



بررسی عددی و تجربی نفوذ پرتابه با سرعت بالا در کامپوزیت‌های مشبک استوانه‌ای

محمد هدایتیان¹، غلامحسین لیاقت^{2*}، غلامحسین رحیمی²، محمد حسین پل³

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

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

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

* تهران، 111-14115، ghlia530@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 دی 1392

پذیرش: 25 بهمن 1392

ارائه در سایت: 30 شهریور 1393

کلید واژگان:

کامپوزیت مشبک

آسیب

شکست

ضربه بالستیک

مدل‌سازی عددی

چکیده

به دلیل افزایش بسیار زیاد توان محاسباتی در سال‌های اخیر، شبیه‌سازی‌های عددی به دلیل در نظر گرفتن مکانیزم‌های مختلف و پیچیده شکست، بیشترین سهم در طراحی سازه‌های کامپوزیتی را از آن خود کرده‌اند. با این حال مدل‌سازی دقیق و سه‌بعدی آسیب‌های ناشی از پدیده ضربه هنوز هم به عنوان چالشی جدی مطرح می‌باشد. در تحقیق حاضر از پیشرفته‌ترین روش مدل‌سازی المان محدود کامپوزیت‌ها (آباکوس - اکسیلیسیست (صریح)) جهت تعیین رفتار سازه‌های مشبک استوانه‌ای کامپوزیتی، هنگامی که تحت برخورد قرار می‌گیرند، استفاده شده است. بدین منظور برای مدل‌سازی پوسته و تقویت‌کننده‌ها از المان‌های جامد سه‌بعدی و جهت تعیین رفتار ماده، از مدل مادی وی‌یومت بر مبنای معیارهای آسیب پاک و هاشین (سه‌بعدی) استفاده شد. به دلیل عدم وجود معیارهای ذکر شده در نسخه‌های تجاری نرم‌افزار و اهمیت در نظر گرفتن چنین آسیب‌هایی در مدل‌سازی عددی، معیارهای مذکور با استفاده از کدنویسی در محیط نرم‌افزار فرترن نوشته شدند و به این شکل تحلیل پدیده نفوذ در سازه‌های کامپوزیتی که با المان‌های جامد سه‌بعدی مدل شده‌اند به قابلیت نرم‌افزار اضافه گردید. نمودارهای تغییرات سرعت و نیروی پرتابه، گستردگی سطح خرابی و مکانیزم‌های مختلف شکست به عنوان نتایج گزارش شده‌اند. در این تحقیق به منظور اعتبار سنجی مدل از آزمون‌های تجربی استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی توافقی بسیار خوبی را با نتایج تجربی نشان می‌دهند.

Numerical and experimental analyses projectile penetration in grid cylindrical composite structures under high velocity Impact

Mohammad Hedayatian¹, Gholam Hossein Liaghat^{2*}, Gholam Hossein Rahimi², Mohammad Hossein Pol³

1-Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2-Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3-Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 31 December 2013
Accepted 14 February 2014
Available Online 21 September 2014

Keywords:

Grid composite
Damage
fracture
ballistic impact
numerical modeling

ABSTRACT

In this investigation, kinked crack path of friction stir Cu-Al7075-T6 alloy welded joints in four-point bending test conditions has been studied as well as the fatigue lifetime of the welded joints, numerically and experimentally. To do so, four-point bending and fatigue tests of welded specimens have been carried out and the experimental fatigue test data and the kinked crack angles in bending tests have been extracted. Maximum Tangential Stress (MTS) and $(K_{II})_{min}$ criteria have been used for estimating the kinked crack angles, and Paris law has been applied to predict fatigue crack propagation life of the welded specimens. Functionally graded materials concept has been employed for determining mechanical properties of different regions of welded joints. To do so, the mechanical properties of the weld region such as Young's Modulus and Poisson's ratio have been considered to be linear functions of the positions of the weld region points. It has been shown that, when the original notch is close to the material with the higher fracture toughness (Copper), the kinked crack angle becomes smaller. The results show good agreement between the experimental data and numerical estimations.

گرفته‌اند، به خوبی در زمینه‌های مختلفی چون کارآمدی سازه، سفتی و استحکام ویژه با سازه‌های شناخته شده ساندویچی با هسته لانه زنبوری رقابت می‌کنند. این سازه‌ها علاوه بر ویژه‌گی‌های خاص سازه‌های ساندویچی، بسیاری از مشکلات موجود در سازه‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری را نیز برطرف می‌کنند. نفوذ رطوبت و به دام افتادن آب در هسته لانه زنبوری

1- مقدمه

سازه‌های کامپوزیتی ساندویچی با هسته لانه زنبوری و سازه‌های کامپوزیتی مشبک، شناخته شده‌ترین سازه‌ها در صنایع فضایی و هوایی هستند. سازه‌های مشبک که در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه قرار

Please cite this article using:

M. Hedayatian, Gh. Liaghat, Gh. Rahimi, M. H. Pol, Numerical and experimental analyses projectile penetration in grid cylindrical composite structures under high velocity Impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 17-26, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Hedayatian, Gh. Liaghat, Gh. Rahimi, M. H. Pol, Numerical and experimental analyses projectile penetration in grid cylindrical composite structures under high velocity Impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 17-26, 2014 (In Persian)

خواهد داشت. 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. به دلیل افزایش بسیار زیاد توان محاسباتی در سال‌های اخیر، شبیه‌سازی‌های عددی به دلیل در نظر گرفتن مکانیزم‌های مختلف و پیچیده شکست، بیشترین سهم در طراحی سازه‌های کامپوزیتی را از آن خود کرده‌اند. با این حال مدل‌سازی دقیق و سه‌بعدی آسیب‌های ناشی از پدیده ضربه هنوز هم به عنوان چالشی جدی مطرح می‌باشد. نتایج کارهای مورتن و کانتول [6]، 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 تاثیر 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.

شیخ و همکارانش [7]، رفتار پنل‌های کامپوزیتی تک‌لایه و چندلایه‌ای که تحت برخورد بالستیک قرار می‌گیرند را به روش‌های تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. برندا و همکارانش [8]، برخورد سرعت بالای پرتابه با سازه‌های کامپوزیتی ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری آلومینومی را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله حد بالستیک و سرعت خروجی پرتابه به عنوان نتایج گزارش شدند و این نتایج با کارهای تجربی سایر محققین اعتبارسنجی شد. خلیلی و همکارانش [9]، به تحلیل المان محدود ضربه سرعت پایین روی اهداف کامپوزیتی چندلایه و پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی پرداختند، در این مطالعه از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شد و اثر پارامترهایی همچون نوع تحلیل (ضمنی¹ یا صریح²)، نوع المان و جرم‌های مختلف پرتابه مورد مطالعه قرار گرفت و مزایا و معایب روش‌های مختلف مدل‌سازی مورد بحث قرار گرفت.

قاسمی و همکارانش [10]، اثر بار ضربه‌ای عرضی با سرعت پایین یک جرم کوچک یا بزرگ بر روی رفتار دینامیکی ورق کامپوزیتی یک سر گیردار با لایه فلزی را به روش عددی و تحلیلی مورد بررسی قرار دادند، آنها جهت مدل‌سازی از نرم‌افزار آباکوس استفاده کردند ولی مکانیزم‌های آسیب را در نظر نگرفتند. پل و همکارانش [11]، به بررسی تجربی تأثیر نانوذررات رسی بر روی خواص بالستیک مواد مرکب شیشه / اپوکسی پرداختند. در این بررسی که در دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفت، از پرتابه سرتخت استفاده شد و علاوه بر میزان جذب انرژی، سطح خرابی نمونه‌ها نیز اندازه‌گیری و بررسی شد.

خدادادی و همکارانش [12]، نفوذ در پارچه‌های کولار و عوامل موثر در عملکرد بالستیکی آنها را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق مدل‌سازی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس‌دایناس صورت گرفت. اینس ایوانز [13]، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پاسخ به ضربه تیرهای ساندویچی کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری تحت برخورد سرعت پایین را مورد بررسی قرار داد. در این مقاله جهت مدل‌سازی از مدل مادی وی‌بومت³ با بهره‌گیری از معیار شکست هوو استفاده شد و نتایج توافق بسیار خوبی را با کارهای تجربی سایر محققین نشان دادند. سانچز و همکارانش [14]، به توسعه روش عددی

منجر به ایجاد خوردگی و کاهش شدید عملکرد سازه‌های ساندویچی می‌شود، این مشکل به عنوان یکی از مهمترین مشکلات شناخته شده این سازه‌ها به شمار می‌رود. زمان زیاد جهت برش و اتصال هسته لانه‌زنبوری در حالات اشکال پیچیده سازه به عنوان مشکل اساسی دوم این سازه‌ها به شمار می‌رود. در سازه‌های مشبک به دلیل اینکه پوسته تنها در یک سمت سازه وجود دارد، رطوبت اثری بر عملکرد این سازه‌ها ندارد و با توجه به روش‌های ساخت (این سازه‌ها بطور خودکار و یکپارچه ساخته می‌شوند)، نشان داده شده که استفاده از این سازه‌ها به جای سازه‌های ساندویچی منجر به کاهش 20 درصدی هزینه تولید می‌شود [1].

ویژگی‌های فوق سازه‌های مشبک کامپوزیتی را به کارآمدترین نوع سازه از نظر وزنی تبدیل کرده است. این ویژگی منجر به گسترش بسیار زیاد استفاده از این سازه‌ها در صنایع هوایی و فضایی در سال‌های اخیر شده است. در حقیقت این سازه‌ها قابلیت‌های سازه‌های کامپوزیتی ساده (تقویت‌نشده) و همچنین سازه‌های تقویت‌کننده را با هم دارند.

واسلیو [2]، 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 می‌باشد. فرولونی [3]، 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 ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت. برای به دست آوردن روندی جهت طراحی تمام مراحل، آزمایش‌ها به روش المان محدود شبیه‌سازی شد. به این ترتیب تحلیلی برای ناپایداری سازه تحت تاثیر هندسه المان‌ها بر مقاومت کمانشی سازه ارائه شد و سه مود کمانشی مشخص که بستگی مستقیم به ارتفاع سازه داشت، تشخیص داده شدند. نتایج مدل المان محدود آنها با نتایج تجربی توافق خوبی نشان می‌داد. یزدانی و رحیمی [4]، به روش تجربی اثرات تغییرات شکل شبکه و تعداد ریب‌های تقویت‌کننده ماریچ، بر باربری پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده تمام کامپوزیتی را بررسی نمودند. 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 [5]، به بررسی اثرات تغییر شکل شبکه در نمونه‌هایی از پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده که در آنها ضخامت پوسته بسیار کم است، پرداختند. نتایج نشان داد که پوسته تقویت‌نشده در مقایسه با نمونه‌هایی که مقدار چگالی تقویت‌کننده‌ها در آنها کم است، عملکرد بهتری نسبت به وزن از خود بروز می‌دهند.

رفتار دینامیکی لایه‌های کامپوزیتی بدلیل وقوع همزمان پدیده‌های مختلف در طول شکست لایه‌ها، هنگامی که تحت بارگذاری ضربه‌ای قرار می‌گیرند بسیار پیچیده است. گسیختگی الیاف، شکست و ترک‌خوردگی ماتریس، تغییر شکل‌های پلاستیک در اثر برخورد، جابجایی‌های بزرگ و سوراخ‌شدگی، جدایش لایه‌ها، جدایش تقویت‌کننده‌ها از پوسته و ترکیبی از حالات فوق مدل‌های مختلف شکست هستند که برای این نوع از سازه‌ها هنگامی که تحت برخورد با یک شیء خارجی قرار می‌گیرند، باید در نظر گرفته شوند. در بین مکانیزم‌های شکست ذکر شده، به دلیل اینکه در سازه‌های مشبک عمدتاً پوسته نازک است، بخش عمده بار به وسیله تقویت‌کننده‌ها تحمل می‌شود لذا جدایش تقویت‌کننده‌ها از پوسته تبعات فاجعه‌باری

1. Implicit
2. Explicit
3. Vumat



شکل 2 نمونه سالم جداسده از قالب

در فرآیند ساخت 17 نمونه ساخته شد، نمونه‌ها دارای طول میانگین 36 سانتی‌متر، قطر 14±0/2 سانتی‌متر و ضخامت پوسته‌ی 2.4 میلیمتر می‌باشند. تقویت‌کننده‌ها نیز دارای مقطع مربعی با ضلع 6 سانتی‌متر هستند (جدول 1). شکل 2 نمونه سالم جداسده از قالب را نمایش می‌دهد.

3- آزمایش بالستیک

آزمایش بالستیک نمونه‌های ساخته شده در دانشگاه تربیت مدرس، به وسیله تفنگ گازی انجام گردید. برخورد در سرعت‌های 139m/s (سرعت بیش از حد بالستیک اهداف) و 104m/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 تقسیم شدند. جهت انجام آزمایش بالستیک نمونه‌ها، از پرتابه استوانه‌ای فولادی سر تخت با قطر 10 میلیمتر، طول 15 میلیمتر و جرم 8.9 گرم استفاده شد. جهت کسب اطمینان از نتایج آزمایش، حداقل تکرار هر آزمایش 3 عدد در نظر گرفته شد. جدول 2 نتایج آزمون نفوذ در سرعت بالاتر از حد بالستیک و جدول 3 نتایج در سرعت نزدیک به حد بالستیک را نشان می‌دهد.

4- مدل‌های شکست

محققان متعدد، مدل‌های مختلفی را جهت تخمین مکانیزم‌های شکست ارائه داده‌اند که از آن جمله می‌توان به معیارهای شکست پاک [15] و هاشین سه‌بعدی [16] اشاره کرد. در حقیقت انتخاب بهترین مدل نیازمند در نظرگیری عوامل مختلفی چون نوع بارگذاری سازه، سرعت برخورد، مکانیزم‌های آسیب و مدل‌های شکست می‌باشد.

جدول 2 نتایج آزمون نفوذ در سرعت بالاتر از حد بالستیک

سرعت خروج (m/s)	سرعت ورود (m/s)	محل برخورد پرتابه
106	139	پوسته ساده
106	139	مرکز سلول
119	138	نزدیک به محل تقاطع ریب‌ها

جدول 3 نتایج آزمون نفوذ در سرعت نزدیک به حد بالستیک

سرعت خروج (m/s)	سرعت ورود (m/s)	محل برخورد پرتابه
0	104	نزدیک به محل تقاطع ریب‌ها
74	104	مرکز سلول

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.

موضوع اصلی این تحقیق بررسی پاسخ به ضربه کامپوزیت‌های مشبک استوانه‌ای به روش عددی و تجربی در برخوردهای بالستیک با پرتابه سر تخت است. در کار عددی حاضر از پیشرفته‌ترین روش مدل‌سازی المان محدود کامپوزیت‌ها (آباکوس¹ - اکسپلیسیت²) جهت تعیین رفتار سازه‌های مشبک استوانه‌ای کامپوزیتی، هنگامی که تحت برخورد قرار می‌گیرند، استفاده شد. بدین منظور برای مدل‌سازی پوسته و تقویت‌کننده‌ها از المان‌های جامد سه‌بعدی³ و جهت تعیین رفتار ماده، از مدل مادی وی‌بومت بر مبنای معیارهای آسیب پاک⁴ و هاشین سه‌بعدی⁵ استفاده شده است.

2- ساخت نمونه‌ها

در این تحقیق نمونه‌ها به شیوه‌ی پیچش الیاف به روش جایگذاری دستی ساخته شدند. شکل 1 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 سخت‌کننده⁶ HY5161 ساخته شد. الیاف مورد استفاده نیز E-Glass می‌باشد. در این تحقیق، زاویه رشته‌پیچی الیاف $\pm 76^\circ$ درجه، نزدیک به زاویه‌ای که در تحقیق صورت گرفته توسط یزدانی و همکاران [5]، گزارش شده، انتخاب گردید.



شکل 1 دستگاه پیچش الیاف

جدول 1 مشخصات هندسی نمونه‌های ساخته شده

پوسته‌ی استوانه‌ای			
قطر خارجی	ضخامت پوسته	ارتفاع پوسته	تعداد دفعات رفت و برگشت
140mm	2/4mm	360mm	100
تقویت‌کننده‌ها			
مقطع تقویت‌کننده‌ها	ارتفاع تقویت‌کننده‌ها	تعداد دفعات رفت و برگشت	
6×6mm	360mm	80	

1. Abaqus
2. Explicit
3. Solid
4. Puck
5. Hashin(3D)
6. Hardener

1-4- معیار شکست هاشین سه بعدی

معیار شکست هاشین سه بعدی [16]، که جهت تخمین آسیب الیاف مورد استفاده قرار می گیرد، به صورت رابطه (1) گزارش می شود:

$$F_{ff} = \begin{cases} \left(\frac{\sigma_1}{X_t}\right)^2 + \frac{1}{S_{12}^2}(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2) & \sigma_1 \geq 0 \\ \left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 & \sigma_1 < 0 \end{cases} \quad (1)$$

در این رابطه σ_1 بیان کننده تنش در جهت الیاف و τ_{12} و τ_{13} نشان دهنده تنش های برشی می باشند، X_t و X_c استحکام های کششی و فشاری در جهت الیاف و S_{12} استحکام برشی صفحه ای ماده مورد استفاده را نشان می دهند. معادل یک شدن هر کدام از معادلات رابطه 1 به معنای رخ دادن آسیب می باشد.

2-4- معیار شکست پاک

معیار شکست پاک [15, 17]، یکی از معیارهای هم کنشی مبتنی بر تنش است که جهت تخمین رفتار لایه های کامپوزیتی تک جهته مورد استفاده قرار می گیرد. معیار شکست ماتریس F_{iff} با فرض اینکه تنها تنش های اعمال شده در صفحه شکست، صفحه ای که دارای شیب θ با صفحه مادی است، منجر به شروع شکست می شوند، محاسبه می شود. تنش های برشی و نرمال اعمال شده در این صفحه با دوران تانسور تنش سه بعدی از سیستم مختصات مادی به صفحه شکست با استفاده از تانسور انتقال کلاسیک محاسبه می شوند (شکل 3). طبق رابطه (2) داریم:

$$F_{iff} = \begin{cases} \sqrt{\left[\left(\frac{1}{R_{\perp}} - \frac{P_{\perp\psi}^+}{R_{\perp\psi}}\right)\sigma_n(\theta)\right]^2 + \left(\frac{\tau_{nt}(\theta)}{R_{tt}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{nl}(\theta)}{R_{t\parallel}}\right)^2} + \frac{P_{\perp\psi}^+}{R_{\perp\psi}}\sigma_n(\theta) & \sigma_n \geq 0 \\ \sqrt{\left(\frac{\tau_{nt}(\theta)}{R_{tt}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{nl}(\theta)}{R_{t\parallel}}\right)^2 + \left[\left(\frac{P_{\perp\psi}^-}{R_{\perp\psi}}\right)\sigma_n(\theta)\right]^2} + \frac{P_{\perp\psi}^-}{R_{\perp\psi}}\sigma_n(\theta) & \sigma_n \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

معادل یک شدن هر یک از معادلات رابطه فوق به معنای وقوع آسیب است. در رابطه فوق R_{\perp} استحکام شکست در جهت عمود بر الیاف، $R_{\perp\psi}$ و $R_{t\parallel}$ استحکام های برشی، $P_{\perp\psi}^+$ و $P_{\perp\psi}^-$ پارامترهایی هستند که اثر اصطکاک داخلی را در معیار شکست موهر-کولمب در نظر می گیرند. روابط (3) تا (9) روابطی هستند که در محاسبه پارامترها مورد استفاده قرار می گیرند:

$$\frac{P_{\perp\psi}^+}{R_{\perp\psi}} = \frac{P_{\perp\perp}^+}{R_{\perp\perp}(\cos\psi)^2} + \frac{P_{\perp\parallel}^+}{R_{\perp\parallel}(\sin\psi)^2} \quad (3)$$

$$\frac{P_{\perp\psi}^-}{R_{\perp\psi}} = \frac{P_{\perp\perp}^-}{R_{\perp\perp}(\cos\psi)^2} + \frac{P_{\perp\parallel}^-}{R_{\perp\parallel}(\sin\psi)^2} \quad (4)$$

$$(\cos\psi)^2 = \frac{\tau_{nt}^2(\theta)}{\tau_{nt}^2(\theta) + \tau_{ni}^2(\theta)} \quad (5)$$

$$(\sin\psi)^2 = \frac{\tau_{ni}^2(\theta)}{\tau_{nt}^2(\theta) + \tau_{ni}^2(\theta)} \quad (6)$$

$$R_{\perp} = Y_t \quad (7)$$

$$R_{\perp\parallel} = S_{21} \quad (8)$$

$$R_{\perp\perp} = \frac{Y_c}{2(1 + P_{\perp\perp}^-)} \quad (9)$$

در این روابط Y_t و Y_c استحکام های کششی و فشاری مادی صفحه ای در جهت عمود بر الیاف هستند. علاوه بر پارامترهای استاندارد ماده، پارامترهای ویژه مدل پاک نیز مورد نیاز می باشند. محاسبه این پارامترها نیاز به آزمایش های چند محوری به نسبت پیچیده ای دارد، به هر حال پاک استفاده از این پارامترها را بصورت جدول 4 توصیه می کند.

5- مدل سازی

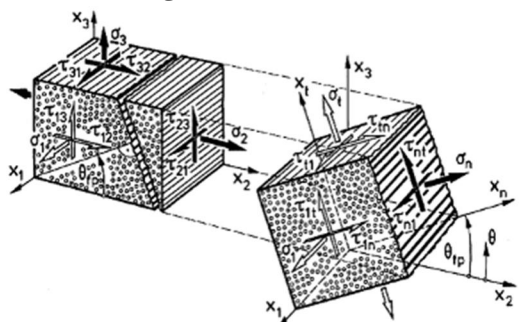
در این قسمت مراحل مختلف مدل سازی ذکر می شود. با توجه به نتایج تجربی در مورد این سازه جدایش رخ نمی دهد، لذا جهت اتصال لایه ها به یکدیگر و همچنین اتصال تقویت کننده به پوسته از قید تای¹ استفاده شد. اعمال این قید به معنای ایجاد یک گره است که دو ناحیه مجزا را به یکدیگر متصل می کند، به نحوی که بین آنها هیچگونه حرکتی وجود نخواهد داشت.

5-1- پوسته و تقویت کننده ها

پوسته به صورت 12 لایه (هر لایه دارای ضخامت 0/2 میلی متر) و با زوایای ± 76 درجه به صورت متناوب مدل شد. به دلیل این که لایه های مختلف تقویت کننده ها از لحاظ جنس و زاویه مشابه می باشند، تقویت کننده ها بصورت تک لایه با مقطع عرضی 6×6 سانتی متر و طول 36 سانتی متر مدل شدند. مدل سازی تقویت کننده ها با استفاده از نرم افزار کتیا انجام شد. در شبیه سازی مدل با اعوجاج شدید مش، باید از المان های خطی با انتگرال گیری کاهش یافته مانند C3D8R استفاده کرد، لذا المان های لایه های پوسته و تقویت کننده ها از نوع C3D8R انتخاب شدند.

5-2- پرتابه

به دلیل این که تغییر شکل پرتابه در مقایسه با کامپوزیت بسیار کوچک است، در این تحقیق برای مدل سازی پرتابه از المان های صلب استفاده شد (R3D4). پرتابه به شکل استوانه ای سرتخت و با قطر 9/50 میلی متر مدل شده است.



شکل 3 دوران تانسور تنش

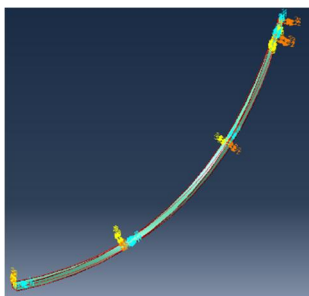
جدول 4 پارامترهای ویژه مدل پاک [15]

$P_{\perp\parallel}^+$	$P_{\perp\parallel}^-$	$P_{\perp\perp}^+$	$P_{\perp\perp}^-$	
		-0/25	-0/25	الیاف شیشه
0/3	0/25	0/2	0/2	الیاف کربن
0/35	0/3	-0/3	0/25 -0/3	

5-3- شرایط مرزی

مشابه با شرایط مرزی در آزمون های تجربی دو سمت استوانه به صورت کاملا

¹. tie



شکل 4 چرخش محور مختصات

7- همگرایی مش

سه حالت مختلف مش‌بندی در سرعت برخورد 139 متر بر ثانیه مورد بررسی قرار داده شد. با توجه به جدول 7، در سه حالت بررسی شده بهترین حالت، حالت دوم می‌باشد. لذا از این حالت مش‌بندی جهت تحلیل استفاده شد. شکل 5 تصویری از مدل نهایی سازه را به همراه نمونه ساخته شده نشان می‌دهد.

8- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا نتایج شبیه‌سازی ذکر می‌شوند، سپس به مقایسه نتایج با نتایج آزمون‌های تجربی پرداخته می‌شود. نمودار تغییرات سرعت و نیروی پرتابه، گستردگی سطح شکست، بررسی زمانی نفوذ پرتابه و بررسی مکانیزم‌های شکست به عنوان نتایج ذکر و تحلیل می‌شوند.

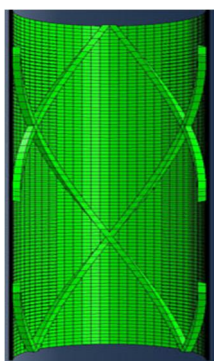
8-1- پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی ساده

در مدل‌سازی انجام شده پرتابه پس از برخورد با سرعت 139 متر بر ثانیه به پوسته استوانه‌ای ساده با سرعت 114 متر بر ثانیه از سازه خارج شده است. این سرعت در حالت تجربی 107 متر بر ثانیه محاسبه شده بود.

شکل 6 نمودار تغییرات سرعت پرتابه در این حالت برخورد را در طی فرآیند نفوذ نشان می‌دهد. شکل 7 نمودار تغییرات نیروی پرتابه بر حسب زمان را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل سازه در اولین لحظه پس از برخورد، بیشترین مقاومت در مقابل پرتابه را از خود نشان می‌دهد. پرتابه 13/6 کیلو نیوتن نیرو به سازه وارد می‌کند تا منجر به ایجاد آسیب شود.

جدول 7 همگرایی مش

تعداد المان‌های یک پوسته نیم-استوانه‌ای	سرعت ورودی پرتابه (m/s)	سرعت خروجی پرتابه در حالت عددی (m/s)	سرعت خروجی پرتابه در حالت تجربی (m/s)	اختلاف (درصد)
2140	139	90	107	15/89
5170	139	114	107	6/1
6160	139	115	107	6/95



شکل 5 مدل نهایی سازه را به همراه نمونه ساخته شده

گیردار مقید و سرعت اولیه پرتابه به صورت یک میدان از پیش تعیین شده در محل نقطه مرجع¹ پرتابه تعریف شد. در ضمن چون برای پرتابه صلب خاصی در نظر گرفته نمی‌شود، جرم پرتابه بصورت متمرکز در محل نقطه مرجع آن در نظر گرفته شد. در مورد پرتابه ذکر این نکته الزامی است که پرتابه در طول اجرای برنامه اجازه حرکت انتقالی و چرخشی در تمامی جهات صفحه را دارد.

6- اختصاص مواد

با در نظر گرفتن خواص مکانیکی و استحکام‌های الیاف شیشه و اپوکسی و مراجعه به روابط میکرومکانیک لایه‌ها، خواص مکانیکی و استحکام‌های پوسته (جدول 5) و تقویت‌کننده‌ها (جدول 6) محاسبه شدند. در این روابط درصد حجمی الیاف 28/44 درصد برای پوسته و 30 درصد برای تقویت‌کننده‌ها بر اساس نمونه‌های تجربی در نظر گرفته شد. در این جداول X_t ، X_c ، Y_t ، Y_c ، Z_t ، Z_c به ترتیب بیان‌کننده استحکام‌های نهایی کششی و فشاری تک لایه کامپوزیتی در جهت 1، 2 و 3 می‌باشند. منظور از جهت 1 راستای الیاف و جهت 2 و 3 جهات عمود بر راستای الیاف می‌باشند با این تفاوت که جهت 3 در جهت ضخامت پوسته است. S استحکام برشی نهایی تک لایه، E مدول الاستیسته، G مدول برشی و ν نسبت پواسون را نشان می‌دهند.

در مورد تقویت‌کننده‌ها، نوع ماده از نوع ثابت مهندسی² انتخاب گردید، زیرا این خواص برای ماده الاستیک خطی ارتوتروپ بکار می‌رود. به دلیل اینکه تقویت‌کننده‌ها رفتاری شبیه تیر از خود بروز می‌دهند، نوع المان از نوع سه‌بعدی³ در نظر گرفته شد. به دلیل اینکه تقویت‌کننده‌ها در نمونه واقعی حالت مارپیچ دارند و الیاف‌ها که معرف جهت اصلی هستند در امتداد مسیری مارپیچ شکل قرار گرفته‌اند، دستگاه مختصات جداگانه‌ای⁴ روی تقویت‌کننده‌ها در نظر گرفته و زاویه‌ی دستگاه به‌گونه‌ای تعریف شد که یکی از محورها در راستای لایه تقویت‌کننده قرار گیرد. در اینجا محور 1 این وظیفه را بر عهده دارد و از محور 3 که راستای قائم بر سطح می‌باشد برای تعیین محور لایه چینی الیاف استفاده گردید. شکل 4 نشان می‌دهد که دستگاه مختصات در امتداد مسیر مارپیچی شکل تقویت‌کننده به خوبی چرخیده است.

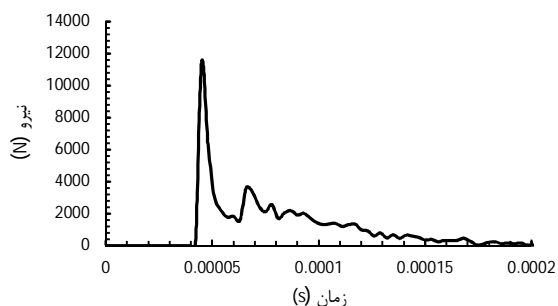
جدول 5 خواص مکانیکی و استحکام‌های پوسته

خواص	مقادیر
چگالی $[\frac{kg}{m^3}]$	1370.64
خواص الاستیک	$E_1 = 27.00 \text{ GPa}$; $E_2 = 5.8 \text{ GPa}$; $E_3 = 5.8 \text{ GPa}$; $G_{12} = G_{13} = 2.05 \text{ GPa}$; $G_{23} = 2.68 \text{ GPa}$; $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.272$; $\nu_{23} = 0.0838$;
استحکام [Mpa]	$X_t = 485.1872$; $X_c = 58.5688$; $Y_t = Z_t = 52.117e6$; $Y_c = Z_c = 73.832$; $S_{12} = 22.456 = S_{23} = S_{13}$;

جدول 6 خواص مکانیکی تقویت‌کننده‌ها

خواص	مقادیر
چگالی $[\frac{kg}{m^3}]$	1390
خواص الاستیک	$E_1 = 24.00 \text{ GPa}$; $E_2 = 5.46 \text{ GPa}$; $E_3 = 5.46 \text{ GPa}$; $G_{12} = G_{13} = 1.9 \text{ GPa}$; $G_{23} = 2.5 \text{ GPa}$; $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.275$; $\nu_{23} = 0.0798$;

1. Reference point
2. Engineering Constant
3. Solid
4. Local Coordinate

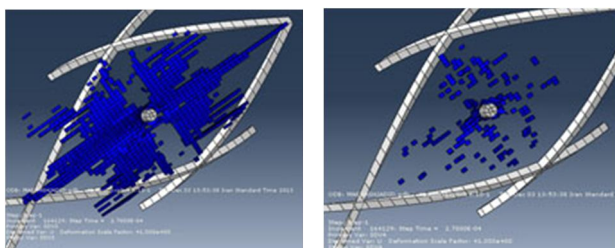


شکل 9 تغییرات نیروی پرتابه

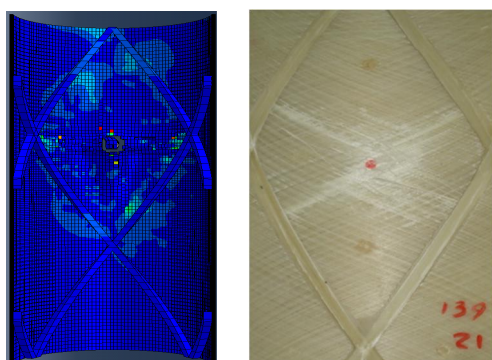
8-2-2- بررسی مکانیزم‌های آسیب

با توجه به آزمون‌های تجربی و عدم رخ دادن مکانیزم‌های شکستی چون جدایش لایه‌ای و جدایش تقویت‌کننده‌ها از پوسته، گسیختگی و کمانش الیاف، ترک‌خوردگی و شکست ماتریس اصلی‌ترین مکانیزم‌های تخریبی هستند که برای سازه مورد تحقیق رخ می‌دهند. مدل عددی نوشته شده (وی‌یومت) توانایی تخمین آسیب‌های مختلف کامپوزیت‌ها را دارا می‌باشد که در ادامه به بخشی از آنها اشاره شده است (شکل 10).

شکل آ از تصویر فوق نشان‌دهنده المان‌هایی از سازه است که در تنش‌های کششی دچار آسیب شده‌اند. شکل ب نیز المان‌هایی از سازه که در اثر تنش‌های فشاری دچار آسیب شده‌اند را نشان می‌دهد. لذا با توجه به شکل در محل برخورد پرتابه، تنش‌های فشاری ناشی از تنش‌های تماسی بین پرتابه و سازه منجر به ایجاد آسیب شده در حالیکه در قسمت‌های دیگر در اثر تغییر شکل‌های ایجاد شده، بیشترین المان‌ها در اثر تنش‌های کششی دچار آسیب شده‌اند. المان‌های نشان داده شده روی شکل مربوط به لایه‌های مختلف (12 لایه) چند لایه می‌باشند.



شکل 10 مکانیزم‌های مختلف آسیب



شکل 11 گستردگی سطح شکست

سپس با گسترش آسیب به لایه‌های زیرین مقدار این نیرو به طور تقریباً یکنواختی کاهش یافته است. قله دوم در نمودار فوق به دلیل نیروی اصطکاک بین پرتابه و سازه هنگام خروج پرتابه می‌باشد.

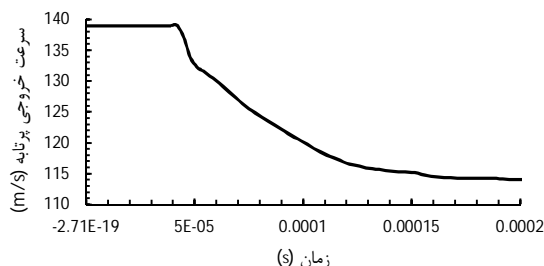
8-2-2- برخورد در مرکز سلول

در این بخش نتایج حاصل از برخورد پرتابه به مرکز یک سلول ذکر شده است.

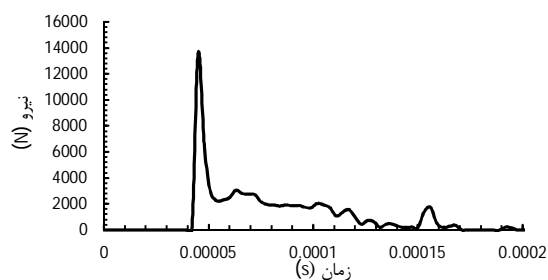
8-2-1- تغییرات سرعت و نیروی پرتابه

همان‌گونه که در شکل 8 مشاهده می‌شود پرتابه با سرعت 114 متر بر ثانیه از سازه خارج شده است. این سرعت در حالت تجربی 107 متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. این سرعت دقیقاً مشابه حالتی است که پرتابه به پوسته کامپوزیتی ساده برخورد کرده است. لذا به دلیل موضعی بودن اثرات بارگذاری بالستیک و بزرگ بودن هر سلول وجود تقویت‌کننده‌ها تأثیری در سرعت خروجی پرتابه ندارد.

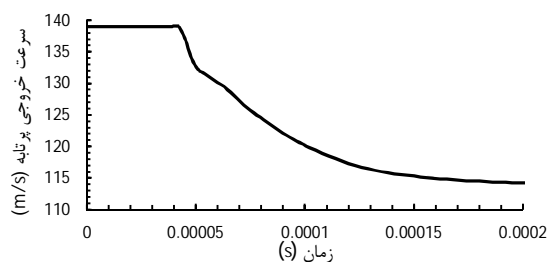
با توجه به شکل 9 در این حالت نیز، در اولین لحظه پس از برخورد، سازه بیشترین مقاومت در مقابل پرتابه را از خود نشان داده است. پرتابه 11/461 کیلونیوتن نیرو به سازه وارد کرده تا منجر به ایجاد آسیب شود. با شروع آسیب‌دیدگی سازه مقدار نیرو به سرعت کاهش یافته است. دومین قله نمودار نشان‌دهنده اثر تقویت‌کننده‌ها می‌باشد. در حقیقت با رسیدن سطح آسیب‌دیدگی به تقویت‌کننده‌ها سازه به طور لحظه‌ای در مقابل عبور پرتابه مقاومت نشان داده سپس با گسترش آسیب به لایه‌های زیرین مقدار این نیرو به طور تقریباً یکنواختی کاهش یافته است.



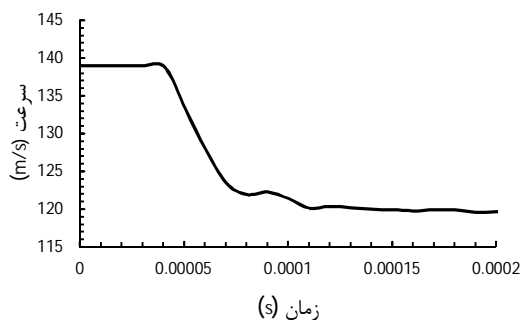
شکل 6 تغییرات سرعت پرتابه در حالت برخورد با پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی ساده



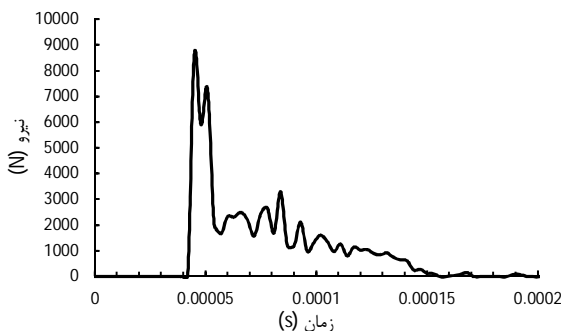
شکل 7 تغییرات نیروی پرتابه



شکل 8 تغییرات سرعت پرتابه در حالت برخورد با مرکز سلول



شکل 13 تغییرات سرعت پرتابه



شکل 14 تغییرات نیروی پرتابه

به دلیل افزایش موضعی سفتی سازه در نزدیکی تقویت‌کننده‌ها، مقدار نیرو بر خلاف حالات برخوردی که تاکنون بررسی شدند به طور ناگهانی به مقدار زیادی کاهش نمی‌یابد. مقدار نیرو در دومین قله برابر $7/22$ کیلونیوتن می‌باشد. با گسترش آسیب به لایه‌های زیرین مقدار این نیرو به طور تقریباً یکنواختی کاهش یافته است.

2-3-8- بررسی مکانیزم‌های مختلف آسیب

شکل 15 مکانیزم‌های مختلف آسیب برای حالت برخورد در نزدیکی محل تقاطع تقویت‌کننده‌ها را نشان می‌دهد. در این حالت بیشترین مقدار آسیب-دیدگی المان‌ها در اثر تنش‌های کششی ماتریس و کشیدگی الیاف ایجاد شده است. تصویر 1 در شکل 13 المان‌هایی از سازه که در اثر کشیدگی الیاف دچار آسیب شده‌اند، تصویر 2 المان‌هایی از سازه که در اثر تنش‌های فشاری الیاف دچار آسیب شده‌اند، المان‌هایی از سازه که در اثر تنش‌های کششی ماتریس دچار آسیب شده‌اند در شکل 3 و نهایتاً المان‌هایی از سازه که در اثر تنش‌های فشاری ماتریس دچار آسیب شده‌اند در شکل 4 نشان داده شده‌اند. المان‌های نشان داده شده روی شکل مربوط به لایه‌های مختلف چند لایه می‌باشند.

همان‌طور که در شکل 16 مشاهده می‌شود سطح آسیب دیدگی تا محلی که تقویت‌کننده‌ها حضور دارند گسترش یافته است. در این حالت نیز گسترش سطح شکست توافق بسیار خوبی را با نتایج تجربی نشان می‌دهد.

2-3-8- بررسی زمانی نفوذ پرتابه

بررسی زمانی نفوذ پرتابه در سازه، هنگامی که پرتابه به نزدیکی محل تقاطع تقویت‌کننده‌ها برخورد می‌کند در شکل 17 نشان داده شده است. با توجه به شکل بعد از $4/8e-5$ ثانیه از لحظه برخورد پرتابه با سطح بیرونی استوانه، لایه‌ی داخلی سازه استوانه‌ای تحت تاثیر تنش‌های ناشی از برخورد قرار گرفته است. در شکل 15 نشان داده شد که در این حالت برخورد، عمده تنش‌ها، تنش‌های کششی هستند که در ماتریس و الیاف ایجاد شده‌اند.

همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود سطح آسیب دیدگی تا محلی که تقویت‌کننده‌ها حضور دارند گسترش یافته است. در حقیقت حضور تقویت‌کننده‌ها مانع از گسترش آسیب‌دیدگی از یک سلول به سلول‌های مجاور شده است، شکل 11 همچنین توافق بسیار خوب نتیجه شبیه‌سازی را با نتایج تجربی در نشان دادن شکل شکست نشان می‌دهد.

3-2-8- بررسی زمانی نفوذ پرتابه

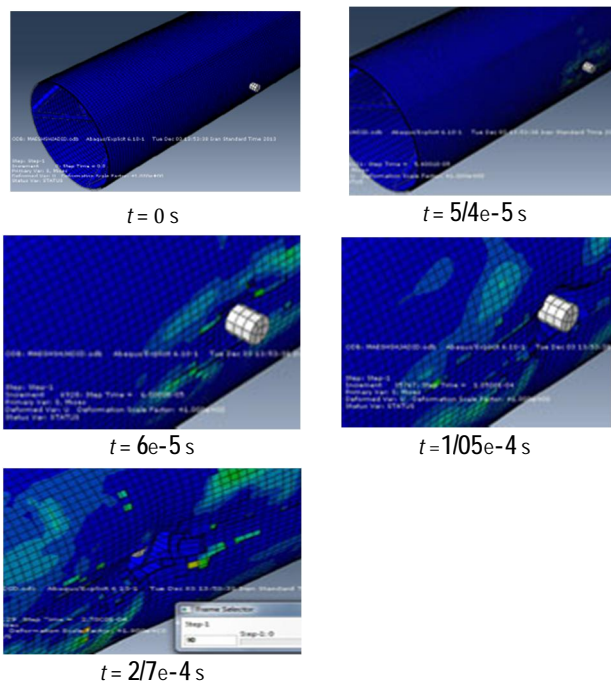
یکی از ویژگی‌های مدل‌سازی عددی مشاهده و استخراج اطلاعات مراحل مختلف تحلیل نظیر تاریخچه تنش، نیرو و سرعت می‌باشد. شکل 12 مراحل مختلف برخورد برای حالت برخورد پرتابه با مرکز یک سلول را نشان می‌دهد. $6e-5$ ثانیه پس از برخورد تعدادی از المان‌ها حذف شده‌اند، المان‌های حذف شده، المان‌هایی هستند که در آنها تنش از حد نهایی مجاز فراتر رفته است لذا در مدل عددی این المان‌ها به عنوان المان از کار افتاده شناسایی شده‌اند و دستور حذف آنها صادر گردیده است. در شکل 10 نشان داده شد که عمده این المان‌ها در زیر محل برخورد پرتابه تحت تاثیر تنش‌های فشاری و در سایر نقاط تحت تاثیر تنش‌های کششی قرار گرفته‌اند. با توجه به این شکل پس از $2/7e-4$ ثانیه پرتابه از سازه خارج شده است.

3-3-8- برخورد در نزدیکی محل تقاطع تقویت‌کننده‌ها

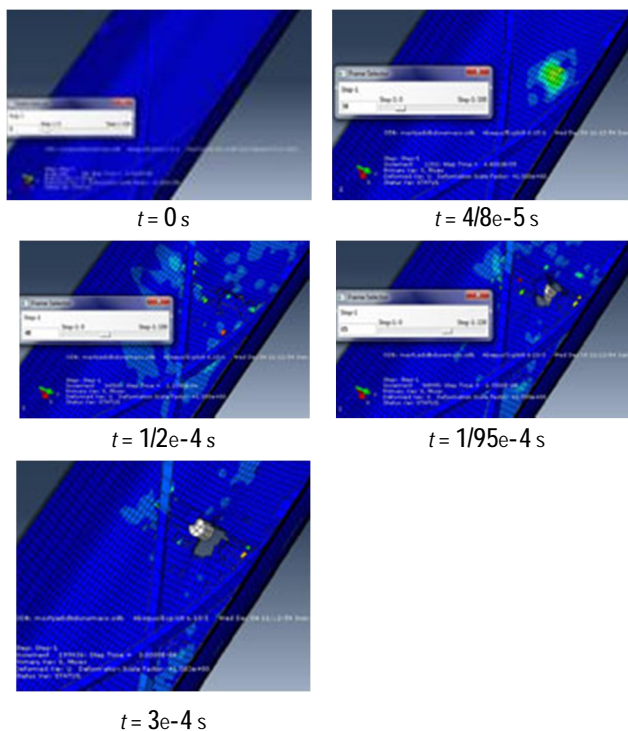
در این بخش نتایج حاصل از برخورد پرتابه به نزدیکی محل تقاطع تقویت‌کننده‌ها ($5/5$ سانتی‌متر) ذکر شده است.

1-3-8- تغییرات سرعت و نیروی پرتابه

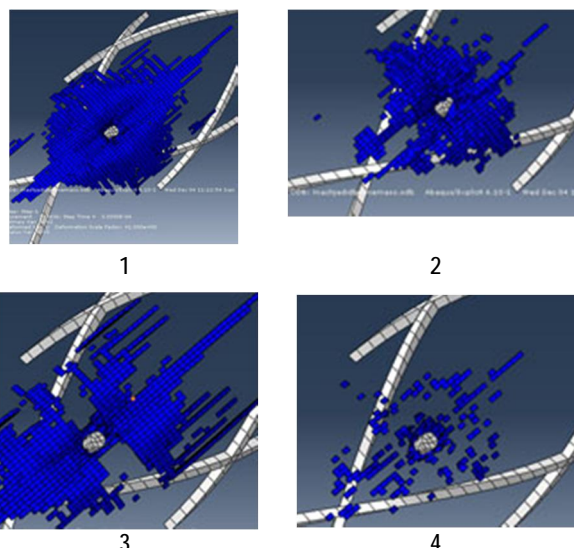
همان‌گونه که در شکل 13 مشاهده می‌شود پرتابه با سرعت 120 متر بر ثانیه از سازه خارج شده است. این سرعت در حالت تجربی 117 متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. با توجه به شکل 14 پرتابه $8/62$ کیلونیوتن نیرو به سازه وارد کرده تا منجر به ایجاد آسیب شود. دومین قله نمودار نشان‌دهنده اثر تقویت‌کننده‌ها می‌باشد.



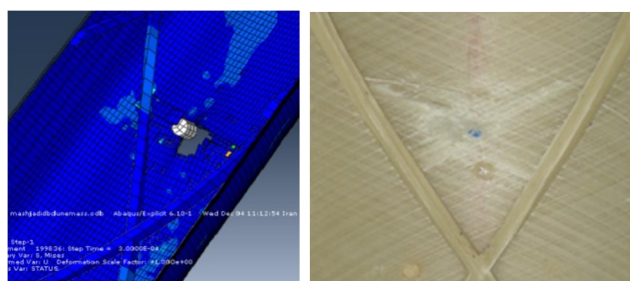
شکل 12 بررسی زمانی نفوذ پرتابه



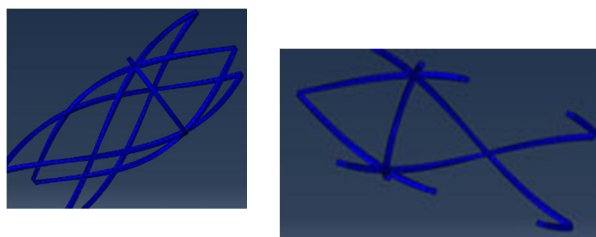
شکل 15 بررسی مکانیزم‌های مختلف آسیب‌دیدگی



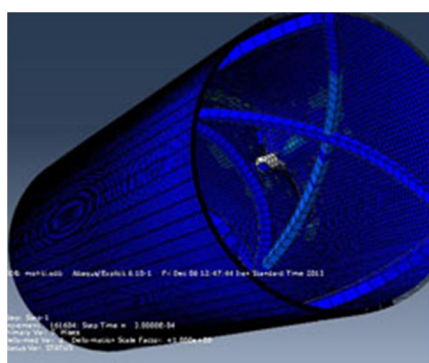
شکل 16 گستردگی سطح آسیب‌دیدگی



شکل 17 بررسی زمانی نفوذ پرتابه



شکل 18 شبکه تقویت‌کننده متشکل از تقویت‌کننده‌های محیطی و طولی



شکل 19 گستردگی سطح شکست

12e-4 ثانیه پس از برخورد المان‌های لایه‌ی درونی حذف شده‌اند، این موضوع نشان‌دهنده رخ دادن یکی از مکانیزم‌های آسیب برای المان‌های مذکور می‌باشد، با این حال با توجه به این شکل پس از 3e-4 ثانیه پرتابه از سازه خارج شده است.

8-4- سازه تقویت‌شده با تقویت‌کننده‌های طولی و محیطی

در قسمت تجربی امکان ساخت سازه مشبک با تقویت‌کننده‌های طولی و محیطی وجود نداشت. با این حال به دلیل صحت سنجی‌های انجام شده در مورد مدل عددی با نتایج تجربی سایر حالات، سازه تقویت‌شده با تقویت‌کننده‌های طولی و محیطی به روش عددی مورد بررسی قرار داده شد. شکل 18 شبکه تقویت‌کننده متشکل از تقویت‌کننده‌های محیطی و طولی را نشان می‌دهد.

سرعت خروجی پرتابه در این حالت 118 متر بر ثانیه محاسبه شد. شکل 17 نشان می‌دهد که در این حالت نیز سطح شکست به بخش مثلثی بین تقویت‌کننده‌ها محدود می‌شود (شکل 19).

تغییرات نیروی پرتابه

با توجه به شکل 20 در این حالت پرتابه 8/78 کیلو نیوتن نیرو به سازه وارد می‌کند تا منجر به ایجاد آسیب شود.

9- مقایسه حالات مختلف

جدول 8 نتایج حالت‌های مختلف شبیه‌سازی عددی و آزمون‌های تجربی را به طور کلی نشان می‌دهد. با توجه به این جدول بیشترین مقدار نیروی پرتابه مربوط به حالت برخورد با پوسته استوانه‌ای ساده (شکل 6) و کمترین مقدار آن به برخورد با پوسته استوانه‌ای تقویت‌شده با تقویت‌کننده طولی که برخورد در نزدیکی محل تقاطع تقویت‌کننده‌ها رخ داده است (شکل 13) مربوط می‌شود.

10- نتیجه‌گیری

در سازه‌های مشبک تقویت‌کننده‌ها برای هر سلول همانند تکیه‌گاه الاستیک عمل می‌کنند، که نتیجه آن کاهش جابجایی سازه در محل برخورد و کاهش تغییر شکل کلی و موضعی سازه می‌باشد.

وجود تقویت‌کننده‌های مجزا، مانع نفوذ ترک از یک سلول به سلول مجاور می‌شود، این ویژگی قدرت تحمل آسیب‌دیدگی سازه را افزایش می‌دهد و سطح شکست فقط تا محلی که تقویت‌کننده‌ها حضور دارند گسترش یافته است. در حقیقت شبکه تعبیه شده منجر به تغییر مسیر بارهای تخریبی در اطراف نقاط آسیب دیده می‌شود.

پدیده‌ی جدایش لایه‌ای در مورد پوسته خارجی و تقویت‌کننده‌ها اتفاق نمی‌افتد. با توجه به روش جدید ساخت در هیچ یک از نمونه‌هایی که تحت بارگذاری ضربه‌ای قرار گرفتند جدایش تقویت‌کننده‌ها از پوسته دیده نمی‌شود.

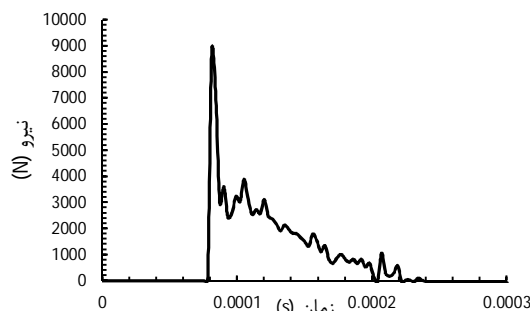
در مقایسه بین حالات مختلف برخورد بیشترین نیروی برخورد مربوط به حالت برخورد با پوسته ساده، سپس پوسته استوانه‌ای تقویت‌شده با تقویت‌کننده طولی که برخورد در مرکز سلول رخ می‌دهد می‌باشد.

پوسته در برخورد با پرتابه‌های کوچک به سرعت سوراخ می‌شود و با کنترل سطح آسیب به وسیله تقویت‌کننده‌ها، استحکام کلی سازه که عمدتاً به وسیله تقویت‌کننده‌ها تامین می‌شود، پس از برخورد حفظ می‌شود.

مدل‌سازی عددی بر مبنای معیارهای شکست پاک و هاشین سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس - اکسپلیسیت (صریح) به دقت توانایی تخمین مکانیزم‌های مختلف آسیب و میزان جذب انرژی سازه را دارا می‌باشد.

11- مراجع

- [1] P. M. Wegner, J. E. Higgins, B. P. Vanwest, APPLICATION OF ADVANCED GRID-STIFFENED STRUCTURES TECHNOLOGY TO THE MINOTAUR PAYLOAD FAIRING, pp. 1-7, 2002.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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. Reinforcement Plastics Composite*, Vol. 29, No. 17, pp. 2568-2575, 2010.
- [5] M. Yazdani, H. Rahimi, A. A. Khatibi, S. Hamzeh, An experimental investigation into the buckling of GFRP-stiffened shells under axial loading, *Science Essay*, Vol. 4, No. 9, pp. 914-920, 2009.
- [6] W. J. Cantwell, J. Morton, Impact perforation of carbon fibre reinforced plastic, *Composites Science Technology*, Vol. 38, No. 2, pp. 119-141, 1990.
- [7] A. H. Sheikh, P. H. Bull, J. A. Kepler, Behaviour of multiple composite plates subjected to ballistic impact, *Composites Science Technology*, Vol. 69, No. 6, pp. 704-710, 2009.
- [8] B. L. Buitrago, C. Santiuste, S. Sánchez-sáez, E. Barbero, C. Navarro, Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact, *Composite Structure*, Vol. 92, No. 9, pp. 2090-2096, 2010.
- [9] S. M. R. M. R. Khalili, M. Soroush, A. Davar, O. Rahmani, Finite element modeling of low-velocity impact on laminated composite plates and cylindrical shells, *Composite Structure*, Vol. 93, No. 5, pp. 1363-1375, Apr. 2011.
- [10] F. A. Ghasemi, K. M. Fard, R. Paknejad, Response of cantilever fiber metal laminate (FML) plates using an analytical- numerical method. *Journal Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No 3, pp. 57-67, 2013. (In Persian)
- [11] 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)
- [12] A. Khodadadi, G. Liaghat, M. Akbari, M. Tahmasebi, Numerical and experimental analysis of penetration into Kevlar fabrics and investigation



شکل 20 تغییرات نیروی پرتابه

همانند نتایج بخش تجربی با نزدیک شدن به محل تقاطع تقویت‌کننده‌ها سازه مقدار انرژی کمتری از پرتابه جذب کرده و پرتابه با سرعت بیشتری از سازه خارج 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 سلول¹ 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 می‌باشد. لذا با توجه به جدول 5 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.

در سرعت نزدیک به سرعت حد بالستیک رفتار سازه متفاوت از برخوردهای با سرعت بالاتر است. در سرعت‌های نزدیک به حد بالستیک، سازه 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.

جدول 8 مقایسه نتایج

ماکزیمم نیروی پرتابه (KN)	سرعت خروجی پرتابه در حالت تجربی (m/s)	سرعت خروجی پرتابه در حالت شبیه‌سازی (m/s)	سرعت ورودی پرتابه (m/s)	
13/6	107	114	139	پوسته استوانه‌ای ساده
11/461	107	114	139	پوسته استوانه‌ای تقویت‌شده با تقویت‌کننده طولی (برخورد در مرکز سلول)
8/62	117	120	139	پوسته استوانه‌ای تقویت‌شده با تقویت‌کننده طولی (برخورد در نزدیکی محل تقاطع تقویت‌کننده‌ها)
8/78	-	118	139	پوسته استوانه‌ای تقویت‌شده با تقویت‌کننده طولی و محیطی

¹. Cell

- [15] a. Puck, J. Kopp, M. Knops, Guidelines for the determination of the parameters in Puck's action plane strength criterion, *Composites Science Technology*, Vol. 62, No. 3, pp. 371–378, Feb. 2002.
- [16] F. Composites and Z. Hashin, Fatigue Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites., Vol. 47, No. June, pp. 329–334, 1980.
- [17] a Puck, J. Kopp, M. Knops, Errata to 'Guidelines for the determination of the parameters in Puck's action plane strength criterion' [Composites Science and Technology 2001;62(3):371–8], *Composites Science Technology*, Vol. 62, No. 9, p. 1275, Jul. 2002.
- of the effective factors on the ballistic performance. *Journal Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No 12, pp. 124–133, 2013. (In Persian)
- [13] I. Ivañez, S. Sanchez-saez, Numerical modelling of the low-velocity impact response of composite sandwich beams with honeycomb core, Vol. 106, pp. 716–723, 2013.
- [14] 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.