلول مثلثی تحت پرتابه سر نیم کروی مخروطی، سر نیمکروی و سر تخت می باشند. طول پرتابه ها 4 سانتی متر و جرم آنها برابر 27 گرم می باشد. تعداد لایه های پوسته 4 و زاویه لایه چینی 0 و 90 است. محل برخورد تمام پرتابه ها در مرکز سلول مثلثی است. در جدول 5 نتایج آورده شده است. همچنین در شکل 17 تغییرات سرعت پرتابه بر حسب زمان نشان داده شده است.

طبق نتایج جدول 5 و شکل 17 پرتابه سر تخت نسبت به دو پرتابه دیگر کاهش سرعت بیش تری دارد و سرعت خروجی آن کمتر است و جذب انرژی سازه در برخورد با این پرتابه نسبت به دو پرتابه دیگر بیشتر است. روند تغییرات سرعت برای پرتابه سر نیم کروی و سر مخروطی نزدیک به هم و آن به این دلیل است که شکل نوک پرتابه در این دو نوع شبیه به هم هستند ولی برعکس در پرتابه سر تخت به دلیل این که نسبت به دو نوع دیگر حالت نوک تیزی ندارد در برخورد با سطح پوسته فشاری بیش تری وارد می کند که در نتیجه سرعت آن بیش تر کاهش می یابد و منحنی تغییرات سرعت آن از دو نوع دیگر فاصله دارد. سطح آسیب الگوی مثلثی تحت برخورد با پرتابه سر مخروطی و سر تخت به ترتیب در شکل های 18 و 19 آورده شده اند.

جدول 5 بررسی نوع پرتابه

Table 5 Investigation of shape of projectile

نوع پرتابه	سرعت خروجی (m/s)	انرژی جذب شده (J)
سر مخروطی	109.7	31.94
سر نیم کروی	106.8	40.41
سر تخت	96.3	69.2

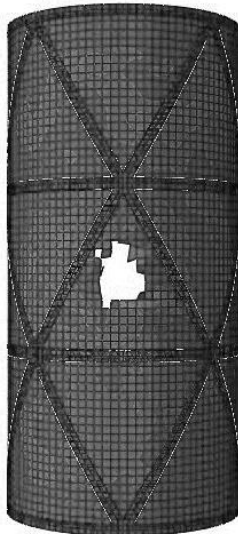


Fig. 20 Damage area corresponding to 30 degrees angle of layup

شکل 20 سطح آسیب مربوط به لایه چینی 30 درجه

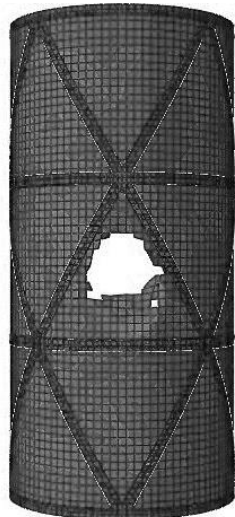


Fig. 21 Damage area corresponding to 45 degrees angle of layup

شکل 21 سطح آسیب مربوط به لایه چینی 45 درجه

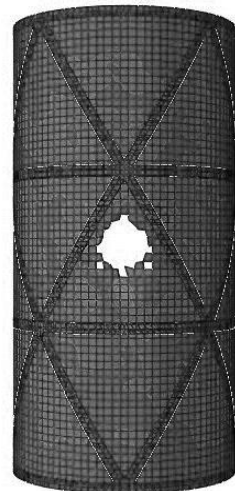


Fig. 22 Damage area corresponding to 60 degrees angle of layup

شکل 22 سطح آسیب مربوط به لایه چینی 60 درجه

مشاهده می‌شود که سطح آسیب پرتابه سر تخت بیشتر از پرتابه سرنیم کروی می‌باشد و انرژی بیشتری از پرتابه سر تخت صرف آسیب سازه می‌شود.

6-2 بررسی زاویه لایه چینی

در این بخش تعداد لایه پوسته 4 تا در نظر گرفته شده است و نوع پرتابه سرمخروطی می‌باشد. ترتیب قرار گیری پارچه دو جهته در چند زاویه مختلف و اثر آن در سرعت خروجی، جذب انرژی و سطح آسیب بررسی شده است. در جدول 5 نتایج مربوطه آورده شده است.

زاویه لایه چینی نسبت به بردار مماس بر استوانه می‌باشد. طبق نتایج با افزایش زاویه چینش تا محدوده تقریباً 45 درجه سرعت خروجی پرتابه کاهش می‌یابد و در نتیجه جذب انرژی افزایش می‌یابد بعد از زاویه 45 سرعت خروجی پرتابه افزایش یافته است و در نتیجه میزان جذب انرژی کاهش یافته است. از آنجایی که مقادیر زاویه‌ها به طور گسسته داده شده‌اند فقط می‌توان بازه‌ای از زاویه را به عنوان زاویه مناسب انتخاب کرد. زاویه 45 درجه را می‌توان به عنوان زاویه مناسب انتخاب کرد که نسبت به بقیه زاویه‌ها میزان جذب انرژی بیشتری دارد. همچنین سطح آسیب پوسته با تغییر لایه چینی شکل‌های مختلفی به خود می‌گیرد که در شکل‌های 20 تا 23 نشان شده است.

مطابق شکل‌های 20 تا 23 در محدوده زاویه 45 درجه نسبت به بقیه زاویه‌ها سطح آسیب وارده، مساحت بیشتری دارد و باعث شده است که انرژی پرتابه بیشتر جذب شود و سرعت خروجی نیز کاهش یابد. به دلیل این‌که پارچه دو جهته است و مدول یانگ در هر دو راستای الیاف با هم برابر است در زاویه لایه چینی مثبت و منفی 45 درجه، هر لایه مانند هم بر روی مطابق شکل‌های 20 تا 23 در محدوده زاویه 45 درجه نسبت به بقیه زاویه‌ها سطح آسیب وارده، مساحت بیشتری دارد و باعث شده است که انرژی پرتابه بیشتر جذب شود و سرعت خروجی نیز کاهش یابد. به دلیل این‌که پارچه دو جهته است و مدول یانگ در هر دو راستای الیاف با هم برابر است در زاویه لایه چینی مثبت و منفی 45 درجه، هر لایه مانند هم بر روی هم قرار می‌گیرند و باعث می‌شود که پوسته مقاومت بیشتری داشته باشد و سطح آسیب بیشتر شود. همچنین در این زاویه سطح آسیب تا نزدیکی ریب‌های مارپیچی می‌رود. در زاویه‌های کم‌تر از 45 درجه هر چه زاویه‌ها به راستای استوانه نزدیک‌تر می‌شوند، آسیب کم‌تری می‌بینند و سرعت خروجی پرتابه بیشتر می‌شود.

7- جمع بندی و نتیجه گیری

با توجه به قالب‌هایی که از دو جنس متفاوت ساخته شده‌اند و تجربه حاصل از ساخت قالب و نمونه در این پژوهش نتیجه گیری می‌شود که برای ساخت قالب استوانه‌ای مشبک، قالب باید انعطاف پذیری خوبی داشته باشد تا بتوان نمونه مشبک را از داخل قالب به راحتی جدا کرد، جنس سیلیکون این ویژگی را دارد که برای ساخت قالب سیلیکونی برای استوانه مشبک نیاز به شابلونی

جدول 6 بررسی زاویه لایه چینی

Table 6 Investigation of layup orientation

زاویه لایه چینی (درجه)	سرعت خروجی پرتابه (m/s)	انرژی جذب شده (J)
0	109.7	31.94
30-30	105	45.56
45-45	97.7	65.54
60-60	106.3	41.85
75-75	110.6	29.96

- [4] Tsai, W. Lin, K., "Manufacturing composite grids for shell of revolution," Proc. 4th International SAMPE symposium and exhibition, Long Beach, California, 1999.
- [5] Kim, D., "Fabrication and testing on composite isogrid stiffened cylinder," Composite Structures, Vol. 45, PP. 1-6, 1999.
- [6] Gibson, R. E., Newaz, G. M., Gan, C., "Analytical/Experimental Investigation of Energy Absorption in Grid-Stiffened Composite Structures Under Transverse Loading," Experimental Mechanics, Vol. 44, No. 2, pp 185-194, 2004.
- [7] Jadhav, P., Mantena, P. R., Gibson, R. F., "Energy absorption and damage evaluation of grid stiffened composite panels under transverse loading," Composites: Part B, Vol. 37, pp. 191-199, 2005.
- [8] Fan, H. L., Yang, W., Chao, M., "Microwave absorbing composite lattice grids," Composite Science and Technology, Vol. 67, pp. 3472-3479, 2007.
- [9] Pernas-Sánchez, J., Artero-Guerrero, J. A., Zahr-Viñuela, J., Varas, D., López-Puente, J., "Numerical analysis of high velocity impacts on unidirectional laminates," Composite Structure, Vol. 107, pp. 629-634, Jan. 2014.
- [10] Donadon, M. V., Iannucci, L., Falzon, B. G., Hodgkinson, J. M., Almeida, S. F. M., "A progressive failure model for composite laminates subjected to low velocity impact damage," Computers and Structures, Vol. 86, pp. 1235-1252, 2008.
- [11] Wang, S. X., Wu, L. Z., "Low-velocity impact and residual tensile strength analysis to carbon fiber composite laminates," Materials and Design, Vol. 31, pp. 118-125, 2010.
- [12] Hedayatian, M., Liaghat, G. H., Rahimi, G. H., Po, M. S., I. Khoshroour, M., "Experimental study on dynamic response of grid cylindrical composite structures under high velocity impact," Journal. Modares Mechanical. Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 41-46. (In Persian).
- [13] Gibson, R. F. R., "Principles of composite material mechanics," CRC press, 2012.
- [14] Gershon, B., Marom, G., "Fracture toughness and mechanical properties of glass fibre-epoxy composites," Material Science, Vol. 10, pp. 1549-1556, 1975.

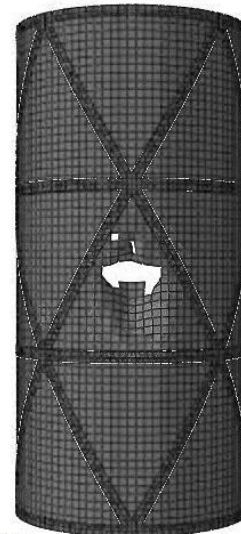


Fig. 23 Damage area corresponding to 75 degrees angle of layup

شکل 23 سطح آسیب مربوط به لایه چینی 75 درجه

هست که بتواند سیلیکون را به شکل نمونه مشبک درآورد. برای ساخت این شابلون دو راه وجود دارد. یکی این که این شابلون می‌تواند خود نمونه مشبک ساخته شده با استفاده از روش دیگری باشد که در آن روش از یک قالب ارزان و یک بار مصرف استفاده می‌شود. به عنوان مثال به جای استفاده از تفلون در مواد دیگری مانند گچ یا فوم استفاده شود.

سطح آسیب، سرعت خروجی پرتابه و جذب انرژی نیم استوانه مشبک کامپوزیتی با الگوی مثلثی به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه نیم استوانه مشبک توسط دستگاه تفنگ گازی تحت برخورد پرتابه سر نیم کروی شکل قرار گرفت. همچنین آزمایش در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شد و مدل عددی با خطای 5 درصد با آزمایش صحت سنجی شد. نتایج تجربی به این صورت بود که به دلیل اینکه لایه‌ها به طور متقارن قرار گرفته‌اند و پارچه دو جهته 0 و 90 می‌باشد ناحیه آسیب به صورت متقارن ایجاد شده است و ترک‌ها به صورت صلیبی شکل می‌باشند که در همان جهت 0 و 90 رشد کرده‌اند. همچنین ریب‌ها از رشد ترک از یک سلول به سلول مجاور جلوگیری کرده‌اند. در الگوی مثلثی افزایش زاویه لایه چینی تا محدوده 45 درجه باعث کاهش سرعت خروجی پرتابه و بعد از زاویه 45 درجه دوباره باعث افزایش سرعت خروجی پرتابه می‌شود که در زاویه محدوده زاویه 45 درجه کمترین میزان سرعت خروجی پرتابه و بیشترین میزان جذب انرژی را دارا می‌باشد. پرتابه سرتخت نسبت به دو پرتابه سرمخروطی و سر کروی به دلیل اینکه سر پرتابه سطح تماس بیشتری با پوسته دارد، بیشترین آسیب را به سازه وارد می‌کند و در نتیجه سرعت خروجی پرتابه کمتر و جذب انرژی سازه بیشتر است.

8- مراجع

- [1] Vasiliev, V. V., Barynin, V. A., Razin, A. F., "Anisogrid composite lattice structures-Development and aerospace application," Composite Structures, Vol. 94, pp. 11717-1127, 2012
- [2] Meink, E., Wegner, M., Ganley, M., Huybrechts, M., "Manufacturing theory for advanced grid stiffened structures," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 33, PP. 155-161, 2002
- [3] Mingfa, R., Haoran, C., Qizhong, H., "Resin Flow of an Advanced Grid-Stiffened Composite," Springer, Composite Material, vol. 20, pp. 303-314, 2012.