



بررسی تجربی استحکام کمانشی پس از ضربه پانل‌های کامپوزیتی مشبک تقویت شده

احمد عطایی¹، حامد احمدی^{2*}، امین فرخ آبادی³

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

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

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 29 تیر 1399

داوری اولیه: 2 شهریور 1399

پذیرش: 25 شهریور 1399

کلیدواژگان:

سازه‌های کامپوزیتی مشبک

کمانش پس از ضربه

ضربه سرعت پایین

سازه‌های مشبک کامپوزیتی بخاطر دارا بودن فوایدی همچون سفتی و استحکام بالا در عین سبکی، کاربرد وسیعی در صنایع هوابیماسازی، خودروسازی و کشتی‌سازی پیدا کرده‌اند. در این تحقیق به بررسی تجربی استحکام کمانشی پس از ضربه پانل‌های تخت کامپوزیتی مشبک پرداخته شده است. برای این منظور پانل مشبک کامپوزیتی تقویت شده با ریب‌های مثلثی با سه ضخامت رویه 6 لایه، 12 لایه و 18 لایه طراحی، ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. برای هر دو تقویت کننده و رویه از الیاف شیشه نوع E و رزین اپوکسی استفاده شده است. نمونه‌های ساخته شده ابتدا تحت آزمایش ضربه سرعت پایین با بهره‌گیری از دستگاه سقوط وزنه قرار گرفتند و سپس آزمایش کمانش در راستای طولی روی نمونه‌ها انجام شد. با استفاده از نتایج بدست آمده مشاهده شد که با افزایش ضخامت رویه، زمانی که نمونه تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، مکانیزم‌هایی چون شکست الیاف، لایه لایه شدگی و ترک ماتریسی، نیرو و میزان انرژی بیشتری می‌طلبد. و علی‌رغم افزایش میزان بیشینه نیرو در نمونه‌های 18 لایه، میزان استحکام بر واحد وزن نمونه‌ها نسبت به نمونه 12 لایه کاهش و نسبت به نمونه با رویه 6 لایه افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نسبت ضخامت تقویت کننده به ضخامت رویه برابر 4 به عنوان نسبت بهینه نتیجه گرفت.

Experimental investigation of buckling after impact strength of grid stiffened composite panels

Ahmad Ataei, Hamed Ahmadi*, Amin Farrokhhabadi

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

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

Article Information

Original Research Paper

Received: 19 July 2020

First Decision: 23 August 2020

Accepted: 15 September 2020

Keywords:

Grid Stiffened Composite panels

buckling After Impact

Low Velocity Impact

Abstract

Composite lattice structures are widely used in the aerospace, automobile and marine industries due to their benefits such as high stiffness and strength with light weight. In this study buckling strength after impact of grid stiffened composite panels was investigated experimentally. For this purpose, grid stiffened composite panels with iso-grid reinforced lattice and three types of skin thickness of 6, 12 and 18 layers were designed, fabricated and tested. E-glass fibers and epoxy resin was used for both ribs and skin. At first, the specimens were subjected to a low velocity impact and then the buckling test was carried out. From results it is concluded that with increasing the thickness of skin, failure mechanisms such as fiber breakage, delamination, matrix cracking consumes more energy. But, by considering the weight, the buckling strength per weight of the specimen was maximum for the specimen with 12 layers for skin.

1- مقدمه

کننده‌ها از پوسته و ترکیبی از حالات فوق، نمونه‌های مختلف آسیب است که برای این نوع سازه‌ها رخ می‌دهد. این سازه‌ها با توجه کاربردهایشان، بارگذاری مختلفی از جمله ضربه را تجربه می‌کنند، به همین دلیل بررسی رفتار کمانشی بعد از ضربه دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای است. از این رو بررسی ضربه و اثرات آن مورد توجه و تحقیق دانشمندان و محققان بوده است. از این رو محققان زیادی بر روی جنبه مختلف این سازه‌ها کار کرده‌اند. گیبسون و همکاران [1] در نتیجه یک بررسی تجربی روی مشخصات جذب انرژی و تخریب پنل‌های کامپوزیتی، ایده

سازه‌های مشبک مجموعه‌ای از نوارهای متصل شده از الیاف به رویه‌ای نازک می‌باشند که کاربرد وسیعی در صنایع هوایی و دریایی و خودروسازی دارند. سازه‌های مشبک کامپوزیتی خواص ویژه‌ای دارند که با داشتن وزن پایین در مقابل نیروهای وارد شده استحکام بالایی را از خود نشان می‌دهند. پاسخ سازه‌های مشبک تحت بار ضربه‌ای یک عامل مهم در طراحی می‌باشد که باید به آن توجه شود. گسیختگی، کمانش و شکست الیاف، ترک خوردگی و شکست زمینه، جدایش لایه‌ها، جدایش تقویت

Please cite this article using:

A. Ataei, H. Ahmadi, A. Farrokhhabadi, Experimental investigation of buckling after impact strength of grid stiffened composite panels, Vol. 7, No. 11, pp. 34- 41, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

عددی اثر تقویت کننده‌های طولی و عرضی ورق‌های کامپوزیت مشبک پرداختند. به این نتایج رسیدند: 1- تقویت کننده‌های طولی اثر بسیار زیادی در استحکام خمشی و اثر بسیار ناچیزی در سفتی مخصوص ورق مشبک دارند. 2- تقویت کننده‌های عرضی باعث کاهش بار بیشینه و سفتی مخصوص نمونه می‌شود. علت آن افزایش ورق در اثر اضافه کردن تقویت کننده‌های عرضی می‌باشد. هوسومورا و همکاران [7] به بررسی واماندگی ورق مشبک با شکل شبکه مثلثی پرداختند. آن‌ها دریافتند که اگر چه کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف از نظر استحکام و مدول ویژه نسبت به فلزات یا مواد بالاتر است، اما این مزیت‌ها در جهت الیاف می‌باشد. لطیفی و همکاران [8] به بررسی تأثیر پارامترهای هندسه سازه‌های مشبک استوانه‌ای کامپوزیتی در رفتار کمانشی پرداختند. در این پژوهش، پارامترهایی از قبیل: مشخصات فیزیکی ماده، ضخامت پوسته زاویه، و ضخامت و تعداد ریب‌ها روی توزیع میدان تنش و بار کمانشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد، افزایش ضخامت پوسته خارجی، 50 درصد افزایش استحکام سازه را در پی دارد و پارامترهای بعدی کاهش زاویه افزایش 30 درصدی بار ویژه را به وجود می‌آورد. یزدانی و رحیمی [9] به صورت تجربی به بررسی استوانه‌های مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری محوری پرداختند. در این تحقیق تعدادی نمونه کامپوزیتی مشبک تقویت شده با الیاف شیشه از نوع E ساخته شدند و تحت بارگذاری محوری قرار گرفتند. نمونه‌ها دارای الگوی مثلثی، لوزی شکل و دارای حلقه محیطی بودند. در این کار، بار مخصوص کمانش سازه بدون تقویت کنند، بیشتر گزارش شد. در سال 2004 چانگ و همکاران [10] به بررسی تحلیل تنش در استوانه‌های ارتوتروپ با گشودگی دایروی و بیضوی پرداختند. نتایج تجربی گزارش شده توسط چانگ حاکی از افزایش ضریب تمرکز تنش در لبه سوراخ بوده و همچنین تمرکز تنش گزارش شده برای سطح داخلی پوسته از سطح بیرونی بیشتر می‌باشد. احمدی و رحیمی [11] نیز به بررسی رفتار سازه‌های مشبک کامپوزیتی تحت بار ضربه سرعت پایین به شکل تجربی و تحلیلی پرداخته‌اند و رابطه‌ای برای تخمین میزان سفتی و استحکام سازه در بارگذاری‌های مختلف ارائه داده‌اند. طبیباتی و همکاران [12] بر روی تاثیر اضافه کردن لایه‌های کامپوزیتی بر جاذب انرژی فلزی استوانه‌ای تحقیق کرده‌اند که نشان می‌دهد تغییر ضخامت لایه‌های کامپوزیتی می‌تواند تاثیر بسزایی در میزان جذب انرژی و کمانش احتمالی جاذب مذکور داشته باشد. عمده کارهای پیشین مربوط به بررسی مقاومت انواع

مشبک کردن سازه تحت بار شبه استاتیکی سه نقطه‌ای به منظور افزایش استحکام آنها را ارائه کردند. همچنین، روشی به منظور مدل سازی چنین ساختارهایی تحت بار شبه استاتیکی را ارائه دادند. نتایج آزمایش و شکل شبیه سازی برای پنل‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک نشان داد که این نوع ساختارها تحمل بالایی در برابر تخریب دارند و بیشترین جذب انرژی پس از شروع تخریب رخ می‌دهد. همچنین مشاهده شد که در حالت بارگذاری در جهت پوسته، سازه بار بیشتری را نسبت به بارگذاری در راستای تقویت کننده تحمل می‌کند. لی در سال 1990 [2] آسیب ضربه بر روی ورق‌های چند لایه و پوسته‌های استوانه‌ای را با تحلیل عددی و تجربی مطالعه کردند. جزئیات آسیب بار ضربه‌ای، با تصویر برداری و نمودارهای شماتیک ارائه شده است. ترک‌هایی در ماتریس در لایه زیرین و لایه لایه شدن در صفحه زیرین در ورق‌ها، و ترک در الیاف لایه بیرونی، و ترک برشی در لایه میانی و لایه لایه شدن در سطوح بالایی در پوسته‌های استوانه‌ای مشاهده شده است. دن وانگ و عبدالله مصطفی [3] به تحلیل و بررسی کمانش محلی و سراسری ورق‌های کامپوزیتی مشبک پرداختند. در این بررسی خواص مسطح شده مطابق با تئوری لمینیت کلاسیک به دست آمده از انرژی کششی سلول‌های سفت و محکم و ترکیبی از مدل‌های پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج شبیه سازی عددی پانل‌های ایزوتروپیک نشان داد که این روش بارهای محلی خمشی پیش‌بینی شده را به خوبی برای بارهای خارج از مرکز یا متقارن با سفتی پیچشی متفاوت نشان می‌دهد. روش پیشنهادی با استفاده از پیکربندی نمونه کامپوزیتی پانل‌های مسطح و سیلندرهای دایره‌ای معتبر است. هانگ و شیخ [4] تأثیر یک المان محدود برای تجزیه و تحلیل کمانش ورق‌های کامپوزیتی مشبک را مورد بررسی قرار دادند. برای پیش‌بینی پاسخ کمانش پانل‌های کامپوزیتی مشبک که دارای ترتیبات مختلف سخت شدن هستند، یک تکنیک مدل سازی کارآمد المان محدود ارائه شده است. پوسته لمینت از ساختار سفت شده با المان پوسته منحنی مثلثی مدل سازی شده است. آن‌ها روش تکنیک‌های محدود را برای ارزیابی عملکرد پیشنهاد دادند و نشان دادند مدل پیشنهادی کاملاً رضایت‌بخش است. محمد هدایتیان و همکاران [5] به بررسی تجربی پاسخ کامپوزیت‌های مشبک استوانه به ضربه بالستیک پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که وجود ریب‌های مجزا، مانع از گسترش سطح شکست از یک سلول به سلول مجاور می‌شود و پوسته در برخورد با اجسام ریز سوراخ نمی‌شود. شاهقلیان و همکاران [6] به بررسی تجربی و

تحت آزمایش قرار گرفت. ضربه زننده از جنس فولاد سختکاری شده با نوک کرومی و شعاع 20 میلی‌متر می‌باشد. نمونه را با فیکسچر به کف دستگاه به صورتی که سطح ضربه زننده به مرکز نمونه اصابت کند با بستن پیچ‌هایی ثابت شد. آزمون ضربه اولیه با دو وزنه و ارتفاع سقوط متفاوت انجام شد. آزمون ضربه 100 ژول با رهاکردن وزنه 6 کیلوگرمی از ارتفاع 200 سانتی‌متری به انجام رسید و آزمون ضربه 200 ژول با رهاکردن وزنه 41 کیلوگرمی از ارتفاع 50 سانتی‌متری انجام شد.

3-2- آزمون کمانش

آزمون کمانش توسط دستگاه موجود در آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس (شکل 2) صورت گرفته است. ابتدا نمونه با نگهدارنده به دستگاه ثابت شد. سپس نمونه تحت فشار تا مرحله شکست ریب و آسیب پوسته ادامه یافت تا نمودار نیرو-جابجایی حاصل گردد و با استفاده از داده‌های بدست آمده می‌توان استحکام فشاری سازه‌های کامپوزیتی مختلف را مقایسه کرد. این آزمون برای نمونه‌های ضربه خورده و نمونه سالم از هر نوع 3 نمونه تکرار شد.

جدول 1 مشخصات هندسی نمونه‌ها

Table 1 Specification of Specimens

کد نمونه	تعداد لایه رویه	ضخامت کل پانل (mm)	ضخامت رویه (mm)	ابعاد نمونه‌ها (mm ²)
A	6	6/7	0/7	250 × 250
B	12	7/5	1/5	250 × 250
C	18	8/5	2/5	250 × 250



Fig. 1 Drop weight apparatus

شکل 1 دستگاه سقوط وزنه

سازه‌های کامپوزیتی مشبک با هندسه مختلف از ساختار تقویت کننده است ولی تاکنون در مورد رفتار این سازه‌ها پس از ضربه پژوهشی انجام نشده است. از اینرو در این کار استحکام فشاری پس از ضربه سازه‌های مشبک کامپوزیتی تخت با تقویت کننده‌های مثلثی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. سازه‌ها در چند سری طراحی و ساخته شده و مورد آزمون ضربه و فشار قرار گرفتند و علاوه بر تعیین استحکام آنها، مکانیزم‌های موثر در میزان جذب انرژی و کاهش خرابی بر اثر ضربه مورد بررسی دقیقی قرار گرفته است.

2- مواد و تجهیزات استفاده شده

به منظور ایجاد فاز زمینه (ماتریس) کامپوزیت، در ریب‌ها و پوسته‌ها از رزین ML 506 و سخت کننده HA-11 با چگالی 1110 کیلوگرم بر مترمکعب در دمای اتاق استفاده شده است. علت انتخاب این رزین و سخت کننده، مرسوم بودن آن در بازار، قیمت مناسب، ثبات در کیفیت محصول تولید شده در زمان‌های مختلف و همچنین سرعت مناسب پخت در دمای اتاق می‌باشد. بنابراین، جهت فرآیند پخت، نیاز به کوره ندارد. نسبت ترکیب رزین طبق کاتالوگ شرکت سازنده 100 به 15 بوده و ظرف مدت هفت روز، رزین به بالاترین مقدار استحکام خود می‌رسد. جهت ساخت ریب‌های شبکه‌ای، از الیاف رووینگ شیشه از نوع ای-گلس با چگالی 2400 گرم بر متر مکعب به عنوان تقویت کننده استفاده شده است. جهت ساخت پوسته‌های کامپوزیتی از الیاف پارچه شیشه‌ای ای-گلس با چگالی 100 گرم بر متر مکعب استفاده شده است. علت استفاده از الیاف شیشه در این پژوهش، استحکام و سفتی مناسب این نوع از الیاف می‌باشد، به طوری که درصد بالایی از الیاف مورد استفاده در کامپوزیت‌ها از جنس شیشه می‌باشد. لازم به ذکر است برای ساخت رویه از 6، 12 و 18 لایه پارچه و برای ساخت تقویت کننده‌ها از 8 رشته الیاف استفاده شده است. به منظور ساخت ریب‌ها در اشکال هندسی مختلف از قالب‌های سیلیکونی استفاده شده است. شکل هندسه ریب‌ها به صورت مثلثی (ایزوگراید) 60 درجه می‌باشد که از هرکدام حداقل سه نمونه تحت آزمون ضربه و فشار پس از ضربه قرار گرفته‌اند. مشخصات هندسی نمونه‌ها در جدول 1 آورده شده است.

3- آزمون‌های تجربی

3-1- آزمون ضربه سرعت پایین (DROP WEIGHT)

آزمون ضربه توسط دستگاه سقوط وزنه با ظرفیت 2000 ژول (شکل 1) صورت گرفته است. از هر نوع سه نمونه طبق جدول 1

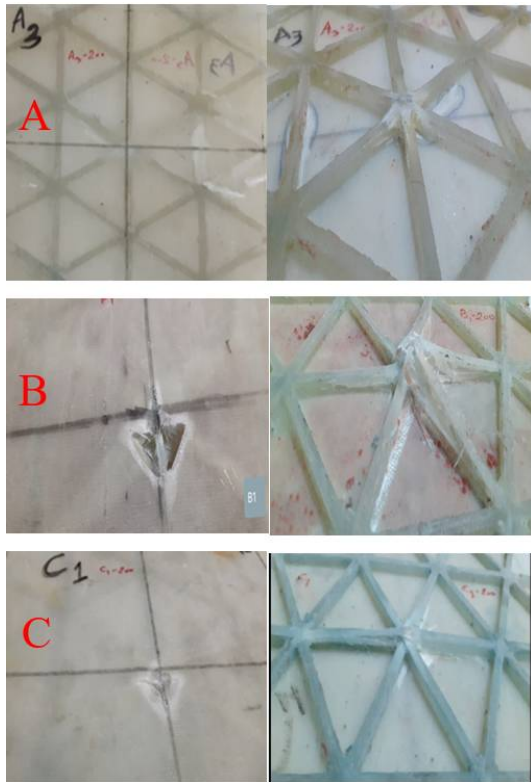


Fig. 3 Failure of grid stiffened composite plates after 100J impact
 شکل 3 تصویر محل شکست نمونه‌ها در اثر ضربه 100 ژول

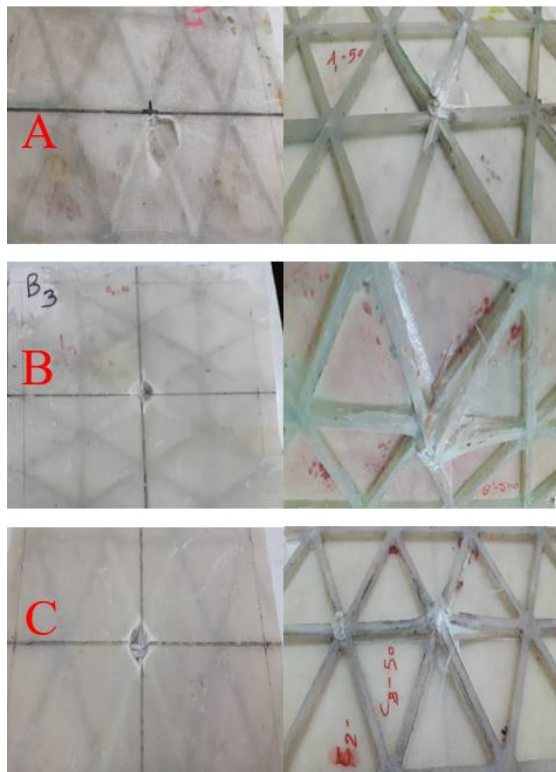


Fig. 4 Failure of grid stiffened composite plates after 200J impact
 شکل 4 تصویر محل شکست نمونه‌ها در اثر ضربه 200 ژول

در حین تست ضربه نفوذ ضربه زننده مشاهده گردید که این نتایج در شکل 4 نشان داده شده است. در این آزمون نحوه



Fig. 2 Buckling Test Apparatus

شکل 2 دستگاه تست کمانش

4- نتایج و بحث

4-1- ضربه سرعت پایین

در این بخش نتایج آزمون ضربه 100 و 200 ژول روی سه نوع نمونه که آزمون ضربه بر روی آنها انجام شده، ارائه می‌شود. میزان تخریب در نمونه‌های A و B و C در شکل‌های 3 و 4 دیده می‌شود.

به منظور بررسی اثر ضربه سه نوع نمونه A، B و C از هر کدام سه نمونه با وزنه 6 کیلوگرمی معادل 100 ژول ضربه از ارتفاع 200 سانتی‌متری تحت تست ضربه قرار گرفتند. آسیب محسوس در هر سه نمونه قابل مشاهده است. در حالت کلی سه مکانیزم شکست رویه، شکست ریب و جدایش ریب از رویه را میتوان به عنوان مکانیزم‌های اصلی شکست نمونه‌ها در نظر گرفت که در هر سه نمونه تست شده در این آزمون دیده می‌شود. در چند نقطه از سازه جداسازی (ریبه از ریب) دیده می‌شود و در حین تست، برگشت پذیری ضربه زننده به حالت الاستیک دیده شد. البته جداسازی ریب از رویه در نمونه A بیشتر از دو نمونه دیگر گسترش یافته است و در نمونه‌های B و C محدود به ناحیه شش گره اطراف گره مرکزی است. نفوذ ضربه زننده مشاهده نگردید و به دلیل فرو رفتن پوسته به داخل (به سمت ریب‌ها) الیاف تحت نیروی کشش در اطراف ضربه دچار آسیب و شکست شدند.

در آزمون 200 ژول، وزنه 41 کیلوگرمی از ارتفاع 50 سانتی‌متری رها شده است. هر سه نمونه A و B و C در این تست دچار شکست شدید شده و در چند نقطه از سازه جداسازی (پوسته از ریب) دیده می‌شود.

کننده‌ای در طراحی خواهد بود. بنابراین برای تعیین سازه برتر بایستی وزن را در بار بیشینه دخیل کرد. در جدول 2 مقادیر نیرو بر واحد وزن هر سازه استخراج شده است که نشان می‌دهد این مقدار برای سازه B با نسبت ضخامت تقویت کننده به رویه برابر 4 از دو سازه دیگر بیشتر است. این نتیجه به این موضوع دلالت می‌کند که اگرچه افزایش رویه می‌تواند استحکام کلی سازه را افزایش دهد ولی افزایش بیش از حد آن در مجموع کارایی سازه را به عنوان یک سازه سبک و مستحکم از دست خواهد داد.



Fig. 5 Failure of impacted plate under compression loading

شکل 5 شکست نمونه ضربه خورده تحت آزمون فشار

جدول 2 نتایج آزمون کمانش پس از ضربه 100 ژول

Table 2 Buckling test results after 100 J impact

C	B	A	نمونه
4/628	3/749	2/777	بار بیشینه (KN)
264	206	163	وزن نمونه (g)
2/40	4/00	8/57	نسبت ضخامت تقویت کننده به ضخامت رویه
4/91	4/93	4/84	جابجایی در بار بیشینه (mm)
17/53	18/20	17/04	نسبت نیرو به وزن (N/g)

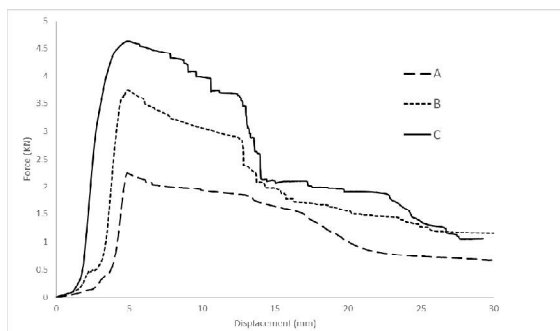


Fig. 6 Load-displacement curve of buckling test after 100 J impact

شکل 6 نمودار نیرو-جابجایی نتایج آزمون کمانش پس از ضربه 100 ژول

آسیب در هر سه نمونه یکسان است (جدایش ریب از رویه در ناحیه مرکزی و شکست رویه و ریب‌ها در نقطه مرکزی که ضربه به آنجا وارد شده است) با این تفاوت که میزان شکست و طول ترک در رویه برای نمونه A بیشتر از نمونه B و هر دو بیشتر از نمونه C می‌باشد.

2-4- آزمون کمانش پس از ضربه

به منظور بررسی تجربی رفتار کمانشی نمونه‌ها سه نمونه A, B, C (ضربه خورده و بدون ضربه) تحت آزمون کمانش قرار گرفتند که به مقایسه و بررسی آنها طبق شکل‌ها و مشاهدات پرداخته شده است. رفتار سازه‌ها در این آزمون کم و بیش شبیه هم بودند. بدین ترتیب که ابتدا مکان‌های آسیب پذیر پوسته (الیاف تحت نیروی فشاری) که مهم ترین نقاط در مرکز و نزدیک فیکسچر دچار چروکیدگی شده و جدایش بین ریب و رویه صورت می‌گیرد. سپس بار تا جایی افزایش می‌یابد که ریب‌های عمودی دچار شکست شده و پس از آن ریب‌های در زوایای 60 و 120 درجه خواهند شکست. نمونه‌های سالم چون دچار آسیب نشده تحمل بار فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های ضربه خورده داشتند و دیرتر دچار شکست ریب و پوسته شدند. نهایتاً بعد از شکست ریب‌ها پوسته دچار واماندگی و شکست شده که در شکل 5 نشان داده شده است.

3-4- بررسی اثر ضخامت رویه بر مقاومت کمانشی

نتایج بدست آمده از آزمون کمانش پس از ضربه 100 ژول، در جدول 2 و همچنین نمودار شکل 6 آمده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت پوسته شیب نمودار کمانش و حداکثر نیرو افزایش می‌یابد. در عین حال جابجایی در بار بیشینه تغییری نمی‌کند. علت عدم تغییر این پارامتر را میتوان در مکانیزم شکست اصلی که همان شکست ریب از مرکز نمونه است جستجو کرد. از آنجا که شبکه تقویت کننده در تمام نمونه‌ها یکسان است، جابجایی در بار بیشینه نیز یکسان خواهد بود. البته نمی‌توان از نقش رویه و مکانیزم‌های تخریب مرتبط با آن چشمپوشی کرد. مکانیزم‌هایی چون شکست الیاف، لایه لایه شدگی در ناحیه مرکزی نمونه به وضوح دیده می‌شود که با افزایش ضخامت رویه این میزان نیز بیشتر است.

بر اساس نتایج تجربی، وجود اندرکنش بین رویه و ریب اجتناب ناپذیر بوده و علی‌رغم اینکه بار اصلی روی سازه را ریب تحمل میکند، رویه نیز قسمتی از بار را تحمل خواهد کرد. از آنجا سازه مورد بررسی یک سازه کامپوزیتی است، وزن سازه پارامتر تعیین

همان‌طور که مقایسه نتایج تجربی دو نمونه ضربه خورده (200 ژول و 100 ژول ضربه) و یک نمونه ضربه نخورده با ضخامت‌های یکسان نشان می‌دهد، نمونه‌ای که تحت تست ضربه قرار نگرفته است نسبت به نمونه‌های آسیب دیده میزان نیروی بیشینه و همچنین جذب انرژی (سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی) بالاتری را از خود نشان می‌دهد.

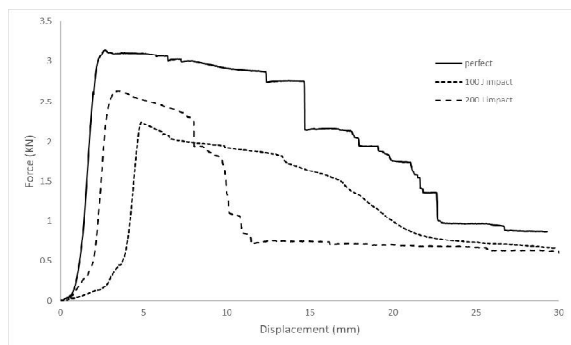


Fig. 8 Load-displacement curve of buckling test for specimen A

شکل 8 نمودار نیرو-جابجایی نتایج آزمون کمانش برای نمونه A

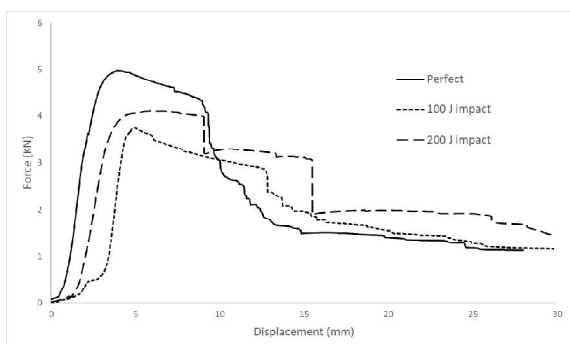


Fig. 9 Load-displacement curve of buckling test for specimen B

شکل 9 نمودار نیرو-جابجایی نتایج آزمون کمانش برای نمونه B

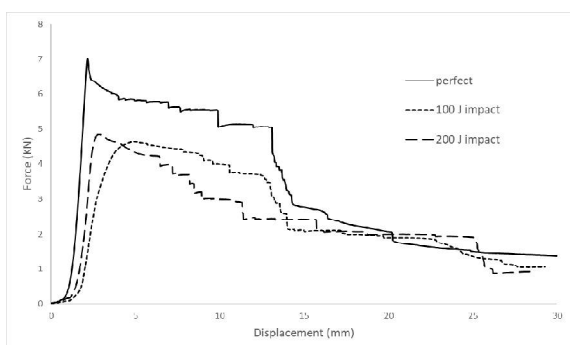


Fig. 10 Load-displacement curve of buckling test for specimen C

شکل 10 نمودار نیرو-جابجایی نتایج آزمون کمانش برای نمونه C

در واقع در تست‌های ضربه با برخورد ایندنتور با نمونه کامپوزیتی در ابتدا شکست ماتریسی اتفاق می‌افتد و سپس با پیش روی ایندنتور، لایه لایه شدگی پنل‌های کامپوزیتی مشاهده می‌شود و با پیشروی ایندنتور شکست الیاف و سوراخ

جدول 3 نتایج آزمون کمانش پس از ضربه 200 ژول

Table 3 Buckling test results after 200 J impact

C	B	A	نمونه
4/828	4/111	2/634	بار بیشینه (kN)
264	206	163	وزن نمونه (g)
2/40	4/00	8/57	نسبت ضخامت تقویت کننده به ضخامت رویه
3/88	4/13	3/68	جابجایی در بار بیشینه (mm)
18/29	19/96	16/16	نسبت نیرو به وزن (N/g)

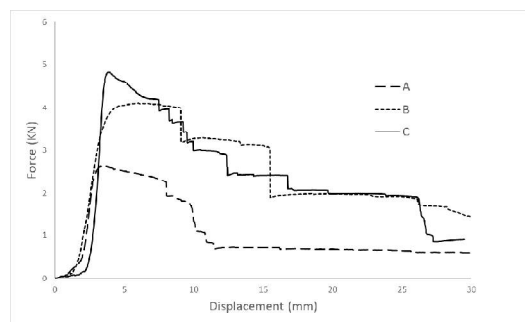


Fig. 7 Load-displacement curve of buckling test after 200 J impact

شکل 7 نمودار نیرو-جابجایی نتایج آزمون کمانش پس از ضربه 200 ژول

بر اساس نتایج تجربی بدست آمده از جدول 3، نتایج مقایسه ای برای نمونه‌ها، در سطح انرژی (200 ژول) نیز مثل نمودار (100 ژول) بوده است و همانند نمونه‌های پیشین افزایش ضخامت منجر به افزایش چشمگیر میزان نیروی بیشینه و جذب انرژی شده است (شکل 7). با این تفاوت که چون سرعت ضربه در این سطح انرژی کمتر از قبل بوده و اماندگی و شکست بعد از ضربه کمتر و آسیب بیشتر در مرکز نمونه بوده و نمونه‌ها بار بیشینه بیشتری را نسبت به قبل تحمل می‌کنند. علت این امر را می‌توان در این امر دانست که با توجه به اینکه بارگذاری به صورت نقطه‌ای می‌باشد با کاهش سرعت، توان ایندنتور برای سوراخ کردن نمونه و شکستن پیوند بین فایبرها کمتر بوده و در نتیجه نیازمند نیروی بیشتر (یا افزایش سرعت) جهت سوراخ کردن نمونه‌ها می‌باشد و در نتیجه میزان آسیب نمونه‌ها کمتر بوده و در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های با سطح انرژی پایینتر، آسیب کمتری دیده می‌شود. لازم به ذکر است در هر سه نمونه ساخته شده در اثر ضربه ریب‌ها دچار شکستگی شده ولی میزان آسیب ریب‌های تقویت کننده برای این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های با سطح انرژی پایینتر، کمتر بوده است.

4-4- تأثیر میزان انرژی ضربه بر کاهش استحکام

شکل‌های 8 تا 10 نمودار نیرو - جابجایی را برای برای نمونه‌های یکسان ولی تحت بارگذاری ضربه‌ای متفاوت را نشان می‌دهند.

استفاده شده است. نوع مکانیزم‌های آسیب مشاهده شده در نمونه‌ها پس از ضربه‌های 100 و 200 ژول تغییری نمی‌کند. در تمام نمونه‌ها شکست الیاف در رویه‌ها و تقویت کننده‌ها زیر نوک ضربه زنده دیده می‌شود ولی در ضربه 100 ژول میزان جدایش بین رویه و شبکه تقویت کننده از ناحیه مرکزی فراتر رفته و در بعضی نقاط تا لبه فیکسچر نیز ادامه پیدا کرده است. این افزایش برای نمونه A بیشتر از نمونه B است و برای نمونه C تقریباً تفاوتی نکرده است.

- با افزایش ضخامت رویه میزان استحکام کمانشی و انرژی جذب شده افزایش می‌یابد ولیکن جابجایی در حداکثر نیرو ثابت است.

- نسبت ضخامت بهینه برای حداکثر کردن پارامتر نیروی بیشینه بر حسب واحد وزن متعلق به نمونه B با مقدار 4 است.

- به دلیل افزایش میزان جدایش بین رویه و تقویت کننده در ضربه 100 ژول، میزان استحکام کمانشی هر نمونه نسبت به نمونه ای که ضربه 200 ژول به آن اعمال شده است، کمتر شده است ولی این میزان برای نمونه C که مقدار آسیب یکسان بوده، تفاوتی دیده نمی‌شود.

6- مراجع

- [1] Gan, C. Gibson, R. F. and Newaz, G M, "Analytical /Exoermental investigation of Energy Absorption in Grid- stiffened compsite Structures Under T Ransverse Loding", Experimental mechanics, Vol. 44, No. 2, pp. 185-194, 2004.
- [2] Ll. G, and cheng, J, "A Generalized Analytical Modelng Of Grid stiffened compsite Structures" Jorurnal of composite Materials, Vol. 41, No. 24, pp. 2939-2969, 2007.
- [3] Dan Wang. Mostafa M Abdalla "Global and local bucklng analysis of grid -stiffened composite Panels", Delft University of TEchology, 2629 HS Delft, The Netherlands.
- [4] Liang Huang, Abdul H.Sheikh, "An efficient finite element model for buckling analysis of grid stiffened laminated composite plates", School of Civil, Environmetal and Mining Engineering, University of Adelaide, Australia
- [5] M. Hedayatian, Gh. Liaghat, Gh. Rahimi, 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)
- [6] V. Tahani, D. Shahgholian Ghahfarokhi, Gh. H. Rahimi, Experimental and numerical investigation of effect of shape of ribs on flexural behavior of grid composite plates, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 303-311, 2016 (in Persian)

شدن نمونه‌ها را در پی خواهد داشت که در نهایت بسته به سطح انرژی که ایندنتور از آن رها گشته، شاهد آسیب به ریب‌های تقویت کننده خواهیم بود. ذکر این نکته ضروری است که در نمونه با سطح انرژی پایین تر علاوه بر آسیب در محل تماس ایندنتور و نمونه کامپوزیتی سایر نقاط که در فاصله دورتری نسبت به محل آسیب بوده اند نیز شاهد آسیب جدایش رویه از تقویت کننده بوده اند. براینکه تمام این آسیب‌ها منجر به کاهش استحکام و همچنین تمرکز تنش در نواحی آسیب می‌گردد. زمانی که نمونه پس از تست ضربه مجدداً تحت بارگذاری قرار می‌گیرد این آسیب‌های بوجود آمده منجر به تمرکز تنش و افت خواص می‌گردد و نمونه آسیب دیده نسبت به نمونه سالم راحت تر دچار واماندگی می‌گردد و هرچه میزان آسیب بیشتر باشد این واماندگی راحتتر اتفاق می‌افتد. لذا بر اساس توضیحات مذکور، افت ایجاد شده در میزان نیروی بیشینه و همچنین جذب انرژی برای نمونه‌های آسیب دیده نسبت به نمونه سالم قابل توجیه است.

همان‌طور که نتایج تجربی برای نمونه‌های سالم (نمونه‌هایی که تحت تست ضربه قرار نگرفته‌اند) نشان می‌دهد، در تست کمانش با افزایش ضخامت نمونه شاهد افزایش میزان بار بیشینه و همچنین جذب انرژی (سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی) بوده ایم. در واقع افزایش ضخامت منجر به افزایش ضریب لاغری می‌گردد و نمونه در نیروی بالاتری دچار واماندگی می‌گردد و این افزایش ضریب لاغری میزان نیروی بیشینه را تا حدود 2/3 برابر نسبت به نمونه دارای کمترین ضخامت افزایش داده است. لازم به ذکر است این افزایش ضخامت باعث می‌شود نمونه در جابجایی بالاتر دچار واماندگی گردد که براینکه افزایش نیروی بیشینه و به تعویق افتادن واماندگی باعث افزایش میزان جذب انرژی که همان سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی بوده است، شده است.

5- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، رفتار کمانشی پس از ضربه سازه‌های مشبک کامپوزیتی تخت مورد بررسی قرار گرفته است. سازه‌های مورد بررسی از الیاف شیشه و رزین اپوکسی ساخته شده و ابتدا تحت آزمون ضربه سرعت پایین با دو انرژی متفاوت 100 و 200 ژول قرار گرفته‌اند و سپس آزمون کمانش شبه استاتیک روی آنها انجام گرفته است. با توجه به تحلیل تجربی صورت گرفته و آنالیز اعداد بدست آمده نتایج زیر حاصل شده است.

- در اعمال ضربه 100 ژول از جرم کمتر ولی سرعت بالاتر

- September, 2009.
- [10] Chung-Hyun Ryu et al., A Study on Stress Analysis of Orthotropic Composite Cylindrical Shells with a Circular or an Elliptical Cutout., KSME International
- [11] Ahmadi, H. and Rahimi, G.H., "Analytical and experimental investigation of transverse loading on grid stiffened composite panels", Composites Part B, Vol. 159, pp. 184-198, 2019.
- [12] M. Tayyebati, H. Ahmadi, Gh. Liaghat, Experimental and numerical investigation on crushing of metal-composite hybrid energy absorber under a quasi-static loading, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 8, pp. 54-66, 2019 (in Persian)
- [7] Hosomora, T. Kawashima, t. and Mori, D, "New CFRP Structural Elements", Composite materials: Mechanics, mechanical propertis and fabrication, pp. 447-452, 1981.
- [8] S.A. Latifi, Rostami, R. Akbari Alashti, A. Kolahdooz, "Geometrical Parameters of Cylindrical Composite Lattice Structures on Buckling Behavior In Persian Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering, Volume:8 Issue: 3, 2016
- [9] M. Yazdani, Gh. Rahimi, A.A. Khatibi, S. Hamzeh, An experimental investigation into the buckling of GFRP stiffened shells under axial loading, Scientific Research and Essay Vol. 4 (9), pp. 914-920,