



بررسی تجربی پاسخ به ضربه کامپوزیت‌های مشبک استوانه‌ای تحت برخورد بالستیک

محمد هدایتیان^۱، غلامحسین لیاقت^{۲*}، غلامحسین رحیمی^۳، محمدحسین پل^۴، مهدی خوش‌سرور^۵

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۴- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

۵- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، ۱۴۱۰-۱۴۱۵، ghlia530@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۵ آبان ۱۳۹۲

پذیرش: ۲۶ آذر ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۳ فروردین ۱۳۹۳

کلید واژگان:

ضربه بالستیک

کامپوزیت مشبک

سطح شکست

تقویت کننده

در این مقاله رفتار بالستیک کامپوزیت‌های مشبک استوانه‌ای که امروزه به طور گسترده‌ای در سازه‌های مهندسی استفاده می‌شوند، به روش تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق، سازه به شیوه‌ی پیچش الیاف به روش جابجاری دستی ساخته شده است. به منظور تست ضربه‌ای سازه از تفنگ‌گازی بهره گرفته شد و در هر آزمون سرعت‌های ورودی و خروجی پرتابه ثبت شده است. نتایج نشان می‌دهند که وجود ریب‌های مجزا، مانع نفوذ آسیب از یک سلول به سلول مجاور می‌شود و 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 ریب‌ها به دلیل افزایش موضعی سفتی سازه سرعت حد بالستیک افزایش می‌یابد، درحالی‌که در سرعت بالاتر از حد بالستیک به دلیل اینکه ریب‌ها منجر به کاهش سطح شکست و کاهش تغییر شکل‌های کلی و موضعی سازه می‌شوند، پرتابه پس از برخورد، با سرعت بیشتری از نمونه‌های مشبک نسبت به پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی ساده خارج شده است. جدایش پوسته‌ی خارجی و تقویت کننده‌ها، جدایش تقویت کننده‌ها از پوسته، سرعت خروجی پرتابه، سطح شکست و اثر انحنای پوسته در دو سرعت (سرعت نزدیک به حد بالستیک و سرعت بالاتر از حد بالستیک)، به عنوان نتایج تجربی ارائه و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند.

Experimental study on dynamic response of grid cylindrical composite structures under high velocity impact

Mohammad Hedayatian¹, GHolam Hosein Liaghat^{2*}, GHolam Hosein Rahimi³, Mohammad Hosein Pol⁴, Mehdi Khoshsorour⁵

1-MSc. Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

2-Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

3-Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

4-Assist. Prof., Mech. Eng., Tafresh Univ., Tafresh, Iran.

5-MSc. Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

* P.O.B. 14115-141 Tehran, Iran, ghlia530@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 16 November 2013

Accepted 17 December 2013

Available Online 12 April 2014

Keywords:

Ballistic impact

Grid composite

Fracture area

Ribs

ABSTRACT

In this paper, the experimental behavior of grid cylindrical composite structures which are used widely in engineering structures under ballistic impact is investigated. In the present study, the grid cylindrical composite samples were manufactured by the filament winding process with fiber placement procedure and perforated by projectile using the ballistic gas gun. Input and output velocities of projectile were recorded. The results show that presence of discrete ribs prevents spread damage from one cell to its adjacent cells and structure behaves differently against projectile with velocity near ballistic limit velocity and higher velocities. With approach to the ribs location ballistic limit has been increased. However due to reduce fracture area, overall and local deformations after impact in velocity which is higher than ballistic limit velocity, projectile has been come out from grid samples with higher velocity than simple composite shells. In this paper, delamination in outer composite shell and ribs, debonding between shell and ribs, residual velocity of projectile, fracture area of the grid specimens and the effects of curvature in two deferent velocities were reported and commented upon as results.

۱- مقدمه

محدود بودن آسیب، بخشی از ویژگی‌های سازه‌های مشبک کامپوزیتی هستند که منجر به افزایش بسیار زیاد استفاده از این سازه‌ها در هواپیماها، فضاپیماها، صنایع کشتی‌سازی، هسته‌ای و موشکی شده است. در حقیقت این

استحکام ویژه بالا، سبکی و مقاومت به خوردگی، سادگی نظارت، بازرسی و تعمیرات به دلیل باز بودن ساختار سازه و قابل تعمیر بودن آن و همچنین

Please cite this article using:

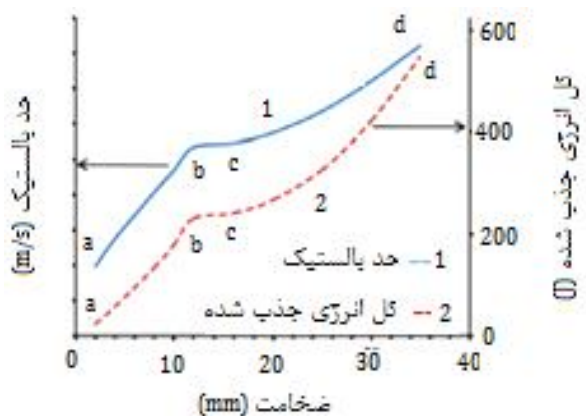
M. Hedayatian, GH.H. Liaghat, GH.H. Rahimi3, M.H. Pol, M. Khoshsorour, Experimental study on dynamic response of grid cylindrical composite structures under high velocity impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp.41-46, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

[۶]، رفتار کامپوزیت‌ها با استفاده از روش‌های تحلیلی و تجربی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در ابتدا با افزایش ضخامت هدف، حد بالستیک افزایش می‌یابد، سپس در یک محدوده خاص، افزایش ضخامت تأثیری در حد بالستیک ندارد و در ادامه دوباره با افزایش ضخامت، حد بالستیک شروع به افزایش می‌کند (شکل ۱).

سانچز و همکارانش [۷]، به توسعه روش عددی که قدرت پیش‌بینی آسیب ناشی از برخورد پرتابه با سرعت بالا روی اهداف کامپوزیتی کربن/اپوکسی را داشت، پرداختند. در این شبیه‌سازی در حالات نفوذ کامل، سرعت خروجی و سطح شکست محاسبه و نتایج با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شد. سازه‌های شبکه‌ای در دهه‌های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ برای اولین بار در اسکلت و بال‌های هواپیماها توسط طراح انگلیسی، بارنز ویلیامز، استفاده شدند. این طراحی متعاقباً در هواپیمای بمبافکن ویلینگتون مورد بهره‌برداری عملی واقع شد. در این سازه‌ها شبکه‌بندی از مواد فلزی بود و نتایج، حاکی از مقاومت بالا در تحمل آسیب‌دیدگی بود [۸].

فرولونی [۹]، ناپایداری سازه‌های توخالی تقویت‌شده تحت بار هیدرواستاتیک خارجی را برای کاربردهای صنایع فضایی، به روش المان محدود و تجربی مورد مطالعه قرار داد. در این تحقیق سازه‌هایی از جنس الیاف کربن در اندازه‌ها و با آرایش‌های مختلف ساخته‌شده و مورد آزمایش قرار گرفت. برای به دست آوردن روندی برای طراحی تمام مراحل، آزمایش‌ها به روش المان محدود شبیه‌سازی شد. به این ترتیب تحلیلی برای ناپایداری سازه تحت تأثیر هندسه المان‌ها بر مقاومت کمانشی سازه ارائه شد و سه مود کمانشی مشخص که بستگی مستقیم به ارتفاع سازه داشت، تشخیص داده شد. نتایج نمونه المان محدود آن‌ها با نتایج تجربی توافق خوبی نشان می‌داد. واسیلو [۱۰]، طراحی، ساخت و تحلیل سازه‌های مشبک کامپوزیتی مورد کاربرد در صنایع هوافضا را مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که راندمان وزنی این سازه‌ها به مراتب بیشتر از سازه‌های مشابه با تقویت‌کننده‌های غیر کامپوزیتی است. یزدانی و رحیمی [۱۱]، به روش تجربی اثرات تغییرات شکل شبکه و تعداد ریب‌های تقویت‌کننده ماریچ، بر باربری پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده تمام کامپوزیتی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که برای استفاده بهینه از پوسته‌های تقویت‌شده نیاز به حداقل مقداری از چگالی شبکه است و در بارگذاری محوری، پوسته‌های تقویت‌شده با شبکه‌های لوزی شکل بهترین عملکرد را دارند. در پژوهشی دیگر یزدانی و رحیمی [۱۲]، به بررسی اثرات تغییر شکل شبکه در نمونه‌هایی از پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده که در آن‌ها ضخامت پوسته بسیار کم بود پرداختند.



شکل ۱ سرعت خروجی پرتابه و ضخامت هدف کامپوزیتی [۶]

سازه‌ها قابلیت‌های سازه‌های کامپوزیتی ساده و همچنین سازه‌های تقویت‌کننده را باهم دارند. گسیختگی و کمانش الیاف، ترک‌خوردگی و شکست زمینه، موده‌های تخریب برشی، جدایش لایه‌ها، جدایش تقویت‌کننده‌ها از پوسته و ترکیبی از حالات فوق، نمونه‌های مختلف شکست است که برای این نوع از سازه‌ها رخ می‌دهد. این سازه‌ها با توجه به کاربردهایشان، در طول عملکردشان بارگذاری‌های مختلفی از جمله برخورد اشیاء خارجی را تجربه می‌کنند، به همین دلیل بررسی رفتار آن‌ها تحت برخورد با اجسام در سرعت‌های مختلف حائز اهمیت است.

رفتار دینامیک لایه‌های کامپوزیتی به دلیل وقوع همزمان پدیده‌های مختلف در طول شکست لایه‌ها، هنگامی که تحت بارگذاری ضربه‌ای قرار می‌گیرند بسیار پیچیده است. گسیختگی الیاف، جدایش لایه‌ها، شکست و ترک‌خوردگی ماتریس، تغییر شکل‌های پلاستیک در اثر برخورد، جابجایی‌های بزرگ و سوراخ شدگی تنها برخی از آسیب‌هایی هستند که وقتی یک سازه کامپوزیتی تحت برخورد با یک شیء خارجی قرار می‌گیرد باید در نظر گرفته شوند. در پدیده برخورد، عواملی همچون ترتیب قرارگیری لایه‌ها، شکل پرتابه، زاویه‌ی برخورد و نوع برخورد هم از جمله عواملی هستند که الگوی آسیب را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در بین سازوکارهای شکست ذکرشده، به دلیل اینکه در این سازه‌ها عمدتاً پوسته نازک است، بخش عمده بار به وسیله تقویت‌کننده‌ها تحمل می‌شود لذا جدایش تقویت‌کننده‌ها از پوسته تبعات فاجعه‌باری خواهد داشت.

نتایج کارهای مورتن و کانتول [۱] نشان داد که در نمونه‌های نازک، آسیب اولیه در لایه‌های پایینی رخ می‌دهد، درحالی‌که در نمونه‌های ضخیم، آسیب اولیه به لایه‌های بالایی مربوط می‌شود. مقاومت‌های فشاری و کششی باقیمانده لایه‌های کامپوزیتی به وسیله سطح آسیب و مکانیزم برخورد تحت تأثیر قرار می‌گیرند. شکل‌های متفاوت پرتابه باعث ایجاد سطح و مکانیزم‌های مختلف آسیب می‌شود، بنابراین شکل‌های مختلف پرتابه منجر به تغییرات گوناگونی در خواص باقیمانده مواد می‌شود. شیر و پن [۲]، ضربه با سرعت پایین را روی لایه‌های شیشه / پلی‌استر با استفاده از پرتابه‌های نیم کرومی بررسی کردند. آن‌ها با بررسی سطح شکست توسط میکروسکوپ متالوگرافی نتیجه گرفتند که نمونه‌ها با توجه به الگو و میزان جدایش تحت تأثیر قرار می‌گیرند به گونه‌ای که در لایه‌های بالایی در اثر تنش‌های زیاد و فرورفتگی، گسیختگی الیاف رخ می‌دهد، درحالی‌که آسیب در لایه‌های پایین عمدتاً به تنش‌های خمشی مرتبط می‌شود.

پل و همکارانش [۳]، به بررسی تجربی تأثیر نانو ذرات رسی بر روی خواص بالستیک مواد مرکب شیشه/اپوکسی پرداختند. در این بررسی که در دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفت، از پرتابه سر تخت استفاده شد و علاوه بر میزان جذب انرژی، سطح خرابی نمونه‌ها نیز اندازه‌گیری و بررسی شد.

شیخ و همکارانش [۴]، رفتار پنل‌های کامپوزیتی تک لایه و چند لایه‌ای که تحت برخورد بالستیک قرار می‌گیرند را به روش‌های تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. کاراکوزا و همکارانش [۵]، به طور تحلیلی و تجربی به تعیین برخی از مشخصات صفحات کامپوزیتی شیشه/اپوکسی بعد از برخورد پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد در مقادیر یکسان انرژی برخورد، سطح جدایش با افزایش جرم پرتابه تا یک مقدار حدی (در این بررسی ۱۵ کیلوگرم) افزایش می‌یابد، سپس با افزایش بیشتر جرم این سطح آسیب کاهش می‌یابد. دلیل آن را می‌توان در گسترده‌ی آسیب ناشی از گسیختگی الیاف و ترک‌خوردگی زمینه در جرم‌های بیشتر تفسیر کرد. نایر و همکارانش



شکل ۲ دستگاه پیچش الیاف

نتایج نشان داد که پوسته تقویت‌نشده در مقایسه با نمونه‌هایی که مقدار چگالی تقویت‌کننده‌ها در آن‌ها کم بود، عملکرد بهتری نسبت به وزن از خود بروز می‌دهند.

موضوع اصلی این تحقیق بررسی پاسخ به ضربه کامپوزیت‌های مشبک استوانه‌ای به روش تجربی در برخوردهای بالستیک با پرتابه سر تخت است. علاوه بر سرعت خروجی پرتابه، سطح خرابی نیز اندازه‌گیری و اثر انحنای بررسی شد.

۲- ساخت قطعات

در فرآیند ساخت مواد کامپوزیتی، اگر هدف استفاده از الیاف بلند باشد، بهترین روش ساخت، روش پیچش الیاف است. اجرای این روش به ۳ شیوه امکان‌پذیر است:

- ۱- پیچش الیاف به صورت نیمه‌ماشینی.
 - ۲- پیچش الیاف ماشینی.
 - ۳- پیچش الیاف به روش جاگذاری دستی^۱.
- در این تحقیق نمونه‌ها به شیوه‌ی پیچش الیاف به روش جاگذاری دستی ساخته شدند. شکل ۲ دستگاه پیچش الیاف که در ساخت نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است را نشان می‌دهد.

رزین مورد استفاده در ساختار نمونه‌ها از نوع اپوکسی بوده که از ترکیب پلیمر اولیه CY219 و سخت‌کننده‌ی HY5161^۲ تهیه‌شده از شرکت هانسن، ساخته شد. نسبت وزنی ترکیب این دو به ترتیب ۲ به ۱ است. الیاف مورد استفاده نیز E-Glass است که به دلیل رادار گریز بودن عموماً در ساخت تجهیزات نظامی استفاده می‌شود، است. الیاف‌ها به گونه‌ای از روی بوبین‌ها به روی مندرل کشیده می‌شود که کشش اولیه ۱۸gf.f در آن‌ها ایجاد شود. در کل پروسه تولید عمل رزین‌زنی به طور دستی انجام گرفت و جهت جلوگیری از انباشته شدن رزین در یک منطقه و یکنواخت شدن رزین توزیع شده بر روی پوسته از استوانه‌ی هرزگردی در بالای دستگاه استفاده شد.

با توجه به عدم وجود مطالعه قبلی در زمینه ضربه روی کامپوزیت‌های مشبک و نظر به پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق، زاویه رشته‌پیچی الیاف $\pm 76^\circ$ درجه، نزدیک به زاویه‌ای که در تحقیق صورت گرفته توسط یزدانی و همکاران [۱۳] گزارش شده، انتخاب گردید. در ضمن با توجه به مندرل‌های موجود در آزمایشگاه، محدودیت‌های ساخت و همچنین به دلیل اینکه هدف مطالعه اثر تقویت‌کننده‌ها در سازه است، با بررسی یک نوع خاص از چینش تقویت‌کننده‌ها می‌توان به نتایج کلی در تأثیر تقویت‌کننده‌ها در

توزیع تنش در سازه‌های مشبک رسید. از طرف دیگر یزدانی در مقاله‌ی خود بهترین و کارآمدترین سازه‌های تقویت شده برای بار محوری را سازه‌ی دارای تقویت‌کننده‌ی لوزی شکل به دلیل نسبت مقاومت به وزن بالاتر پیشنهاد می‌کند [۱۱]. همچنین از قالب‌های لوزی شکل که در آن‌ها زاویه قرارگیری تقویت‌کننده‌ها نسبت به محور استوانه 30° درجه است، استفاده شد. مندرل مورد استفاده دارای شیارهایی است که شکل آن‌ها بسته به طرح و آرایش تقویت‌کننده‌ها، متفاوت است. قطعات قالب به وسیله‌ی پیچ از داخل به استوانه بسته می‌شوند. جهت سهولت جداکردن قالب از نمونه پس از اتمام ساخت، قبل از نصب بر روی دستگاه از واکس مخصوصی برای چرب کردن سطح قالب استفاده می‌شود. Error! Reference source not found.

نمونه سالم جداشده از قالب را نمایش می‌دهد.

در فرآیند ساخت، ۱۷ نمونه ساخته شد. نمونه‌ها دارای طول میانگین ۳۶ سانتی‌متر، قطر 14 ± 0.2 سانتی‌متر و ضخامت پوسته‌ی ۲/۴ میلی‌متر هستند. تقویت‌کننده‌های نمونه‌ها نیز دارای مقطع مربعی با ضلع ۶ سانتی‌متر هستند (جدول ۱).

۳- آزمایش بالستیک

آزمایش بالستیک نمونه‌های ساخته‌شده در دانشگاه تربیت مدرس، به وسیله تفنگ گازی انجام گردید (شکل ۴).



شکل ۳ نمونه سالم جداشده از قالب

جدول ۱ مشخصات هندسی نمونه‌های ساخته‌شده

پوسته‌ی استوانه‌ای			
قطر خارجی	ضخامت پوسته	ارتفاع پوسته	تعداد دفعات رفت و برگشت
mm ۱۴۰	mm ۲/۴	mm ۳۶۰	۱۰۰
تقویت‌کننده‌ها			
مقطع تقویت‌کننده‌ها	ارتفاع تقویت‌کننده‌ها	تعداد دفعات رفت و برگشت	
mm ۶×۶	mm ۳۶۰	۸۰	



شکل ۴ دستگاه تفنگ گازی

1- Fiber placement
2- Hardener

در ابتدا مرکز هر سلول به عنوان محل برخورد پرتابه در نظر گرفته شد، در این حالت برای سازه‌ای که تحت برخورد در راستای تقارن سازه با سرعت ۱۳۹ متر بر ثانیه قرار می‌گرفت، سرعت خروجی پرتابه به طور میانگین ۱۰۶ متر بر ثانیه ثبت شد. این سرعت خروجی مشابه حالت پوسته کامپوزیتی ساده بود بنابراین برای این حالت حضور تقویت‌کننده‌ها به دلیل بزرگ بودن هر سلول و موضعی بودن اثرات بارگذاری بالستیک تأثیری در سرعت خروجی پرتابه ندارد.

جهت بررسی اثرات تقویت‌کننده‌ها، تغییر محل برخورد پرتابه مورد بررسی قرار گرفت. در نمونه‌هایی که تحت برخورد پرتابه در راستای تقارن سازه با سرعت میانگین ورودی ۱۴۰ متر بر ثانیه در فاصله‌ای نزدیک به محل تقاطع ریب‌ها قرار گرفتند (۵/۵ سانتیمتر)، به طور میانگین سرعت خروجی ۱۱۷ متر بر ثانیه ثبت شده است. در سازه‌های کامپوزیتی که تحت برخورد بالستیک قرار می‌گیرند، تغییر شکل‌های موضعی و تغییر شکل‌های کلی، دو مکانیزم اصلی جذب انرژی پرتابه می‌باشند. در سازه‌های مشبک تقویت‌کننده‌ها برای هر سلول^۲ همانند تکیه‌گاه الاستیک عمل می‌کنند که نتیجه آن افزایش سفتی سازه در نزدیکی ریب‌ها ولی کاهش جابجایی سازه در محل برخورد و کاهش تغییر شکل کلی سازه است. لذا با توجه به جدول ۲ در سرعت بالاتر از حد بالاستیک اثر ریب‌ها در کاهش سطح کلی شکست و تغییر شکل‌های موضعی نسبت به افزایش سفتی اثر غالب را دارد. به همین دلیل است که با نزدیک شدن به ریب‌ها سرعت خروجی پرتابه افزایش یافته است.

جدول ۳ نشان می‌دهد که در سرعت نزدیک به سرعت حد بالستیک رفتار سازه متفاوت از برخوردهای با سرعت بالاتر است. سازه به پرتابه‌ای که با سرعت ۱۰۴ متر بر ثانیه به محلی نزدیک به تقاطع ریب‌ها برخورد کرده اجازه عبور نداده، درحالی‌که پرتابه‌ای که با همین سرعت به مرکز سلول برخورد کرده با سرعت ۷۴ متر بر ثانیه از سازه خارج شده است. به این معنا که در سرعت‌های نزدیک به حد بالستیک، در نزدیکی ریب‌ها که سفتی سازه بیشتر است، انرژی بیشتری از پرتابه جذب شده است و اثر ریب‌ها در افزایش سفتی موضعی نسبت به کاهش سطح کلی شکست و تغییر شکل‌های موضعی، اثر غالب است.

۴-۲- سطح شکست

سطح شکست را می‌توان به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهایی معرفی کرد که پوسته‌های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی را از پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی ساده، متمایز می‌کند.

در تمامی حالات افزایش سطح شکست، به عنوان یکی از پارامترهای جذب انرژی، منجر به کاهش سرعت خروجی پرتابه می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که در تمامی حالات، سطح شکست فقط تا محلی که تقویت‌کننده‌ها حضور دارند گسترش یافته است. این موضوع در شکل ۷ نشان داده شده است. تصویر سمت راست این شکل برخورد در مرکز سلول و تصویر سمت چپ برخورد در نزدیکی محل تقاطع تقویت‌کننده‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳ نتایج آزمون نفوذ در سرعت نزدیک به حد بالستیک

محل برخورد پرتابه	سرعت ورود	سرعت خروج	مساحت سطح شکست (cm ²)
نزدیک به محل تقاطع ریب‌ها	۱۰۴	۰	۱۵/۸۴
مرکز سلول	۱۰۴	۷۴	۱۱/۳۲



شکل ۵ نمونه نصف شده



شکل ۶ فیکسچر مورد استفاده

برخورد در سرعت‌های ۱۳۹m/s (سرعت بیش از حد بالستیک اهداف) و ۱۰۴m/s (سرعت نزدیک به حد بالستیک)، انجام شد و در هر آزمایش سرعت‌های ورودی و خروجی پرتابه ثبت شد. با توجه به تقارن تقویت‌کننده‌ها و لایه‌های کامپوزیتی، نمونه‌ها به دو نیمه کاملاً متقارن (شکل ۵) تقسیم شدند.

فیکسچرها به گونه‌ای طراحی و ساخته شده‌اند که لبه‌های نیم استوانه از بالا و پایین به صورت گیردار و از دو لبه کناری به صورت پینی مقید باشند (شکل ۶). برای آزمایش بالستیک نمونه‌ها، از پرتابه استوانه‌ای فولادی سر تخت با قطر ۱۰ میلی‌متر، طول ۱۵ میلی‌متر و جرم ۸/۹ گرم استفاده شد. جهت کسب اطمینان از نتایج آزمایش، حداقل تکرار هر آزمایش ۳ عدد در نظر گرفته شد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تغییر محل برخورد پرتابه

در هر سلول، سفتی^۱ سازه به طور غیریکنواخت تغییر می‌کند به گونه‌ای که با نزدیک شدن به تقویت‌کننده‌ها سفتی سازه افزایش می‌یابد، لذا محل برخورد پرتابه به عنوان یکی از پارامترهای موثر در سرعت خروجی، شناخته شد. بخشی از نتایج حاصل از آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲ نتایج آزمون نفوذ در سرعت بالاتر از حد بالستیک

محل برخورد پرتابه	سرعت ورود (m/s)	سرعت خروج (m/s)	زاویه انحراف پرتابه (درجه)	مساحت سطح شکست (cm ²)
پوسته ساده	۱۳۹	۱۰۶	بدون انحراف	-
مرکز سلول	۱۳۹	۱۰۶	بدون انحراف	۱۳/۷۵
مرکز سلول	۱۳۹	۲۱	۴۵	۳۴/۹۶
مرکز سلول	۱۳۹	۴۸	۳۰	۱۹/۲۸
نزدیک به محل تقاطع ریب‌ها	۱۳۸	۱۱۹	بدون انحراف	۱۰/۷۴
نزدیک به محل تقاطع ریب‌ها	۱۴۰	۱۱۷	۱۰	۱۱/۵۲

1- Stiffness

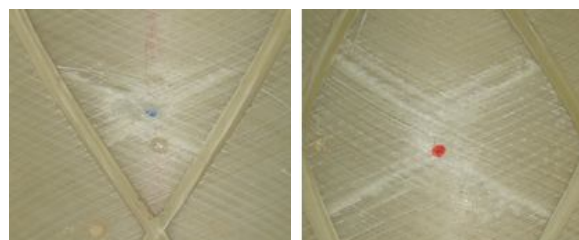
2- Cell

انحراف پرتابه تا ۴۵ درجه تا ۳۴/۹۶ سانتی‌متر مربع افزایش یافته است.

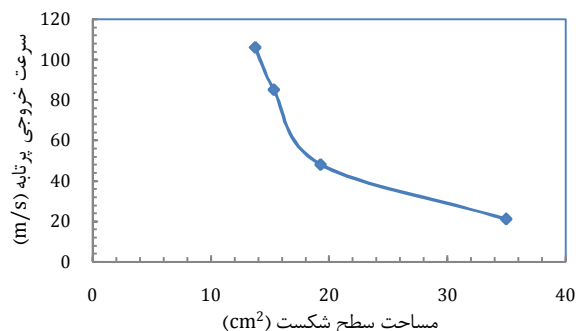
۴-۴- جدایش

۴-۴-۱- جدایش لایه‌های پوسته خارجی

بررسی نمونه‌هایی که تحت ضربه قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد که پدیده‌ی جدایش لایه‌ای در مورد پوسته خارجی اتفاق نمی‌افتد.



شکل ۷ گسترش سطح شکست



شکل ۸ مساحت سطح شکست و سرعت خروجی پرتابه

به عنوان مثال در نمونه‌ای که مساحت سطح شکست ۳۴/۹۶ سانتی‌متر مربع است، سرعت خروجی پرتابه ۲۱ متر بر ثانیه ثبت شد. همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده این سرعت با کاهش مساحت سطح شکست به ۱۳/۷۵ سانتی‌متر مربع تا ۱۰۶ متر بر ثانیه افزایش یافته است.

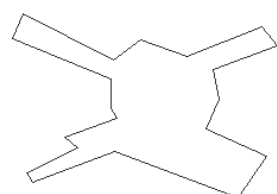
در حقیقت وجود ریب‌های مجزا، مانع نفوذ ترک^۱ از یک سلول به سلول مجاور می‌شود، این ویژگی قدرت تحمل آسیب‌دیدگی سازه را افزایش می‌دهد. شکل ۹ سطح شکست و مساحت آن را برای دو نمونه مختلف نشان می‌دهد. در این تصویر مساحت سطح شکست شکل آ، برابر ۳۴/۹۶ سانتیمتر مربع و مساحت سطح شکست شکل ب، برابر ۱۹/۲۸ سانتیمتر مربع است. به منظور محاسبه دقیق سطح شکست از تصاویر اسکن شده و مازول مقیاس ابعادی^۲ نرم‌افزار اتوکد استفاده شد.

۴-۳- میزان انحراف پرتابه پس از برخورد و بررسی اثر انحناء^۳

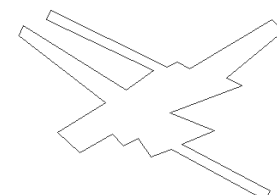
نتایج نشان می‌دهند که انحنای پوسته منجر به انحراف پرتابه پس از برخورد می‌شود و افزایش انحراف، کاهش بیشتر سرعت خروجی پرتابه را به دنبال دارد. در حقیقت سازه، پرتابه‌هایی که در محلی غیر از راستای تقارن سازه به آن برخورد می‌کنند را منحرف کرده و با افزایش سطح شکست، انرژی بیشتری از پرتابه جذب می‌کند. این خصوصیت، کاربرد سازه‌های غیر مسطح در بخش‌هایی چون سپرها، بدنه‌ی کشتی‌ها و زره‌ها را توجیه می‌کند. همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده در نمونه‌هایی که تحت برخورد با سرعت ۱۳۹ متر بر ثانیه قرار می‌گیرند و پرتابه بدون انحراف از سازه خارج می‌شود، به طور میانگین سرعت خروجی پرتابه ۱۰۶ متر بر ثانیه ثبت شده است و این سرعت با افزایش انحراف پرتابه تا ۴۵ درجه به ۲۱ متر بر ثانیه کاهش یافته است.

رابطه سطح شکست و زاویه انحراف پرتابه نیز نتیجه دیگری است که می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. با افزایش انحراف خروجی پرتابه، سطح شکست نیز گسترده‌تر شده است.

با توجه به شکل ۱۱ در نمونه‌هایی که پرتابه ۵ درجه منحرف شده، مساحت سطح شکست ۱۳/۷۵ سانتی‌متر مربع است و این مساحت با افزایش

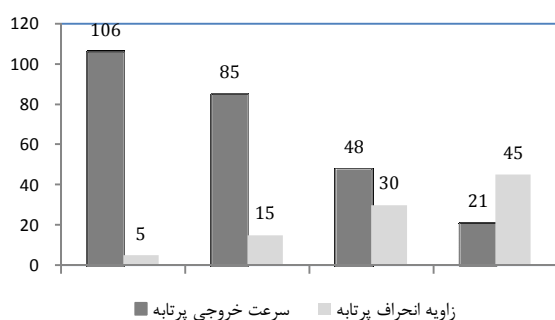


الف

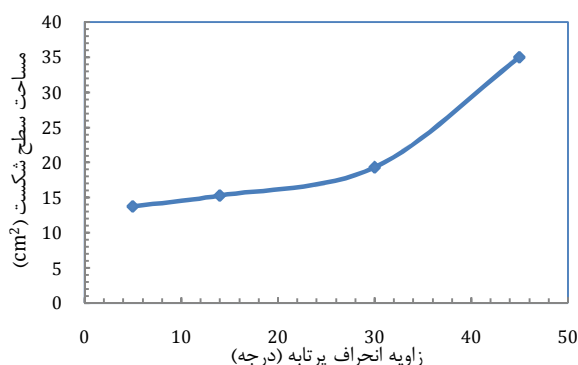


ب

شکل ۹ سطح شکست



شکل ۱۰ رابطه سرعت خروجی (m/s) و زاویه انحراف پرتابه (درجه)



شکل ۱۱ رابطه زاویه انحراف پرتابه و مساحت سطح شکست

1- Crack
2- Dimensional Scale
3- Curvature

می‌توان در سه مورد افزایش سفتی موضعی سازه در نزدیکی ریب‌ها، محدود کردن سطح شکست به یک سلول و کاهش تغییر شکل کلی سازه در نظر گرفت. در سرعت‌های نزدیک به سرعت حد بالستیک افزایش سفتی اثر غالب را دارد لذا با نزدیک شدن به ریب‌ها سرعت حد بالستیک سازه افزایش می‌یابد. در سرعت‌های بالاتر از سرعت حد بالستیک کاهش سطح شکست و تغییر شکل کلی سازه (کاهش دو مکانیزم جذب انرژی)، اثر غالب را دارد، به این معنا که پرتابه‌ای که به محل نزدیک‌تری از ریب‌ها برخورد می‌کند با سرعت بیشتری از سازه خارج می‌شود.

نتایج نشان داد که انحنای پوسته منجر به انحراف پرتابه‌ای که در راستایی غیر از تقارن سازه به آن برخورد می‌کند، می‌گردد و افزایش انحراف، افزایش سطح شکست و کاهش سرعت خروجی پرتابه را منجر می‌شود.

۶- مراجع

- [1] W. J. Cantwell, J. Morton, Impact perforation of carbon fibre reinforced plastic, *Composite science. Technology*, Vol. 38, No. 2, pp. 119-141, 1990.
- [2] T.W. Shyr, Y.H. Pan, Impact resistance and damage characteristics of composite laminates, *Composite. Structure*, Vol. 62, No. 2, pp. 193-203, Nov. 2003.
- [3] M. H. Pol, G. H. Liaghat, S. Mazdak, Effect of nanoclay particles on the ballistic behavior of glass / epoxy composites- experimental investigation, *Journal. Modares Mechanical. Engineering*, Vol. 13, No 4, pp. 98-104, 2013. (In Persian)
- [4] A. H. a. H. Sheikh, P. H. P. H. Bull, J. A. J. a. Kepler, Behaviour of multiple composite plates subjected to ballistic impact, *Composite. Science. Technology*, Vol. 69, No. 6, pp. 704-710, May 2009.
- [5] R. Karakuzu, E. Erbil, M. Aktas, Impact characterization of glass/epoxy composite plates: An experimental and numerical study, *Composite. Part B Engineering*, Vol. 41, No. 5, pp. 388-395, Jul. 2010.
- [6] N. S. S. Nair, C. V. V. Sessa Kumar, N. K. K. Naik, S. Shaktivish, Ballistic impact performance of composite targets, *Mater. Des*, Vol. 51, pp. 833-846, Oct. 2013.
- [7] J. Pernas-Sánchez, J. a. Artero-Guerrero, J. Zahr Viñuela, D. Varas, J. López-Puente, Numerical analysis of high velocity impacts on unidirectional laminates, *Composite. Structure*, Vol. 107, pp. 629-634, Jan. 2014.
- [8] L. W. Rehfield, A brief history of analysis methodology for grid-stiffened geodesic composite structures, *International sample symposium and exhibition*, 1999, pp. 956-964.
- [9] E. Frulloni, J. M. Kenny, P. Conti, L. Torre, Experimental study and finite element analysis of the elastic instability of composite lattice structures for aeronautic applications, *Composite. Structure*, Vol. 78, No. 4, pp. 519-528, 2007.
- [10] V. V. Vasiliev, A. F. Razin, Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications, *Composite. Structure*, Vol. 76, No. 1, pp. 182-189, 2006.
- [11] M. Yazdani, G. H. Rahimi, The effects of helical ribs' number and grid types on the buckling of thin-walled GFRP-stiffened shells under axial loading, *J. Reinf. Plast. Compos*, Vol. 29, No. 17, pp. 2568-2575, 2010.
- [12] M. Yazdani, H. Rahimi, A. A. Khatibi, S. Hamzeh, An experimental investigation into the buckling of GFRP stiffened shells under axial loading, *Sci. Res. Essay*, Vol. 4, No. 9, pp. 914-920, 2009.
- [13] M. Yazdani, *Analytical, Exoerimental, Buckling Analysis of Grid Stiffened Composite Shells under Axial Loading*, Phd thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modars Univercity, Tehran, 2010. (In Persian)

جدایش بین لایه‌ها، هنگامی که دو لایه با خواص الاستیک خارج از محور متفاوت در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند، رخ می‌دهد و عمدتاً به تنش‌های σ_z و τ_{xz} و τ_{yz} مربوط می‌شود. در سازه مورد مطالعه به دلیل نازکی پوسته خارجی (ضخامت ۲/۴ میلی‌متر) و زیاد بودن تعداد لایه‌ها (۱۵ لایه) مقادیر تنش‌های مذکور به حدی که منجر به جدایش شود، نمی‌رسد، لذا این نوع آسیب که به عنوان یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های آسیب کامپوزیت‌ها شناخته می‌شود در سازه مورد مطالعه اتفاق نمی‌افتد.

۴-۴-۲- جدایش لایه‌های تقویت‌کننده‌ها

با مشاهده نمونه‌ها، هیچ‌کدام از مکانیزم‌های آسیب کامپوزیت‌ها که در قسمت مقدمه ذکر شد، در تقویت‌کننده‌ها دیده نشد. با استفاده از ریب‌های تک‌جهته کامپوزیتی، تمام الیاف‌ها به صورت متحد در راستای ریب قرار گرفته است. با این روش می‌توان به بیش‌ترین میزان از درصد حجمی فایبر دسترسی پیدا کرد. در حقیقت هنگامی که تمام ریب‌ها از الیاف‌های تک‌جهته ساخته می‌شوند، به دلیل عدم وجود اختلافی در خواص مواد در لایه‌های مختلف، احتمال بروز پدیده جدایش در آن‌ها بسیار ناچیز است.

۴-۴-۳- جدایش تقویت‌کننده‌ها از پوسته

در هیچ یک از نمونه‌هایی که تحت بارگذاری ضربه‌ای قرار گرفتند جدایش تقویت‌کننده‌ها از پوسته دیده نشد. به هر حال با توجه به روش جدید ساخت (روشی که در آن تقویت‌کننده‌ها و پوسته به صورت کاملاً یکپارچه ساخته می‌شوند)، جدایش تقویت‌کننده‌ها از پوسته به آسانی رخ نمی‌دهد. با توجه به کاربردهای سازه‌های مشبک کامپوزیتی استوانه‌ای، این سازه‌ها در طول عملکردشان بارگذاری‌های مختلفی چون کمانش، پیچش، بارهای استاتیکی، برخوردهای سرعت پایین و سرعت بالا را تجربه می‌کنند، لذا در بین سازوکارهای شکست ذکر شده، به دلیل اینکه در این سازه‌ها عمدتاً پوسته نازک است، در بسیاری از بارگذاری‌ها بخش عمده بار به وسیله تقویت‌کننده‌ها تحمل می‌شود [۱۰].

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق پاسخ به ضربه کامپوزیت‌های مشبک استوانه‌ای به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که در سازه‌های مشبک وجود ریب‌های مجزا، مانع از گسترش سطح شکست از یک سلول به سلول مجاور می‌شود و پوسته در برخورد با اجسام ریز که در آن انرژی برخورد از حدی فراتر می‌رود سوراخ می‌شود، در نتیجه آسیب پوسته منجر به شکست سازه که در آن استحکام به وسیله ریب‌ها کنترل می‌گردد، نمی‌شود.

در هیچ یک از نمونه‌ها جدایش ریب‌ها از پوسته، جدایش در ریب‌ها و جدایش در پوسته خارجی مشاهده نشد.

اثر ریب‌ها در سازه‌های مشبکی که تحت برخورد قرار می‌گیرند را