



بررسی مقاومت به ضربه پانل ساندویچی با رویه بازالت و رویه هیبریدی بازالت-کولار با لحاظ نانو سیلیکا

محسن حافظی¹، مهدی یارمحمدتوسکی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران.

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران.

* تهران، صندوق پستی 11365-4435، m_yarmohammad@azad.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله تأثیر نانو سیلیکا بر مقاومت به ضربه پانل‌های ساندویچی با رویه بازالت و پانل‌های ساندویچی با رویه هیبریدی بازالت و کولار بررسی شده است. پانل‌های ساندویچی با رویه بازالت شامل چهار لایه پارچه بازالت به عنوان رویه بالایی و پایینی که هسته فوم بین آن قرار دارد. پانل ساندویچی با رویه هیبریدی از چهار لایه پارچه بازالت/کولار/کولار/بازالت به عنوان رویه بالایی و پایینی ساخته شده که هسته فوم ما بین آنها قرار دارد. از پارچه‌های کولار با چگالی 200 گرم بر متر مربع، پارچه بازالت با چگالی 350 گرم بر متر مربع، فوم پلی اورتان با چگالی 140 گرم بر سانتی متر مربع، رزین اپوکسی EPR1080 و درصدهای وزنی مختلف نانو سیلیکا برای ساخت نمونه‌های پانل ساندویچی استفاده شده است. فرآیند ساخت نمونه‌های آزمایش با روش لایه‌گذاری دستی انجام گرفت. همچنین برای پخش و توزیع بهتر ذرات نانوسیلیکا در ماتریس اپوکسی از دستگاه آلتراسونیک استفاده شد. آزمایش‌های ضربه سرعت پایین با استفاده از دستگاه وزنه افتان با انرژی ضربه ثابت بر روی نمونه‌ها انجام گردید. نتایج نشان داد افزودن نانو به پانل ساندویچی سبب بهبود مقاومت به ضربه می‌شود و بیشترین نیروی تماسی ماکزیمم مربوط به پانل ساندویچی با 1/1% نانوسیلیکا می‌باشد.

دریافت: 1398/10/30

پذیرش: 1399/11/10

کلیدواژگان:

پانل ساندویچی هیبریدی
نانو سیلیکا
ضربه سرعت پایین
کولار
بازالت

An investigation of impact resistance of sandwich panel with basalt skin and basalt/Kevlar hybrid skin with nano silica

Mohsen Hafezi, Mehdi Yarmohammad Tooski*

Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 11365-4435, Tehran, Iran, m_yarmohammad@azad.ac.ir

Keywords

Hybrid sandwich panel
Nano silica
Low velocity impact
Kevlar
Basalt

Abstract

In this paper, the effect of nano silica on impact resistance of sandwich panels with basalt skin and hybrid sandwich panel with basalt and kevlar skin is investigated. Sandwich panels with a basalt skin consist of four layers of basalt fabric as the top and bottom skins which the foam core is located between them. Sandwich panels with a hybrid skin consist of four layers of basalt/Kevlar/Kevlar/basalt fabric as the top and bottom skins which the foam core is located between them. Kevlar fabrics with a density of 200 g /m², basalt fabrics with a density of 350 g /m², a polyurethane foam with a density of 140 g/cm³, EPR1080 epoxy resin and different weight percentages of nano silica were used to make sandwich panels. All panels are fabricated using Hand Lay-up method. Ultrasonic device was also used for homogenization and better dispersion of nano silica in epoxy matrix. Low velocity impact tests were performed using drop weight equipment at constant impact energy on the specimens. The results showed that the addition of nano into the sandwich panel improved the impact resistance and the maximum contact force is related to the sandwich panel with 1.1% nano silica.

1- مقدمه

عین حال استحکام بالایی دارند و در واقع سازه‌هایی با نسبت استحکام به وزن بالا می‌باشند. علی‌رغم سبکی فوق العاده پانل‌های ساندویچی، این سازه‌ها مقاومت فوق العاده‌ای در برابر انواع بارهای فشاری و ضربه‌ای دارند. این پانل‌ها نیروی وارده را به خوبی جذب کرده و مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند. این پانل‌ها با توجه به نوع کاربردی که دارند تحت بارگذاری‌های مختلفی قرار می‌گیرند. این بارگذاری‌ها ممکن است پیش بینی شده یا پیش بینی نشده باشند.

پانل‌های ساندویچی ساختاری سبک و مرکب دارند که از دو طرف به دو رویه کامپوزیتی محدود شده است و در وسط آن یک هسته سبک و ضخیم با شکل‌ها و جنس‌های مختلف قرار دارد. در یک پانل ساندویچی تحت بارگذاری استاتیکی، خمش اعمال شده به سازه توسط رویه‌ها و برش توسط هسته تحمل می‌شود. پانل‌های ساندویچی، سازه‌هایی هستند که وزن کم و در

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Hafezi, M., Yarmohammad Tooski, M., "An investigation of impact resistance of sandwich panel with basalt skin and basalt/Kevlar hybrid skin with nano silica", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1145-1152, 2021.

بررسی تاثیر افزودن نانو لوله کربنی بر کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف بافته شده شیشه پرداختند. نتایج نشان داد بیشترین افزایش استحکام تنش تسلیم به ازای 0/5 درصد نانو کربنی و بیشترین افزایش جذب انرژی نفوذ پرتابه سرکاری به ازای 1/5 درصد اتفاق افتاده است. پایگانه و همکاران [9] به تحلیل ورق ساندویچی با رویه‌های چند لایه مرکب و هسته هوشمند مگنتورئولوژیکال تحت ضربه سرعت پایین پرداختند. مشخص شد که با تغییر شدت میدان مغناطیسی هسته میانی، می‌توان مقدار سفتی، ضریب استهلاک سازه‌ای و ماکزیمم نیروی برخورد را تغییر داد و کنترل کرد. فرکانس طبیعی با افزایش شدت میدان مغناطیسی افزایش پیدا کرد. علوی نیا و همکاران [10] به بررسی تحلیلی ضربه سرعت بالا بر روی پانل‌های ساندویچی با هسته فوم رویه‌های آلومینیومی پرداختند. نتایج نشان داد که چگالی هسته فومی پارامتر مهمی در تعیین سرعت باقیمانده پرتابه در برخورد با پانل ساندویچی می‌باشد به طوری که افزایش چگالی منجر به کاهش آن می‌گردد. ملک زاده فرد و همکاران [11] به تحلیل کماتش پانل کامپوزیتی ساندویچی با هسته میانی هدفمند متقارن به‌روش تئوری مرتبه بالای بهبود یافته پرداخته‌اند. نتایج عددی نشان داد که در هسته‌های ضخیم هدفمند نمی‌توان از اثرات تنش‌های صفحه‌ای روی بار بحرانی کماتش صرف نظر کرد. همچنین نوع تابع توزیع خواص و عدد توان توزیع در نظر گرفته شده در هسته هدفمند تاثیرات قابل ملاحظه ای روی بار بحرانی کماتش پانل دارد. پیرمحمدی و همکاران [12] به بررسی تحلیلی، تجربی و عددی سازه ساندویچی با هسته لانه زنبوری و رویه‌های کامپوزیتی تحت ضربه پرتابه پرداختند. با توجه به نتایج به دست آمده از روش‌های عددی و تحلیلی و مقایسه آنها با روش تجربی نشان داده شده است که اختلاف میان نتایج کم است و در نتیجه نتایج به دست آمده قابل قبول می‌باشند. حسن پور رودبند و همکاران [13] به بررسی تجربی برهم کنش رویه‌های آلومینیومی با هسته لانه زنبوری در سازه پانل ساندویچی در نفوذ شبه استاتیکی و دینامیکی پرداخته‌اند. نتایج آزمایش نفوذ شبه استاتیکی نشان می‌دهد مجموع انرژی جذب شده در دو رویه و سازه لانه زنبوری کمتر از حالتی است که این اجزا به شکل ساندویچ مورد استفاده قرار می‌گیرند در واقع انرژی جذب شده پانل ساندویچی در مقایسه با این مجموعه 42% بیشتر شده است، اما مقدار نفوذ این اجزا 30% بیشتر از پانل ساندویچی می‌باشد. در آزمایش بالستیک نیز سرعت حد بالستیک و انرژی بالستیک سازه ساندویچی از اجزا آن به میزان قابل ملاحظه ای بیشتر می‌باشد. نتایج بدست آمده از نفوذ شبه استاتیکی و نفوذ دینامیکی برتری سازه‌های ساندویچی به سازه‌های معمولی را نشان می‌دهد. بنابراین سازه ساندویچی به عنوان یک سازه جاذب انرژی مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد. جباری و همکاران [14] به بررسی تاثیر نوع و ضخامت رویه بر خواص مکانیکی پانل‌های ساندویچی پرداختند. خواص مکانیکی (مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و مقاومت به ضربه) پانل‌های ساندویچی، با تغییر نوع رویه و افزایش ضخامت، به طور معنی داری بهبود و افزایش می‌یابد و این ویژگیها در رویه راش و ضخامت 5 میلیمتر دارای حد بهینه و بیشترین مقدار خود بوده است. همچنین، استفاده از رویه صنوبر سبب کاهش مقاومت-های مکانیکی گردید. ریس و همکاران [15] به تحلیل پاسخ ضربه کامپوزیت‌های ساندویچی با لحاظ نانو پرداختند. پانل ساندویچی تقویت شده با نانورس بیشترین ماکزیمم بار ضربه، کمترین تغییر مکان و حداکثر مقاومت خمشی باقی مانده را دارا بود. خوانساری و همکاران [16] به بررسی تجربی خواص بالستیکی هیبرید آلومینیوم و نانو کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با نانولوله کربنی پرداختند. در این بررسی پاسخ پانل‌های هیبرید و

بحث برخورد اجسام و نفوذ پرتابه در سازه‌های ساندویچی، به دلیل نسبت استحکام به وزن و قابلیت جذب انرژی بالا، مورد توجه محققان قرار گرفته است. در دهه‌های اخیر، جذب انرژی و جاذب‌های انرژی در همه علوم مهندسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گشته است. کاهش خطرات ناشی از ضربه‌ها یک هدف مهم است که در سایه بررسی جاذب‌های انرژی به این مهم می‌توان دست یافت. جاذب‌های انرژی سیستم‌هایی هستند که کل انرژی جنبشی یا بخشی از آن را به انواع دیگر انرژی تبدیل می‌کنند. جاذب‌های انرژی در حالت کلی به دو نوع بازگشت پذیر و بازگشت ناپذیر دسته‌بندی می‌شوند. جاذب‌های انرژی انواع بسیار مختلفی را دارا می‌باشند که ساختارهای ساندویچی یکی از آنها می‌باشند.

امروزه، بحث ضربه در نانو کامپوزیت‌ها در آغاز راه است و پژوهش‌های انجام شده در زمینه اثر ضربه روی نانو کامپوزیت‌ها و پاسخ آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است. جعفری و همکاران [1] برخورد ضربه زنده‌های مختلف به ورق‌های ساندویچی را بررسی کردند. نتایج نشان داد در سازه کامپوزیت - فوم و در پانل آلومینیوم- فوم، با در نظر گرفتن قطر برابر برای پرتابه‌ها، بیشترین مقدار جذب انرژی، به ترتیب به پرتابه‌های سخت، سرکروی و سرمخروطی تعلق دارند. گاستین و همکاران [2] به بررسی ضربه سرعت پایین بر روی پانل‌های ساندویچی کولار/الیاف کربن پرداختند. جایگزین کردن کولار سبب بهبود 10 درصدی ماکزیمم انرژی جذب شده و ماکزیمم نیروی برخورد شده است. همچنین استفاده از رویه‌های هیبریدی باعث بهبود 5 درصدی ماکزیمم انرژی جذب شده و بهبود 14 درصدی ماکزیمم نیروی برخورد شده است. مهدیان و همکاران [3] به بررسی تحلیلی و عددی ضربه سرعت پایین بر روی پانل ساندویچی با رویه فلزی و هسته فوم پلی‌یورتان پرداختند. با مقایسه نتایج مختلف مشخص شد که در محدوده مشخص سرعت پایین ضربه زنده، نتایج مدل تحلیلی از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. انرژی جنبشی پرتابه یا به عبارت دیگر سرعت ضربه زنده نیز تاثیر قابل ملاحظه ای در ضربه ی وارده به پانل ساندویچی دارد و تغییر ضخامت فوم کمترین درصد مشارکت را در فرآیند ضربه و کاهش اثرات تخریبی آن داراست. جی فان و همکاران [4] پاسخ ضربه سرعت پایین را در کامپوزیت- های چند لایه الیاف - فلز و کامپوزیت های ساده مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که کامپوزیت های چند لایه الیاف - فلز نسبت به کامپوزیت‌های ساده، مقاومت در برابر سوراخ شدگی بالاتری دارند. چن و همکاران [5] بهبود مدول و چقرمگی نانو ماده مرکب اپوکسی/نانو سیلیکا را شاهد بودند، بدون اینکه افزودن نانو ذرات سیلیکا تاثیری بر دمای کاری رزین داشته باشد. نتایج آزمایش خواص مکانیکی، حاکی از بهبود 30 درصدی چقرمگی در درصد‌های پایین نانو سیلیکا بوده است. غفرانی و همکاران [6] به بررسی اثر نوع هسته و پوسته بر مقاومت‌های مکانیکی پانل ساندویچی سبک وزن پرداختند. نتایج نشان داد پانل سبک وزن ساخته شده از هسته فوم پلی اورتان به دلیل تراکم مناسب، ایجاد سطح تماس بیشتر با پوسته، توزیع مناسب بار و کاهش تنش وارد شده به سطح دارای برتری محسوسی نسبت به پانل سبک وزن ساخته شده از هسته لانه زنبوری می‌باشد. آذرافرا و همکاران [7] تست خمش سه نقطه ای روی ورق ساندویچی فلزی و کامپوزیتی با هسته مشبک را انجام دادند. نتایج نشان داد که افزایش دو برابری ضخامت پوسته سازه های ساندویچی مشبک کامپوزیتی، نسبت استحکام به وزن را 1/5 برابر افزایش می‌دهد. تغییر جنس رویه‌ها از پارچه با الیاف شیشه به کربن، به جای افزایش ضخامت رویه‌های الیاف شیشه، در سازه‌های ساندویچی نتیجه بهتری دارد. خوش گفتار و همکاران [8] به

بین سطحی، بهبود خصوصیات پیوند و نوع شکل اینتر کلیت/ اکسفولیت ماتریس توجیه شد. خدایی و همکاران [22] مدلی برای شبیه‌سازی تأثیر بالستیک یک پرتابه بر روی پانل ساندویچی با هسته لانه زنبوری و پوسته کامپوزیتی توسعه دادند. از مدل مادی مناسب برای هسته لانه زنبوری آلومینیومی با در نظر گرفتن خصوصیات وابسته به میزان کرنش استفاده نمودند. همچنین جهت مدلسازی آسیب در پوسته کامپوزیتی، شروع آسیب با معیار هاشین و پیشروی آسیب با مدل MLT با استفاده از کد نویسی در سابروتین VUMAT انجام شد. سرعت حد بالستیک و میزان جذب انرژی محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه شد که مدل ارائه شده تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت. ویشواس و همکاران [23] اثر لاستیک به عنوان هسته در پانل ساندویچی تقویت‌شده با الیاف جوت را تحت ضربه سرعت پایین مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از لاستیک به عنوان ماده اصلی تأثیر قابل توجهی در جذب انرژی دارد. خدایی و همکاران [24] تأثیر چگالی هسته بر روی قابلیت جذب انرژی پانل‌های ساندویچی با رویه صفحات آلومینیومی و هسته فوم پلی‌پورتان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش چگالی فوم مقدار تغییر شکل عرضی سطح پشتی پانل ساندویچی کمتر می‌شود ولیکن میزان جذب انرژی پانل نیز کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش چگالی فوم علاوه بر این که تغییر شکل رویه پشتی پانل کاهش می‌یابد، پروفیل آن نیز یکنواخت‌تر می‌گردد.

هدف این تحقیق، بررسی تأثیر نانو سیلیکا در پانل ساندویچی با چهار لایه پارچه بازالت و پانل ساندویچی هیبریدی با پارچه‌های بازالت و کولار، با ترتیب لایه چینی بازالت، کولار، کولار، بازالت می‌باشد. پانل‌های ساندویچی ساخته شده تحت ضربه سرعت پایین قرار می‌گیرند و مقاومت آن‌ها در برابر ضربه مورد بررسی قرار خواهد گرفت و پاسخ نیرو تماسی-زمان و نیرو تماسی-جابجایی سازه بدست می‌آید. همچنین با بررسی آسیب وارد شده به قطعات تأثیر افزایش نانو سیلیکا و مقایسه پانل‌های هیبریدی و غیر هیبریدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

2- مواد و روش آزمایش

1-1- ساخت نمونه‌ها

نمونه‌های پانل ساندویچی از دو رویه کامپوزیتی در بالا و پایین ساخته شده که هسته فوم ما بین رویه‌های کامپوزیتی قرار دارد. رویه‌های کامپوزیتی جزء کامپوزیت پایه پلیمری بوده که ماتریس آن با پارچه کولار و بازالت تقویت شده است. پارچه کولار دارای چگالی سطحی 200 گرم بر متر مربع و پارچه بازالت دارای چگالی سطحی 350 گرم بر متر مربع می‌باشند. رزین مورد استفاده از خانواده اپوکسی و ساخت شرکت چیمکس¹ روسیه با نام تجاری EPR1080 و با سخت‌کننده EA1080 انتخاب گردید. واکنش شیمیایی و پخت این رزین طبق دستورالعمل شرکت سازنده در دمای 25 الی 80 درجه سانتیگراد انجام می‌گیرد. برای ساخت هسته نیز از فوم پلی‌پورتان با چگالی 140 گرم بر سانتی متر مربع استفاده شده است. از نانو سیلیکا پودری سفید رنگ که دارای خلوص 99/9 درصد است و ذرات آن دارای اندازه 15 نانومتر می‌باشند استفاده شده است. وزن نمونه‌ها 168 گرم و وزن رزین باید حدود 150 - 100 گرم بیشتر از وزن نمونه‌ها باشد، بدین ترتیب وزن رزین استفاده شده 300 گرم در نظر گرفته شد. در حالت بدون نانو برای

آلومینیوم و کامپوزیت ساخته شده از اپوکسی و کولار و پانل‌های هیبریدی آلومینیوم و نانو کامپوزیت اپوکسی و کولار در اثر ضربه بالستیک مورد بررسی قرار گرفت. چهار گروه از پانل‌های بالا با درصدهای 0، 0/5، 1، 1/5 نانو لوله کربنی ساخته شد. نمونه‌های هیبریدی با روش لایه چینی دستی و پرس گرم ساخته شد. آزمونهای ضربه بالستیک با استفاده از پرتاب گلوله مخروطی 7/6 گرمی و با دو سرعت میانگین 220 و 275 متر بر ثانیه توسط تفنگ گازی انجام شد. نتایج بدست آمده نشان داد از میان چهار نمونه مورد بررسی، پانل حاوی 1% نانو لوله کربنی بیشترین جذب انرژی و مقاومت بالستیکی را داراست. حسن پور رودبنه و همکاران [17] به بررسی تجربی نفوذ شبه استاتیکی بر روی سازه‌های ساندویچی پر شده از فوم تحت بارگذاری‌های متمرکز و گسترده پرداختند. نتایج آزمایش شبه استاتیک در هر دو نوع بارگذاری نشان می‌دهد که ماده پرکننده اثر بسزایی در افزایش انرژی جذب شده دارد. فوم پلی‌پورتان به عنوان ماده پرکننده سازه لانه زنبوری در هسته پانل ساندویچی باعث افزایش 6% و 29% انرژی جذب شده نسبت به سازه ساندویچی با هسته لانه زنبوری خالی به ترتیب در بارگذاری‌های متمرکز و گسترده شده است. پایگانه و همکاران [18] به بررسی خواص استحکام ضربه‌ای نانو کامپوزیت بر پایه پلی‌پروپیلن/نانو صفحات گرافن/نانورس پرداختند. با استفاده از روش طراحی آزمایش، اثر هیبریدی نانو صفحات گرافن و نانورس و سازگار کننده پلی‌پروپیلن پیوندی با انیدرید مالئیک (PP-g-MA) بر استحکام ضربه‌ای نانو کامپوزیت‌های بر پایه پلی‌پروپیلن بررسی کردند. ساخت نانو کامپوزیت‌ها، بر اساس روش اختلاط مذاب انجام گرفت. تحلیل‌های آماری نشان دادند که با افزایش درصد نانو ذرات، استحکام ضربه کاهش می‌یابد. آنالیز حرارتی به روش گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) نشان داد که حضور گرافن تأثیر چندانی بر دمای ذوب نمونه مورد آزمایش ندارد، اما T_c نانو کامپوزیت را در مقایسه با پلی-پروپیلن خالص، حدود 4 درصد افزایش داده است. در نانو کامپوزیت فاقد گرافن، حضور نانو رس تأثیری بر دمای ذوب نداشت اما درجه تبلور، 10/73 درصد و دمای تبلور 2/23 درصد در مقایسه با پلی‌پروپیلن خالص افزایش یافت که نشان از اثر هسته زاپی نانورس دارد. پرامانیک و همکاران [19] به بررسی جذب نیروی یک پانل ساندویچی تقویت شده با ذرات نانو در ضربه سرعت بالا و ضربه سرعت پایین پرداختند. از وینیل استر با 1/25 و 2/5 درصد حجمی نانورس و صفحات کوچک گرافیت و الیاف شیشه نوع E استفاده کردند. نتایج نشان داد که نمونه 2/5% حجمی صفحات گرافیتی تقویت شده با نانو کامپوزیت بیشترین جذب انرژی را دارد. فت و همکاران [20] به بررسی مدل دینامیکی ضربه سرعت پایین بر روی پانل ساندویچی پرداختند. از مدل سیستم‌های یک و چند درجه آزادی برای پیش‌بینی جواب ضربه سرعت پایین پانل ساندویچی با شرایط مرزی دو سر گیردار، تکیه‌گاه ساده و چهار سر گیردار استفاده کردند. جواب تحلیلی برای پاسخ تغییر شکل گذرای پانل ساندویچی ارائه کردند. جرم‌های معادل از فرض توزیع سرعت و محاسبه انرژی جنبشی المان‌های دامنه بخش بالایی صفحه و انحراف کلی پانل به دست می‌آیند. معادل سفتی فنر و دمپر از جواب بار استاتیکی و تنظیم مواد با خواص دینامیکی رویه و هسته به دست آوردند. مقایسه پیش‌بینی‌های تحلیلی نیروی ضربه با نتایج تجربی تطابق خوبی داشتند. هوگو و همکاران [21] با افزودن یک درصد وزنی نانو سیلیکا به ماده مرکب شیشه/اپوکسی، سبب افزایش 44 درصدی استحکام برشی بین لایه‌های شد مقاومت خمشی و چقرمگی شکست نیز به ترتیب 24 و 23 درصد افزایش را نشان دادند. این افزایش در خواص مکانیکی، عمدتاً ناشی از افزایش ناحیه تماس

¹ ChimeX

بین لایه‌های نانو سیلیکا و در نتیجه تسهیل نفوذ رزین اپوکسی را به داخل فواصل بین لایه‌ای نانو ذرات سیلیکا موجب شده و به علت توزیع مناسب‌تر، افزایش فواصل بین لایه‌ها، پراکنش بهتر و مناسب‌تر و در نتیجه میزان برهم کنش بین سطحی بیشتری ایجاد می‌کند.



Fig. 3 Ultrasonic effect on resin

شکل 3 اثر آلتراسونیک روی رزین

در این مرحله لایه‌چینی نمونه‌های پانل ساندویچی بصورت چهار لایه بازالت در بالا و پایین و هسته فوم ما بین آنها بصورت لایه گذاری دستی انجام شد. در این قسمت از پارچه های بازالت، از هر کدام دو تکه مربعی به ابعاد 20 سانتیمتر در 20 سانتیمتر بریده شده است. سپس شیشه روی صفحه کار تمیز گردید و واکس زده شد. در این مرحله از یک لایه پارچه داکرون به عنوان جدا کننده استفاده شد، پارچه داکرون به همراه واکس باعث می شود تا نمونه به شیشه نچسبد. استفاده از پارچه داکرون امری ضروری است و در غیر این صورت قطعه به شیشه می چسبد و منجر به ایجاد مشکل در جدا کردن قطعه از آن می‌گردد. همچنین پارچه داکرون مقدار اضافی رزین را گرفته و باعث ایجاد سطح زبر روی پارچه های کولار و بازالت می‌شود. در هر مرحله از لایه چینی پارچه‌ها به رزین حاوی نانو آغشته شدند و پارچه بعدی روی آن قرار گرفته و به رزین مذکور آغشته می‌شود. بدین ترتیب رویه بالایی و پایینی پانل ساندویچی شامل چهار لایه بازالت آماده شد. در بخش مونتاژ کردن رویه‌ها و فوم، ابتدا فوم و لایه‌های آماده شده با ابعاد 10 سانتیمتر در 10 سانتیمتر برش داده شدند، سپس فوم‌ها روی پارچه داکرون گذاشته شده و سطح بالایی آن آغشته به رزین شده و رویه‌های بازالت روی سطح آغشته به رزین قرار گرفت. پس از اینکه همه نمونه‌ها روی فوم‌ها قرار گرفتند به نمونه اول بازگشته و سطح دیگر فوم به رزین آغشته شد و رویه مقابل روی آن قرار گرفت و همین فرآیند برای همه نمونه‌ها انجام گرفت. سپس نمونه‌های پانل ساندویچی آماده شده به مدت 24 ساعت در دمای اتاق قرار گرفته‌اند تا خشک شوند. نمونه‌های مورد نظر برش داده شده و برای آزمایش ضربه آماده شدند. ساخت پانل ساندویچی با رویه هیبریدی شبیه پانل ساندویچی با رویه بازالت هست فقط هنگام لایه چینی از پارچه کولار بجای پارچه بازالت استفاده می‌شود. پانل های ساندویچی ساخته شده برای انجام آزمایش در شکل 4 نشان داده شده اند. باتوجه به اینکه از چهار درصد وزنی نانو در این پژوهش استفاده شده، پانل‌های ساندویچی از لحاظ درصد نانو به چهار گروه تقسیم شده اند:

گروه اول: نمونه‌های پانل ساندویچی بدون نانو سیلیکا

گروه دوم: نمونه‌های پانل ساندویچی با 0/3% نانو سیلیکا

گروه سوم: نمونه‌های پانل ساندویچی با 0/7% نانو سیلیکا

آماده‌سازی رزین، ابتدا رزین و سخت‌کننده در نسبت وزنی تعیین شده با استفاده از همزن مکانیکی به مدت 10 دقیقه با هم مخلوط شدند. نیروی وارد شده توسط همزن مکانیکی باعث می‌شود تا رزین و سخت‌کننده به خوبی با هم ترکیب شوند. جهت تولید نانوکامپوزیت‌های اپوکسی - نانو سیلیکا، نانو ذرات سیلیکا با درصد های وزنی 0/3، 0/7 و 1/1 (نسبت به کل سیستم رزین (رزین اپوکسی + سخت کننده))، مطابق جدول 1 به اپوکسی اضافه شده و با همزن مکانیکی به مدت 10 دقیقه مخلوط گردید. در شکل 1 تفاوت ایجاد شده در اثر استفاده از هم زن مکانیکی نشان داده شده است.

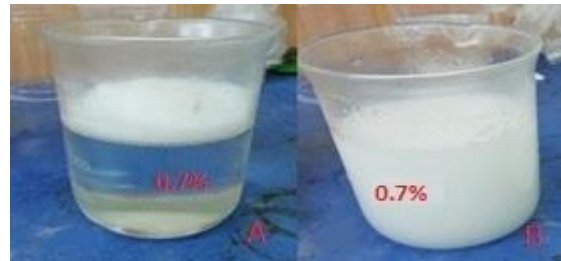


Fig. 1 (A) Before mixing with a mechanical stirrer (B) After mixing with a mechanical stirrer

شکل 1 (A) قبل از مخلوط کردن با هم زن مکانیکی، (B) پس از مخلوط کردن با هم زن مکانیکی

جدول 1 وزن نانو سیلیکا در هر نمونه

Table 1 Weight of nano silica in each sample

وزن نانو سیلیکا	نمونه
$330 * 0.3 = 0.99 \text{ g}$	% 0.3
$330 * 0.7 = 2.31 \text{ g}$	% 0.7
$330 * 1.1 = 3.63 \text{ g}$	% 1.1

برای عمل آلتراسونیک از دستگاه آزمایشگاه مواد مرکب دانشگاه امیرکبیر، مدل سونوپالس¹ ساخت شرکت باندلین کشور آلمان استفاده شد، که در شکل 2 نشان داده شده است. مخلوط با استفاده از دستگاه آلتراسونیک به مدت 15 دقیقه تحت امواج فراصوتی قرار گرفت تا نانو ذرات سیلیکا درون پایه اپوکسی پخش شود.



Fig. 2 Ultrasonic device

شکل 2 دستگاه آلتراسونیک

همانطور که در شکل 3 مشاهده می‌شود پس از عمل آلتراسونیک، رزین از حالت شیری رنگ به حالت شفاف تبدیل می‌شود و حباب‌های موجود در رزین از بین می‌روند. عمل آلتراسونیک امکان لایه لایه شدن و افزایش فاصله

¹ SONOPULS

زمان و غیره را به دست آورد. تنظیمات دستگاه و تست به صورت تمام خودکار بوده تا از خطاهای انسانی جلوگیری شود. این دستگاه پدیده ضربه را با دادن اطلاعات در طی زمان برخورد مشخص می‌کند. در این دستگاه بار ضربه، از طریق سقوط یک وزنه که وزن آن قابل تغییر است، اعمال می‌شود. دستگاه دارای موانعی است که قابلیت تنظیم ارتفاع سقوط را به کاربر می‌دهد، در نتیجه به راحتی می‌توان انرژی اولیه ضربه را تعیین کرد. همچنین برای انتقال داده‌های ثبت شده توسط سنسور نیرو سنج نصب شده بر روی ضربه زننده (شامل یک کلاهک به جرم 2/712 کیلوگرم، فولاد سخت کاری شده) به کامپیوتر، از یک دستگاه جمع آوری اطلاعات استفاده شده است. نمونه‌ها مطابق شکل 6 بین دو صفحه قرار گرفته‌اند، سپس با بسته شدن چهار گیره که به شاسی دستگاه متصل هستند نمونه‌ها بین دو صفحه ثابت شده و برای آزمایش آماده شدند و تحت ضربه قرار گرفتند. پرتابه دارای قطر 16 میلی‌متر با نوک کرومی و از جنس فولاد می‌باشد که در شکل 7 نشان داده شده است. نمونه‌ها دارای شرایط مرزی گیردار- گیردار می‌باشند و ضربه‌زننده از ارتفاع 0/35 متر بصورت عمودی به نمونه‌ها اصابت می‌کند.



Fig. 6 Fixture of sandwich panel containing Nano silica

شکل 6 فیکسچر پانل ساندویچی حاوی نانوسیلیکا

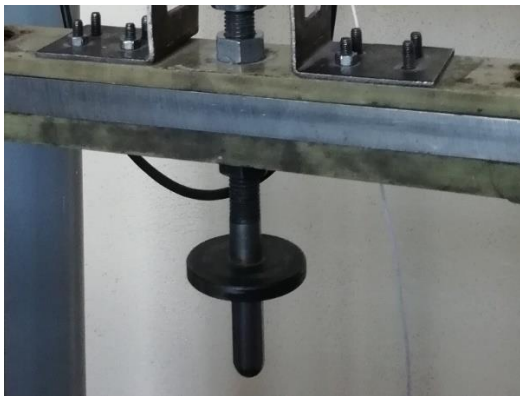


Fig. 7 Impactor

شکل 7 ضربه‌زننده

3- نتایج

در این تحقیق تاثیر افزودن نانو سیلیکا به پانل‌های ساندویچی ساخته شده با رویه‌های بازالت و هیبریدی بازالت-کولار و هسته فوم پلی اورتان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. متغیرهای این تحقیق درصد وزنی نانو سیلیکا موجود در پانل‌های ساندویچی، لایه‌چینی پانل‌های ساندویچی و تغییر انرژی ضربه زننده در حالت هیبریدی می‌باشند.

نمودارهای نیرو-زمان و نیرو-جابجایی نمونه‌های با رویه بازالت با درصد وزنی مختلف نانو در شکل 8 و 9 نشان داده شده است. مقایسه نمودارها نشان

گروه چهارم: نمونه‌های پانل ساندویچی با 1/1% نانو سیلیکا

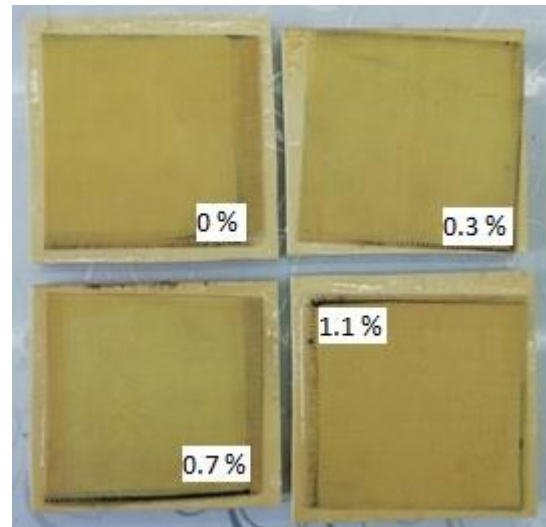


Fig. 4 Sandwich panels with Kevlar skin

شکل 4 پانل های ساندویچی با رویه کولار

2-2- تست نمونه‌ها

به منظور تعیین انرژی شکست فلزات و مواد کامپوزیتی از دستگاه آزمون ضربه ثقلی یا وزنه افتان استفاده شده است. این دستگاه پدیده ضربه را نه از طریق انرژی قبل و بعد از ضربه، بلکه با دادن اطلاعات در طی زمان برخورد مشخص می‌کند. در این دستگاه، بار ضربه از طریق سقوط یک وزنه که وزن آن قابل تغییر است، اعمال می‌شود. دستگاه دارای موانعی است که قابلیت تنظیم ارتفاع سقوط را به کاربر می‌دهد، در نتیجه به راحتی می‌توان انرژی اولیه ضربه را تعیین کرده و به نمونه اعمال کرد. به منظور انجام این آزمون، از دستگاه ضربه سرعت پایین دانشگاه امیر کبیر استفاده شده است که مطابق با استاندارد آزمون ضربه می‌باشد که در شکل 5 نشان داده شده است.



Fig. 5 Drop Weight equipment

شکل 5 دستگاه وزنه افتان

خروجی دستگاه به صورت داده‌هایی از شتاب - زمان که به راحتی می‌توان با استفاده از روابط ریاضی، نمودارهای نیرو - جابجایی، سرعت - زمان، انرژی

کامل همانند حالت اولیه خود باقیمانده‌اند لذا در صفحات پشتی نمونه‌های بدون نانو و حاوی ذرات نانو هیچ نوع آسیبی رخ نداده است.

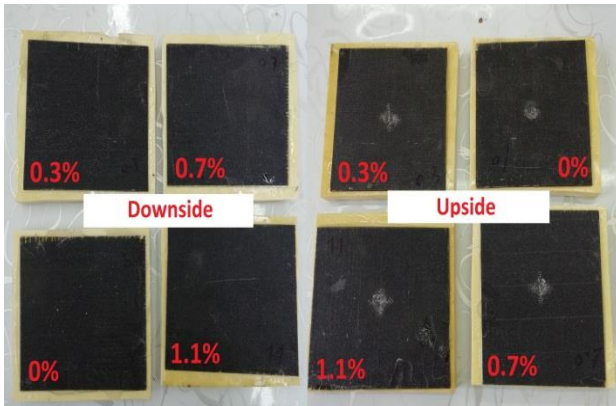


Fig. 10 Impacted and non-impacted sides of Sandwich panels with basalt skin after impact test

شکل 10 صفحات ضربه خورده شده و ضربه خورده نشده پانل‌های ساندویچی با رویه بازالت بعد از آزمون ضربه

شکل 11 و 12 نمودارهای نیرو تماسی-زمان و نیروی تماسی-جابجایی را برای نمونه‌های هیبریدی با انرژی برخورد 20 ژول نشان می‌دهند. مقایسه نمودارهای نیرو تماسی - زمان حالت هیبریدی با انرژی برخورد 20 ژول که در شکل 11 مشاهده می‌شود، نشان می‌دهد که بیشینه نیروی تماسی در نمونه حاوی 1/1% نانو سیلیکا می‌باشد و کمترین نیروی تماسی در نمونه بدون نانو مشاهده شده است. همچنین مقایسه نمودارهای نیرو تماسی - جابجایی که در شکل 12 نشان داده شده، دیده شد که نمونه حاوی 1/1% نانو سیلیکا کمترین جابجایی و نمونه حاوی بدون نانو بیشترین جابجایی را دارند.

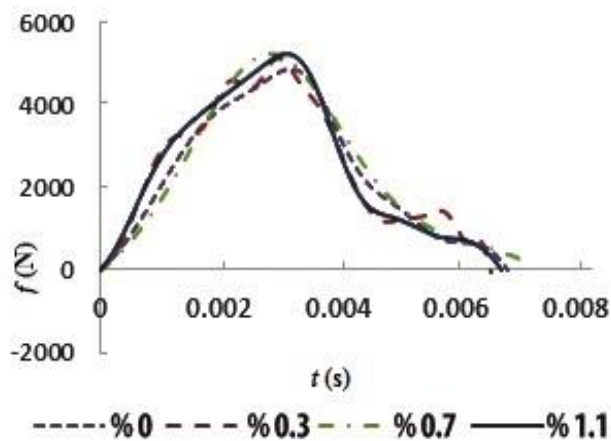


Fig. 11 Contact force-time curves of sandwich panels with hybrid skin with impact energy of 20 J

شکل 11 منحنی‌های نیروی تماسی-زمان پانل‌های ساندویچی با رویه هیبریدی با انرژی برخورد 20 ژول

مقایسه نیروی تماسی ماکزیمم پانل ساندویچی با رویه بازالت و پانل ساندویچی با رویه هیبریدی بازالت- کولار در جدول 2 نشان داده شده است.

می‌دهد که بیشینه نیرو تماسی در نمونه 1/1% نانو سیلیکا بوده است و طبق شکل 9 که مقایسه نمودارهای نیرو - جابجایی را نشان داده است، کمترین جابجایی در نمونه 0/3% نانو سیلیکا دیده شده است و همچنین بیشترین انرژی در نمونه حاوی 1/1% نانو سیلیکا بوده است. از مقادیر بدست آمده برای این حالت می‌توان نتیجه گرفت که افزایش نانو سیلیکا در این حالت باعث افزایش نیروی تماسی می‌شود ولی در نمونه 1/1% باعث افزایش جابجایی هم شده است.

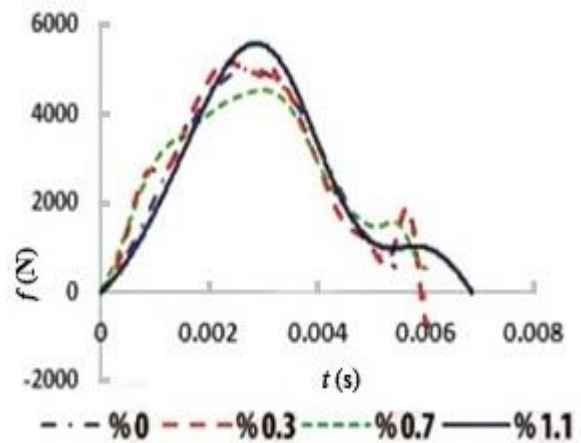


Fig. 8 Contact force-time curves of sandwich panels with basalt skin with impact energy of 20 J

شکل 8 منحنی‌های نیروی تماسی-زمان پانل‌های ساندویچی با رویه بازالت با انرژی برخورد 20 ژول

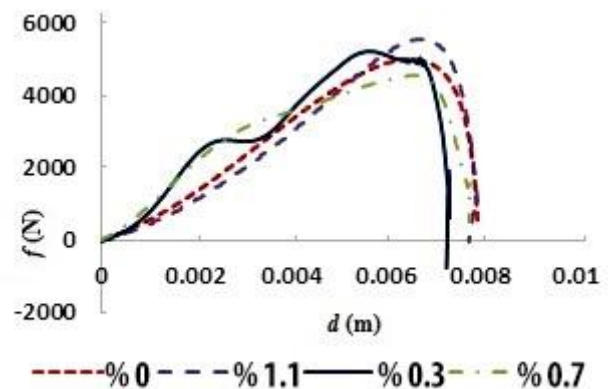


Fig. 9 Contact force-displacement curves of sandwich panels with basalt skin with impact energy of 20 J

شکل 9 منحنی‌های نیروی تماسی-جابجایی پانل‌های ساندویچی با رویه بازالت با انرژی برخورد 20 ژول

سطح پشت و روی نمونه‌های پانل ساندویچی شامل چهار لایه پارچه بازالت بعد از انجام آزمون ضربه سرعت پایین بر روی آنها در شکل 10 نشان داده شده است. همانطور که در شکل 10 ملاحظه می‌شود در صفحات ضربه خورده شده ترک ماتریس و شکست الیاف قابل مشاهده است. برای نمونه‌های حاوی نانو ذرات سیلیکا در محل ضربه ترک طولی دیده می‌شود اما در نمونه بدون نانو، ترک‌های محیطی در محل ضربه رخ داده است. همچنین ترک ماتریس و یا شکست الیاف در سطح پشت نمونه‌ها ایجاد نشده و آنها به طور

صفحات پشتی نمونه‌های بدون نانو و حاوی ذرات نانو هیچ نوع آسیبی رخ نداده است.

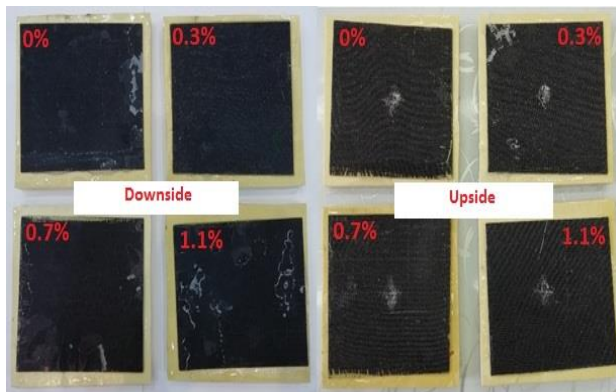


Fig. 13 Impacted and non-impacted sides of Sandwich panels with hybrid skin after impact test

شکل 13 صفحات ضربه خورده شده و ضربه خورده نشده پانل‌های ساندویچی با رویه هیبریدی بعد از آزمون ضربه

4- نتیجه گیری

مقاومت به ضربه پانل‌های ساندویچی با رویه بازالت و پانل‌های ساندویچی با رویه هیبریدی بازالت و کولار تحت ضربه سرعت پایین با لحاظ نانوسیلیکا مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های پانل ساندویچی به روش لایه گذاری دستی ساخته شدند و به وسیله دستگاه تست وزنه افتان با انرژی ضربه ثابت و ضربه زننده سر کروی با قطر 16 میلی متر مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد افزودن نانو به پانل ساندویچی سبب بهبود مقاومت به ضربه می‌شود و بیشترین نیروی تماسی ماکزیمم مربوط به پانل ساندویچی با 1/1 نانو می‌باشد.

5- مراجع

- [1] Jafari, S.S., and Feli, S., "Analytical investigation of impact of blunt projectile with different ended into sandwich panels," in Persian, Journal of Modeling in Engineering, Vol. 3, No. 42, pp. 65-77, 2015.
- [2] Gustin, J., Joneson, A., Mahinfalah, M., Stone, J., "Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites," Composite structures, Vol. 69, No. 4, pp. 396-406, 2005.
- [3] Mahdian, M., and Ebrahimi, H., "Analytical and numerical analysis of low speed impact on sandwich panel with metal and polyurethane foam core," in Persian, The International Conference on New Research in Industry and Mechanical Engineering.
- [4] Fan, J., Cantwell, W., Guan, Z., "The low-velocity impact response of fiber-metal laminates," Reinforced Plastics and Composites, Vol. 30, No. 1, pp. 26-35, 2011.
- [5] Chen, C., Justice, R. S., Schaefer, D. W., Baur, J. W., "Highly dispersed nanosilica-epoxy resins with enhanced mechanical properties," Polymer, Vol. 49, pp. 3805-3815, 2008.
- [6] Ghofrani, M., Pishan, S., Talaei, A., "The effect of core type and skin on the mechanical properties of lightweight sandwich Panels," in Persian, Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, Vol. 28, No. 4, pp.720-731, 2014.
- [7] Azarafza, R., Davar, A., and Mahmoodi, A., "Three-point bending test of metal and composite sandwich panels with grid stiffened core," in Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 377-388, 2017.
- [8] Khoshgoftar, M., Liaghat, G., "Experimental and Numerical Investigation of Perforation Behavior of Composite Laminates

در نمونه‌های پانل ساندویچی با رویه بازالت، بیشترین مقدار نیروی تماسی مربوط به حالت 1/1 درصد نانو می‌باشد که نیروی تماسی ماکزیمم در حالت 1/1 درصد نانوسیلیکا نسبت به حالت بدون نانو ده درصد افزایش یافته است.

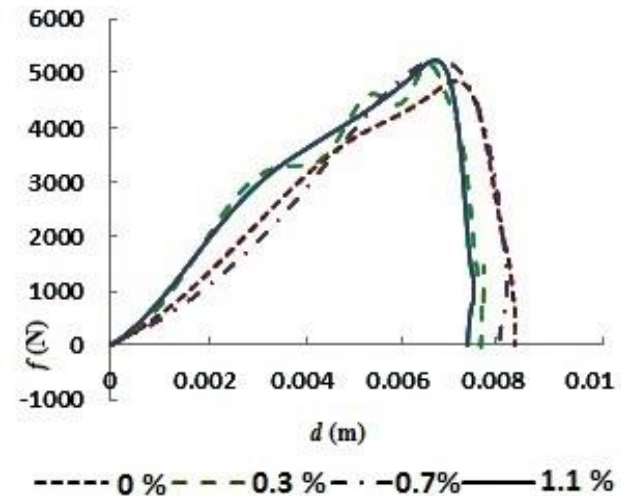


Fig. 12 Contact force-displacement curves of sandwich panels with hybrid skin with impact energy of 20 J

شکل 12 منحنی‌های نیروی تماسی - جابجایی پانل‌های ساندویچی با رویه هیبریدی با انرژی برخورد 20 ژول

برای نمونه‌های پانل ساندویچی با رویه هیبریدی، کمترین مقدار نیروی تماسی مربوط به حالت بدون نانو است و با افزودن ذرات نانو مقدار نیروی تماسی ماکزیمم افزایش می‌یابد و در حالت 1/1 درصد نانو سیلیکا این مقدار به بیشترین مقدار می‌رسد. نیروی تماسی ماکزیمم نمونه 1/1 درصد نسبت به نمونه بدون نانو هشت درصد افزایش یافته است.

جدول ۲: مقایسه نیروی تماسی ماکزیمم پانل ساندویچی با رویه بازالت و پانل ساندویچی با رویه هیبریدی

Table 2: Comparison of maximum contact force of sandwich panel with basalt skin and sandwich panel with hybrid skin

درصد وزنی	نیروی تماسی ماکزیمم پانل ساندویچی با رویه بازالت (نیوتن)	نیروی تماسی ماکزیمم پانل ساندویچی با رویه هیبریدی (نیوتن)
بدون نانو	5028.363	4866.291
0/3 درصد نانو	5203.92	5153.347
0/7 درصد نانو	4545.566	5239.904
1/1 درصد نانو	5581.172	5257.453

سطح پشت و روی نمونه‌های هیبریدی پس از انجام آزمون ضربه سرعت پایین در شکل 13 نشان داده شده‌اند. همانطور که در شکل 13 مشاهده می‌شود، ضربه فقط سطح روی نمونه‌ها (سمت راست شکل) را تخریب کرده و هیچگونه تخریبی در سطح پشت نمونه‌ها (سمت چپ شکل) ایجاد نشده است و تخریب نمونه‌ها فقط روی سطح آنها تاثیر گذاشته است. برای نمونه - های حاوی نانو ذرات سیلیکا و بدون ذرات نانو شکل آسیب بصورت لوزی شکل بوده و ترک در ماتریس و شکست الیاف به وضوح قابل مشاهده است. همچنین هیچگونه آثاری از آسیب در سطح پشت نمونه‌ها دیده نمی‌شود و در

- Reinforced with Carbon Nanotubes,” in Persian, Tarbiat Modares University, Mechanical Engineering Department, 2010.
- [9] Payganeh, Gh., Malekzade Fard K., Rashed Saghavaz, F., and Asgari, M., “Analysis of laminated composite sandwich plates with magnetorheological fluid core under low velocity impact,” in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 114-124, 2016.
- [10] Alavi Nia, A., and Kazemi, M., “Analytical study of high velocity impact on sandwich panels with foam core and aluminum face-sheets,” in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 6, pp.231-239, 2015.
- [11] Malekzadeh Fard, K., Ebrahimi, M., Nazari, A., and Irani, S., “Buckling Analysis of Composite Sandwich Panel with Symmetric FGM Core,” in Persian, Using Improved High-order Theory, Aerospace Mechanics Journal, Vol. 8, No. 1, pp. 55-70, 2012.
- [12] Pirmohammadi, N., Liaghat, Gh. H., Pol, M. H., and Sabouri, H., “Analytical, experimental and numerical investigation of sandwich panels made of honeycomb core subjected projectile impact,” in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 153-164, 2014
- [13] Hassanpour Roubeneh, F., Liaghat, Gh., Sabouri, H., Hadavinia, H., “Investigation of Interaction between Aluminum Facing and Honeycomb Structure in Quasi-static and Impact Loading,” in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 23-31, 2016
- [14] Jabbari, M., Tatari, A. A., and Ghafari, M., “Effect of Faces Type and Thickness on Mechanical Properties of Sandwich Panels,” in Persian, Iranian Journal of Wood and Paper Industries, Vol. 5, No. 1, pp. 85-92, 2014.
- [15] Reis, P., Santos, P., J.A.M. Ferreira, M. Richardson, “Impact response of sandwich composites with nano-enhanced epoxy resin,” in Persian, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 32, No. 12, pp. 898-906, 2018.
- [16] Khansari, M., Khodarahmi H., Vaziri, A., “Experimental study of ballistic properties of hybrid aluminum and epoxy matrix composite reinforced with carbon nanotube,” in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 8, pp. 126-132, 2017.
- [17] Hassanpour Roubeneh, F., Liaghat, Gh., Sabouri, H., “Experimental Investigation of foam filled Sandwich Panels in Concentrated and Distributed Compressive loading,” in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 648-656, 2016.
- [18] Payganeh, Gh., Ghasemi, I., Rahmani, M., Kazemnejad, A., “An investigation on the impact properties of nanocomposite based on polypropylene/graphene nanosheets/ nano clay using response surface methodology,” in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 9, pp. 271-279, 2015.
- [19] Pramanik, B., Raju Mantena, P., “Energy Absorption of Nano-Reinforced and Sandwich Composites in Ballistic and Low-Velocity Punch-Shear,” Open Journal of Composite Materials, Vol. 2, No. 3, pp. 87-96, 2012.
- [20] Hoo Fatt, M. S., Park, K. S., “Dynamic model for low-velocity impact damage of composite sandwich panels – part A: Deformation,” Composite Structures, Vol. 52, pp. 335-351, 2001.
- [21] Haque, A., Shamsuzzoha, M., Hussain, F., Dean, D., “S2-Glass/Epoxy polymer nanocomposites: manufacturing, structures, thermal and mechanical properties,” Journal of Composite Materials, Vol. 37, pp. 1821-1837, 2003.
- [22] Khodaei, M., Haghghi-Yazdi, M., Safarabadi, M., “Numerical modeling of high velocity impact in sandwich panels with honeycomb core and composite skin including composite progressive damage model,” Journal of Sandwich Structures & Materials, doi.org/10.1177/1099636218817894
- [23] Vishwas, M., Joladarashi, sh.,Kulkarani SM., “Investigation on effect of using rubber as core material in sandwich composite plate subjected to low velocity normal and oblique impact loading,” Scientia Iranica, Vol. 26, No. 2, pp897-907.
- [24] Khondabi, R., Khodarahmi, H., Hosseini, R., Zia Shamami, M., “Experimental and numerical investigation into the effect of core density on the energy absorption of sandwich panels with Aluminum face sheets and Polyurethane foam core,” in Persian, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, Vol. 52, No. 10, pp. 131-140, 2019.