

ISAV2023

سیزدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات

۲۹ و ۳۰ آذر ماه ۱۴۰۲ - تهران - ایران



انجمن آکوستیک و ارتعاشات ایران

ساخت، شبیه سازی عددی و تست تجربی صفحات ساندویچ کامپوزیتی تحت بار ضربه ای

رضا آذرآفزا^{۱*}، علی داور^۱، مجید قدیمی^۲

^۱ ایران، تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵، دانشیار

^۲ ایران، تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشجوی دکتری

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: azarkntu@yahoo.com , azarmut@mut.ac.ir

چکیده

صفحات ساندویچی کامپوزیتی تقویت شده با هسته مشبک یکی از جدیدترین نوع ساختارهای کاربردی در سازه های هوافضا می باشند که از دو رویه نازک متصل شده به یک هسته مشبک از بالا و پایین تشکیل می شوند و به دلیل مزایای خوبشان مانند نسبت سختی خمشی به وزن بالا نه تنها در هوافضا بلکه در دیگر کاربردهای مهندسی از قبیل صنایع نظامی، کشتی سازی، حمل و نقل ریلی، سکوها نفتی و... مورد استفاده قرار می گیرند. سختی خمشی بالای این صفحات حاصل فاصله گرفتن صفحات سازه ای دو طرف توسط هسته سبک می باشد که باعث تحمل بار خمشی زیاد و در عین حال وزن کم می شود. در این پژوهش دو نمونه صفحه ساندویچی با هسته لانه زنبوری آلومینومی و رویه کامپوزیتی با رزین اپوکسی که یکی شامل الیاف شیشه و دیگری الیاف کربن است، ساخته شده و بصورت تجربی تحت بار ضربه ای با سرعت پایین تست شده اند. همچنین تحلیل ضربه با سرعت پایین بوسیله نرم افزار ANSYS انجام شده و نتایج بدست آمده با هم مقایسه شده اند. ملاحظه شد که نتایج تست تجربی و عددی تطابق خوبی داشتند و همچنین صفحه ساندویچی کامپوزیتی با الیاف شیشه از مقاومت بیشتری از صفحه ساندویچی کامپوزیتی با الیاف کربن نسبت به ضربه برخوردار است.

کلمات کلیدی: صفحات ساندویچی؛ هسته لانه زنبوری؛ ضربه سرعت پایین؛ رویه کامپوزیتی.

۱- مقدمه

استفاده از سازه های ساندویچی از دیر باز مورد توجه طراحان سازه بوده است و می دانستند که با طراحی چنین سازه هایی می توان از اجسام ضعیف به نحو موثرتری استفاده نمود. سازه های ساندویچی از دو پوسته (رویه) نازک و سفت از موادی فلزی یا کامپوزیتی ساخته شده اند که بوسیله یک لایه نسبتاً ضخیم از یک ماده با چگالی پایین تر و یا سفتی کمتر از هم جدا شده اند. در سازه های

ساندویچی عوامل زیادی باعث آسیب و گسیختگی سازه می‌شوند مانند عدم چسبندگی رویه به هسته، تردی، فرورفتگی هسته، تورق در رویه، ترک هسته، ترک در ماتریس، گسیختگی الیاف در رویه و غیره. سازه‌های ساندویچی در قسمت‌های متحرک بال و باله هواپیما، پره‌های توربین، اتومبیل، قطار، ساختمان، بالابرها، کشتی‌های آلومینیومی و فولادی، پلها، سپر خودرو، مبدل‌های حرارتی و ژنراتورهای تولید بخار، محافظ‌های بسته بندی وسایل و غیره استفاده می‌شوند. سازه‌های ساندویچی در برابر بارهای خارجی مانند برخورد اشیاء خارجی، حساس و آسیب پذیر هستند. قطعات ماشین الات صنعتی و سازه‌ها، بیشتر اوقات علاوه بر اینکه تحت بارهای استاتیکی قرار دارند، تحت بارهای دینامیکی مخصوصاً ضربه نیز قرار می‌گیرند. مانند برخورد اجسام خارجی فضایی به سازه‌های فضایی، ماهواره‌ها، دیوارهای ساختمانها و بدنه اتومبیلها و قطارها. تعامل اثرات هسته با رویه‌ها از نظر عملکرد در مقابل بارهای ضربه ای و نیز آنالیز ارتعاشی باعث پیچیده شدن موضوع می‌گردد. مورد دیگر رفتار انعطاف‌پذیر هسته میانی و حالت الاستیک آن می‌باشد که نتیجه آن باعث پیچیده شدن موضوع مطالعه دینامیکی عکس‌العمل سازه در مقابل بارهای ضربه ای می‌گردد. ضعف در برابر ضربه یکی از معایب مهم مواد مرکب به حساب می‌آید، به همین دلیل در چند دهه گذشته مساله ضربه بر روی مواد کامپوزیت مورد توجه زیادی قرار گرفته است. علاوه بر این عیب چقرمگی شکست پایین، تردی و شکنندگی، تعمیر و نگهداری و بازرسی سخت و همچنین حد تحمل خسارت پایین از دیگر معایب این مواد هستند. با پیدایش رایانه و امکان بکارگیری آن در تحلیل ماتریس‌ها، کاربرد روش اجزا محدود گسترش وسیعی پیدا کرده است. شاید بتوان گفت که عامل اصلی آن انطباق قابل پذیرش نتایج حاصله از روش اجزا محدود و قابلیت رایانه است. همانطور که قبلاً گفته شد هدف این تحقیق بررسی روش ساخت و تاثیر بارهای دینامیکی با سرعت پایین به صورت تست تجربی و عددی بر روی سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی با جنس رویه کامپوزیتی با الیاف کربن و شیشه و بدست آوردن روند آسیب دیدگی و حداکثر تحمل این سازه‌ها در ضربه است. در این خصوص تحقیقات داخلی و خارجی گوناگونی انجام شده است که به برخی از آنها در ادامه اشاره می‌شود. جانسون و همکارانش با شبیه‌سازی ضربه روی کامپوزیت‌های پوسته‌ای به این نتیجه رسیدند که سفتی ضربه زننده یکی از فاکتورهای موثر بر میزان آسیب در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف است [۱]. نیک و همکاران به بررسی رفتار ضربه و خصوصیات پس از ضربه کامپوزیت شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی با لایه چینی‌های مختلف پرداختند و نتیجه گرفتند که کامپوزیت‌های هیبریدی که در آن کربن در خارج و شیشه در داخل است دارای بهترین مقاومت فشاری هستند، بنابراین با این چیدمان ناحیه آسیب و اندازه ترک نسبت به بقیه کمتر است [۲]. لونت اختای و همکاران هسته‌های لانه زنبوری در ساختار ساندویچی را با رویه کربن/اپوکسی و چسب واسط فنولیک را به صورت عددی و تجربی تحت بار محوری و برشی بررسی کردند، در این آزمایش از لانه زنبوری‌های آلومینیومی و نومکس استفاده شد [۳]. ایسکو و کیو به بررسی تاثیر ضخامت بر روی خواص مکانیکی لانه زنبوری پرداختند [۴]. لیرا به توسعه روش عددی و تحلیلی برای بدست آوردن مدول برشی سازه لانه زنبوری پرداخت [۵]. هوفت و پارک یک حل تحلیلی برای محاسبه حد بالستیک هانی کمب ساندویچ شده بین دو صفحه فلزی که در معرض ضربه عمودی پرتابه‌های تخت و کروی قرار گرفته است را انجام دادند [۶]. حسین زاده و همکاران به بررسی اثر جنس و ضخامت بر رفتار کامپوزیت و اندازه ناحیه آسیب پرداختند. آنها برای انجام آزمایش از چهار نمونه با ابعاد یکسان، رزین اپوکسی و الیاف شیشه و کربن استفاده کردند و نتیجه گرفتند که کامپوزیت شیشه اپوکسی در بین ساختارها از بقیه ضعیف تر می‌باشد. برای استفاده از مزایای هر دو این مواد میتوان آنها را باهم ترکیب کرد و کامپوزیت هیبرید کربن/شیشه/اپوکسی را ساخت [۷]. قاجار و همکاران به بررسی اثر شکل ضربه زننده در دماهای بالا روی صفحات کامپوزیتی با شکل ضربه زننده با اشکال مختلف پرداختند و دریافتند که در مورد اثر ضربه زننده بیشترین نیروی برخورد مربوط به ضربه زننده تخت و کمترین نیروی برخورد مربوط به ضربه زننده مخروطی می‌باشد و بیشترین زمان برخورد مربوط به ضربه زننده مخروطی و کمترین زمان مربوط به ضربه زننده سر تخت می‌باشد [۸].

۲- فرآیند ساخت نمونه‌های صفحات ساندویچی

برای ساخت صفحه ساندویچی با رویه کامپوزیتی و هسته آلومینیومی از مواد زیر استفاده شده است:
 ۱- هسته لانه زنبوری از جنس آلومینیوم، ۲- رزین وهاردنر، ۳- پارچه با الیاف کربن ۳۵۰ گرمی (تار و پودی) ۴- پارچه با الیاف شیشه ۴۰۰ گرمی (تار و پودی). که مشخصات هندسی و وزنی صفحات ساندویچی در جدول ۱ آمده است.

هسته با ضخامت ۱۰ میلی‌متر، قطر داخلی سلول‌ها ۰,۱۲۵ اینچ، ضخامت دیواره سلول ۰,۱۲ میلی‌متر، جنس آلومینیوم گرید ۵۰۵۲. پارچه با الیاف کربن ۳۵۰ گرمی، پارچه با الیاف شیشه ۴۰۰ گرمی و رزین از جنس اپوکسی می‌باشد که خواص مکانیکی آنها مطابق جدول ۲ می‌باشد. برای عملکرد بهتر، ماتریس با محلولی بنام هاردنر که از ماتریس رقیق‌تر است با نسبت وزنی ۵٪ سخت‌کننده ترکیب شد. ابعاد هسته برای حالت اولیه ساخت ۲۱۰×۳۱۰ میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات ابعادی نمونه‌های ساخته شده صفحه ساندویچی

نوع روکش	وزن بر واحد سطح (gr/m ²)	طول (mm)	عرض (mm)	ضخامت کل (mm)	ضخامت هسته (mm)	ضخامت لایه‌های هر طرف (mm)	تعداد لایه در هر طرف
الیاف شیشه	۲۶۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۱,۴	۱۰	۰,۷	۲
الیاف کربن	۲۴۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۱,۴	۱۰	۰,۷	۲

جدول ۲. خواص فیزیکی و مکانیکی رزین اپوکسی، الیاف شیشه (E-Glass) و الیاف کربن در دمای محیط.

جنس	دانسیته (Kg/m ³)	مقاومت کششی (M.pa)	مقاومت فشاری (M.pa)	مدول الاستیسیته (G.pa)
رزین اپوکسی	۱۱۰۰	۸۰	۱۵۰	۲
الیاف کربن	۱۷۵۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۲۵۰
الیاف شیشه	۲۵۴۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۷۳
آلومینیوم ۵۰۵۰	۲۷۴۰	۱۷۵	۱۶۵	۷۰

برای ساخت نمونه صفحه ساندویچی با رویه صفحات از جنس الیاف کربن و الیاف شیشه، ابتدا صفحه‌ای که روی آن صفحه ساندویچی ساخته می‌شود باید کاملاً تمیز گردد، یعنی عاری از هر گونه آلودگی باشد. بعد از اینکه سطح تمیز شد روی آن لایه ای نازک از جدا کننده می‌زنند تا در موقع چسباندن رویه‌ها به هسته توسط چسب، رویه‌ها به سطح مورد نظر نچسبند.

برای شروع، رول الیاف را آماده کرده و تکه ای به ابعاد ۲۱۰×۳۱۰ میلی‌متر از رول با پیچی و با دقت بریده می‌شود، چون الیاف کربن بسیار نرم است تار و پودهای آن به راحتی از هم جدا می‌شوند بنابراین برای تهیه الیاف کربن باید با دقت عمل کرد. تکه ای بریده شده را روی صفحه ای که قبلاً با جدا کننده آغشته شده، قرار داده می‌شود و به آرامی رزین روی پارچه با الیاف کربنی با استفاده از قلم مو مالیده می‌شود تا الیاف کربن بارزین خیس شود. بعد از این کار، تکه دوم پارچه کربن دقیقاً در راستای تار و پود الیاف کربن اولی قرار داده می‌شود و دوباره با استفاده از قلم مو به اندازه ای که رزین، الیاف را خیس کند روی الیاف کربن با آرامی مالیده می‌شود. البته باید دقت کرد که موقع آغشته سازی الیاف کربن با رزین توسط قلم مو، الیاف کربن چروک نشود. چون الیاف کربن بسیار نرم است و براحتی زیر قلم مو چروک می‌شود و راستای تار و پودهای دولایه که روی هم قرار گرفته اند تغییر می‌کند.

وقتی قسمت اول رویه زیرین آماده شد (رویه زیرین از دو لایه به ضخامت کل ۰,۷ میلی‌متر) و روی آنها رزین کافی وجود داشت هسته لانه زنبوری روی لایه‌های رزین کاری شده قرار می‌گیرد، تا هسته به رویه‌ها بچسبد. برای اینکه اتصال محکم باشد، روی هسته لانه زنبوری وزنه‌هایی (۳ کیلویی) به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد تا لایه بطور کامل به هسته لانه زنبوری بچسبد و اتصال هسته به رویه‌ها محکم گردد. بعد از ۲۴ ساعت مرحله دوم یعنی چسباندن لایه‌های بالایی شروع می‌شود. برای اینکار لایه نایلونی را که کاملاً تمیز می‌باشد روی سطح میز (صفحه کار) پهن کرده، سپس به همان روش قبلی دو تکه پارچه با الیاف کربن به ابعاد ۲۱۰×۳۱۰ میلی‌متر با دقت بریده می‌شود. حال لایه اولی روی لایه نایلونی به طور آرام پهن شده و با نهایت دقت توسط قلم مو رزین روی الیاف مالیده می‌شود، تا اینکه الیاف کاملاً خیس گردد. بعد لایه دوم الیاف را در همان راستای الیاف اولی خوابانده می‌شود یعنی بطوریکه تار و پودهای هر دو الیاف در یک راستا قرار بگیرند، دوباره توسط یک قلم رزین روی الیاف‌ها با نهایت دقت مالیده می‌شود. پس از آماده شدن رویه بالایی (شامل دو لایه به ضخامت کل ۰,۷ میلی‌متر)، وزنه‌های روی هسته ای که قبلاً روی لایه‌های زیرین قرار گرفته بود و

اکنون به همدیگر محکم چسبیده اند، برداشته می شوند و با آرامی و با کمال دقت نایلکس را با لایه‌های به هم چسبیده الیاف‌ها بلند کرده و روی هسته آلومینیومی قرار داده می شود. طوری که رویه‌ها روی هسته قرار گرفته و نایلونی بالا باشد. سپس نایلون از رویه‌ها جدا می گردد و آنرا به مدت ۲۴ ساعت آزاد می گذرانند تا رویه‌ها به هسته بچسبند و در نهایت صفحه ساندویچی کامل شده و محکم گردد. نمونه دوم (با الیاف شیشه) نیز به همین ترتیب ساخته می شود. بعد از ۲۴ ساعت قطعه مورد نظر برای تست، با اندازه‌های دقیق ۳۰۰×۲۰۰ میلی متر از آن تهیه می گردد.

۳- تست تجربی

برای بررسی تست عملی دو صفحه ساندویچی با رویه از جنس الیاف شیشه و الیاف کربن، از دستگاه ضربه ثقلی استفاده شده است. تست نمونه‌ها بر اساس استاندارد مرجع ASTM D7136 انجام گرفت و از ضربه زننده سرکروی با قطر ۲۲ میلی‌متر و با شعاع سر ۱۲٫۵ از جنس فولاد ST42 استفاده شد که در شکل ۱ مشاهده می شود.



شکل ۱. ضربه زننده مورد استفاده در تست

دستگاه تست مطابق استاندارد می‌تواند بصورت ضربه توسط وزنه افتان در راستای قائم با و بدون سرعت اولیه باشد. طوری که ضربه زننده روی یک صفحه نصب شده و صفحه حامل ضربه زننده به کمک دو میل راهنما به طرف پایین، به سمت نمونه رها می شود. در آزمایش انجام گرفته با دستگاه تست وزنه افتان، قابلیت افزایش ارتفاع پرتابه تا ۱٫۵ متر وجود دارد و برای ثابت نگهداشتن نمونه صفحه ساندویچی، از فیکسچر متشکل از دو صفحه فولادی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده گردید که در وسط هر دو صفحه سوراخ مربعی به ابعاد ۷۰ در ۷۰ میلی‌متر جهت عبور ضربه زننده ایجاد شده است صفحات با چند عدد پیچ و مهره بهم بسته شده اند تا در حین برخورد، از جابجایی نمونه‌ها جلوگیری گردد. شکل ۲ دستگاه تست ضربه سرعت پایین را نشان می دهد.



شکل ۲. دستگاه تست ضربه سرعت پایین

به منظور تخمین کلی مقاومت نهایی سازها در مقابل برخورد ضربه زنده، وزنه‌ها به نحوی انتخاب گردیدند که آسیب از کم شروع شده و تا پارگی سازه ادامه یابد. به همین منظور هر کدام از نمونه‌ها به صورت جداگانه مورد تست ضربه قرار گرفتند. جرم وزنه‌ها به صورت تخمینی انتخاب شد و آزمون طی ۵ ضربه متفاوت از ارتفاع ثابت تست (h) و سرعت ثابت (v) ولی با انرژی متفاوت (E) انجام گرفت.

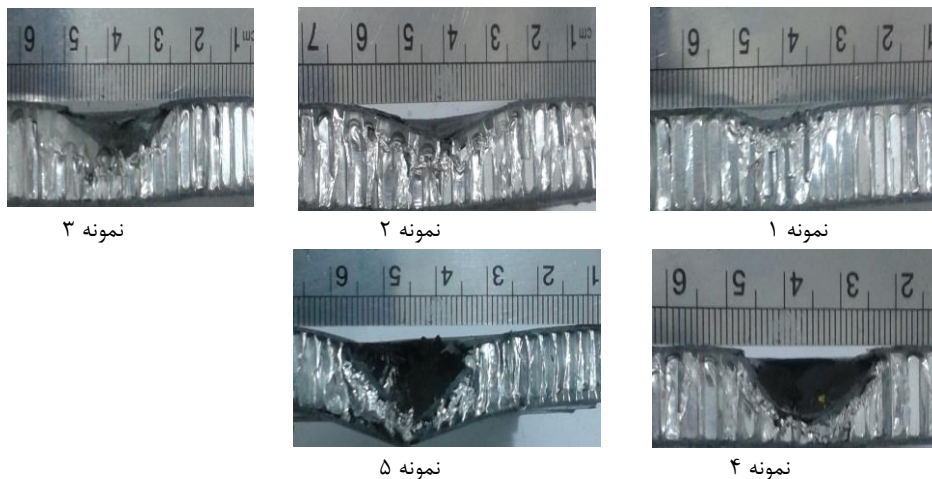
۴- تست صفحه ساندویچی با رویه الیاف کربن

تست نمونه‌های صفحات ساندویچی با رویه الیاف کربنی، با رها نمودن وزنه ۱٫۵ کیلوگرمی از ارتفاع ثابت ۰٫۵ متر شروع گردید که باعث آسیب دیدگی جزئی صفحه رویی گردید. در ادامه جرم وزنه تا ۸٫۵ کیلوگرم به صورت پله‌ای طی ۴ مرحله (بدون تغییر ارتفاع) افزایش یافت که با این وزنه، ضربه زنده صفحه ساندویچی را تخریب نمود که نتایج آن در جدول ۳ و شکل ۳ مقطع برش خورده صفحات را در محل ضربه نشان می‌دهند.

جدول ۳. نتایج تجربی در صفحه ساندویچی با رویه الیاف کربن

شماره تست	وزنه (kg)	ارتفاع (m)	انرژی (J)	سرعت (m/s)	عمق آسیب تست تجربی (mm)
۱	۱٫۵	۰٫۵	۷٫۳۵	۳٫۱۳	۲٫۷
۲	۲٫۵	۰٫۵	۱۲٫۲۵	۳٫۱۳	۴
۳	۴	۰٫۵	۱۹٫۶	۳٫۱۳	۶
۴	۶	۰٫۵	۲۹٫۴	۳٫۱۳	۸
۵	۸٫۵	۰٫۵	۴۱٫۶۵	۳٫۱۳	۱۰

ملاحظه می‌شود که با افزایش وزنه تا حداکثر ۸٫۵ کیلوگرم از ارتفاع نیم متری که باعث ایجاد نیروی ۴۱٫۶۵ نیوتن می‌شود سبب می‌شود تا رویه زیرین نیز دچار آسیب شود و صفحه ساندویچی کاملاً تخریب شود.



شکل ۳. برش مقطع نمونه‌های صفحه ساندویچی با رویه کربن

مطابق ۳ مشاهده می‌شود که در ضربه اول تنها فرورفتگی جزئی در صفحه بالا و آسیب سطحی و شکستگی روکش کربنی و آسیب جزئی به هسته هانی کمب به عمق ۲٫۷ ایجاد شده است. در ضربه دوم میزان آسیب صفحه رویی به دلیل نیروی کششی بیشتر از حد تحمل کامپوزیت به حد پارگی رسیده و میزان فرورفتگی هسته تا عمق ۴ میلیمتر افزایش یافته است. در ضربه سوم میزان پارگی صفحه رویی بیشتر شده و تقریباً تا ۵۰ درصد ضخامت هسته یعنی ۶ میلیمتر فرو رفتگی پیدا کرده است. در ضربه چهارم با افزایش میزان آسیب و پارگی صفحه رویی و هسته عمق فرورفتگی به حدود ۸ میلیمتر رسیده است. در ضربه پنجم ضربه زنده باعث

شکستگی و تخریب کل سازه می‌گردد ولی با توجه به میزان زیاد نیرو و تمرکز بیشتر آن، میزان سطح آسیب افزایش زیادی نیافته است.

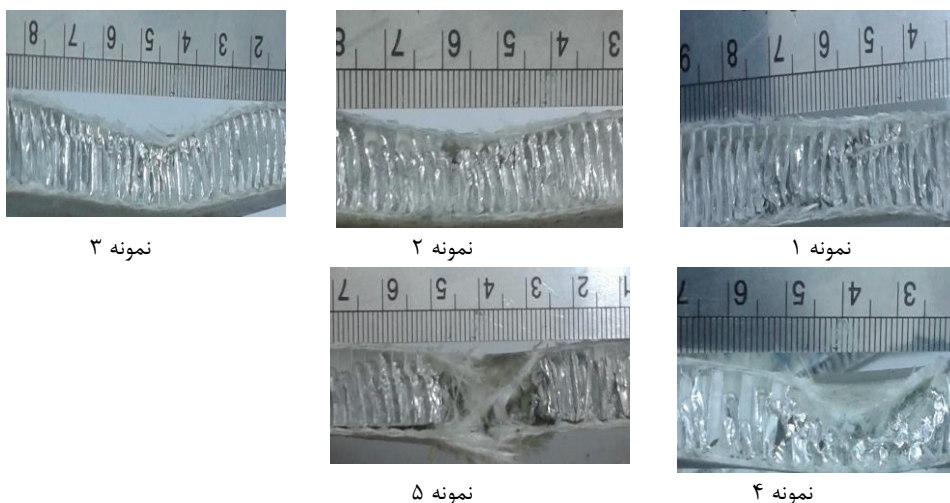
۵- تست صفحه ساندویچی با رویه الیاف شیشه

برای تست به دلیل محدودیت وزنه در ارتفاع نیم متر، ارتفاع یک متر به عنوان ارتفاع ثابت برای همه وزنه‌ها در نظر گرفته شد و وزنه ۴ کیلوگرم به عنوان اولین وزنه انتخاب شده که باعث آسیب جزئی در صفحه بالایی گردید و طی ۵ مرحله وزنه‌ها تا ۱۲ کیلوگرم افزایش پیدا کردند که در وزنه ۱۲ کیلوگرم ضربه زننده باعث تخریب کامل ساندویچ پانل شده و از صفحه زیرین عبور نمود. نکته جالب توجه اینکه با افزایش نیروی ضربه و افزایش تمرکز تنش، مانند الیاف کربن باعث کاهش آسیب به نواحی اطراف موضع ضربه شد، که نتایج آن در جدول ۴ و شکل ۴ آورده شده است.

جدول ۴. نتایج تجربی در صفحه ساندویچی با رویه الیاف شیشه

شماره تست	وزنه (kg)	ارتفاع (m)	انرژی (J)	سرعت (m/s)	عمق آسیب تست تجربی (mm)
۱	۴	۱	۳۹.۲	۴.۴۲	۱.۴
۲	۶	۱	۵۸.۸	۴.۴۲	۲.۵
۳	۹	۱	۸۸.۲	۴.۴۲	۵.۵
۴	۱۰.۵	۱	۱۰۲.۹	۴.۴۲	۷
۵	۱۲	۱	۱۱۷.۶	۴.۴۲	۱۰

شکل ۱۰ مقطع برش خورده صفحات را در محل ضربه نشان می‌دهند. مطابق این شکلها مشاهده می‌شود که در ضربه اول وزنه چهار کیلوگرم تقریباً مقدار آسیب قابل مشاهده جزئی بوده و برابر ۱,۴ میلیمتر می‌باشد. در ضربه دوم و وزنه ۶ کیلوگرم میزان آسیب لایه رویی هنوز به حد تخریب و پارگی نرسیده و حتی با وجود میزان فرورفتگی ۲,۵ میلیمتری در هسته، هنوز صفحه رویی دچار پارگی نشده است. در ضربه سوم میزان وزنه ۹ کیلوگرم بوده که باعث آسیب به عمق ۵,۵ میلیمتر در هسته شده ولی هنوز تنش وارده به لایه رویی به حد تنش پارگی لایه رویی نرسیده است. در ضربه چهارم با افزایش میزان وزنه به ۱۰,۵ کیلوگرم تنش در لایه رویی سبب پارگی آن شده و میزان لهیدگی هسته به ۷ میلیمتر می‌رسد ولی هنوز صفحه زیرین سالم می‌باشد. در ضربه پنجم و وزنه ۱۲ کیلوگرمی سازه تسلیم شده و ضربه زننده از صفحه زیرین عبور می‌نماید.



شکل ۴. مقطع ساندویچ پانل با روکش شیشه

۶- شبیه سازی تست تجربی با نرم افزار ANSYS

روند حل مساله بدین صورت است که مدل سازی در محیط WorkBench انجام شده است. و برای حل از LS-DYNA استفاده شده است. سازه ساندویچی با ساختاری که هسته آن لانه زنبوری از جنس آلومینیوم ۵۰۵۲ بوده و رویه های بالا و پایین آن از جنس کامپوزیت شیشه اپوکسی و یا کربن اپوکسی می باشد، تحت بار ناشی از سقوط ضربه زنده از یک ارتفاع مشخص مورد بررسی قرار گرفته است. برای صرفه جویی در زمان حل مسئله فرآیند سقوط ضربه زنده، ارتفاع در شبیه سازی در نظر گرفته نشده و به جای آن سرعت اولیه برای ضربه زنده در آستانه برخورد با سازه در نظر گرفته شده است. ضربه زنده را به صورت صلب و سازه ساندویچی غیر صلب فرض شده است. شرایط تماس بین آنها، شرایط بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است. با توجه به قرار گیری سازه ساندویچی در قیدی که امکان حرکت دورانی و انتقالی آن را محدود ساخته است، شرایط تکیه گاهی برای سازه به صورت گیردار در نظر گرفته شده است. ضخامت لایه هانی کمب ۱۰ میلی متر در نظر گرفته شده که در دو طرف آن دولایه از مواد کامپوزیتی در نظر گرفته شده است. پس از مدل سازی و تعیین شرایط مرزی و جنس اجزا و سایر پارامترها در نرم افزار ANSYS و حل نتایج شبیه سازی صفحه ساندویچی با رویه الیاف کربن و با رویه الیاف شیشه در جدول ۵ آورده شده اند.

جدول ۵. خروجی نرم افزار در صفحه ساندویچی با رویه های مختلف

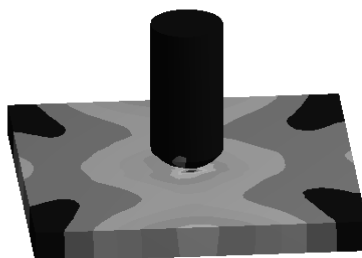
شماره تست	میزان فرورفتگی ساندویچ پانل با رویه الیاف کربن در نرم افزار (mm)	میزان فرورفتگی ساندویچ پانل با رویه الیاف شیشه در نرم افزار (mm)
۱	۳,۱	۱,۲
۲	۴,۴	۲,۸
۳	۵,۲	۴,۸
۴	۷	۷,۷
۵	عدم حل	-

آن می توان به

نمودار سرعت و تنش های جهتی اشاره نمود. شکل ۵ (الف و ب) به ترتیب کانتور سرعت در لحظه شروع تماس و کانتور تنش را نشان می دهند. ملاحظه می شود که بیشترین تنش وارده به صفحه ساندویچی درست در زیر نوک ضربه زنده می باشد و از آنجائیکه مقدار فرورفتگی در تست های انجام گرفته اندازه گیری شده اند، در خروجی نرم افزار مقدار باقی مانده تغییر شکل پس از برخورد به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است که نتایج آن در جدول ۵ آمده اند.

Unit: MPa
Time: 2.9547e-004
8/13/2015 2:03 PM

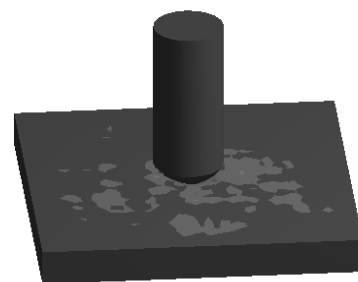
111.16 Max
98.809
86.458
74.107
61.756
49.405
37.054
24.702
12.351
0 Min



(ب)

B: Explicit Dynamics
Figure
Type: Total Velocity
Unit: mm/s
Time: 4.5002e-004
8/13/2015 1:58 PM

42988 Max
38211
33435
28658
23882
19106
14329
9552.8
4776.4
0 Min



(الف)

شکل ۵. نتایج شبیه سازی (الف) کانتور سرعت در لحظه شروع تماس (۰.۴۵ میلی ثانیه) (ب) کانتور تنش

۷- تجزیه و تحلیل نتایج

جدول ۶ نتایج تست تجربی و شبیه سازی صفحه ساندویچی با رویه الیاف کربن را نشان می‌دهد و میزان عمق آسیب در آنها با هم مقایسه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار خطا ۱۴/۸ درصد می‌باشد. در ضربه پنجم و وزنه ۸٫۵ کیلوگرمی در تست تجربی ساندویچ پانل تخریب گردید ولی در تست شبیه سازی به دلیل خطای نرم افزاری (افزایش مقدار خطای انرژی) محاسبه قابل انجام نبود. همچنین جدول ۷ نتایج تست تجربی و شبیه سازی صفحه ساندویچی با رویه الیاف شیشه را نشان می‌دهد و میزان عمق آسیب در آنها با هم مقایسه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار خطا ۱۴/۳ درصد می‌باشد. در ضربه پنجم و وزنه ۱۲ کیلوگرمی در تست تجربی ساندویچ پانل تخریب گردید ولی در تست شبیه سازی به دلیل خطای نرم افزاری (افزایش مقدار خطای انرژی) محاسبه قابل انجام نبود.

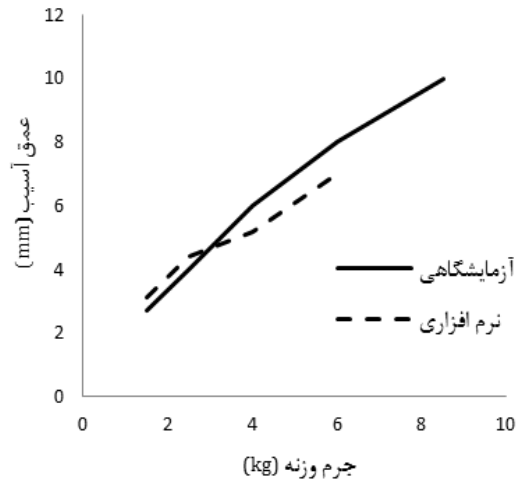
جدول ۶. مقایسه نتایج شبیه سازی با تجربی در صفحه ساندویچی با رویه الیاف کربن و مقدار خطا

شماره تست	وزنه (kg)	ارتفاع (m)	انرژی (J)	سرعت (m/s)	عمق آسیب تست تجربی (mm)	عمق آسیب حالت عددی تجربی (mm)	درصد خطا
۱	۱٫۵	۰٫۵	۷٫۳۵	۳٫۱۳	۲٫۷	۳٫۱	۱۴٫۸
۲	۲٫۵	۰٫۵	۱۲٫۲۵	۳٫۱۳	۴	۴٫۴	۱۰
۳	۴	۰٫۵	۱۹٫۶	۳٫۱۳	۶	۵٫۲	۱۳٫۳۳
۴	۶	۰٫۵	۲۷٫۴	۳٫۱۳	۸	۷	۱۲٫۵
۵	۸٫۵	۰٫۵	۴۱٫۶۵	۳٫۱۳	۱۰	-	-

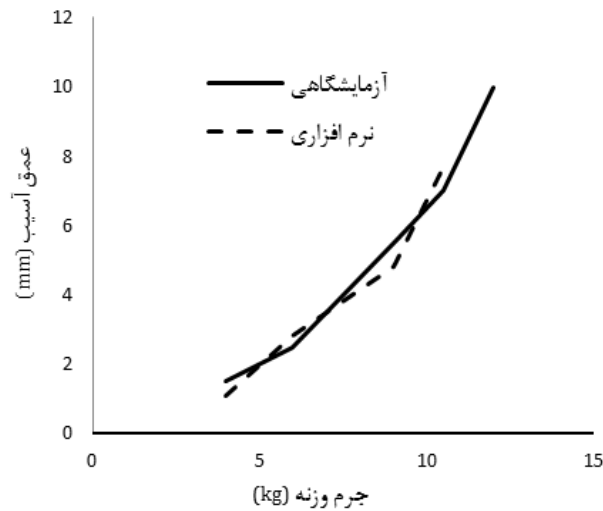
جدول ۷. مقایسه نتایج شبیه سازی با تجربی در صفحه ساندویچی با روکش الیاف شیشه و درصد خطا

شماره تست	وزنه (kg)	ارتفاع (m)	انرژی (J)	سرعت (m/s)	عمق آسیب تست تجربی (mm)	عمق آسیب حالت عددی تجربی (mm)	درصد اختلاف
۱	۴	۱	۳۹٫۲	۴٫۴۲	۱٫۴	۱٫۲	۱۴٫۳
۲	۶	۱	۵۸٫۵	۴٫۴۲	۲٫۵	۲٫۸	۱۲
۳	۹	۱	۸۸٫۲	۴٫۴۲	۵٫۵	۴٫۸	۱۲٫۷
۴	۱۰٫۵	۱	۱۰۲٫۹	۴٫۴۲	۷	۷٫۷	۱۰
۵	۱۲	۱	۱۱۷٫۶	۴٫۴۲	۱۰	-	-

شکل های ۶ و ۷ نمودار عمق آسیب نسبت به جرم وزنه را برای دو روش تجربی و عددی به ترتیب برای صفحه ساندویچی با رویه الیاف کربن و رویه الیاف شیشه نشان می‌دهند. همانگونه که ملاحظه می‌شود نمودارهای روش تجربی و عددی از انطباق خوبی برخوردار هستند که نشان دهنده دقت شبیه سازی می‌باشد. مقدار خطایی که مشاهده می‌شود می‌تواند به دلیل تاثیر عوامل نرم افزاری یا تاثیر اصطکاک و یا عوامل دیگری چون عدم چسبندگی کامل در ناحیه ضربه و عواملی همچون صرف نظر کردن از حرارت و صوت ناشی از ضربه باشد. همچنین با مقایسه نتایج ضربه روی دو صفحه ساندویچی با رویه های کربن و شیشه، مستقل از روش تست تجربی و یا شبیه سازی نرم افزاری، نتیجه ای جالب بدست آمده است و آن اینکه مقاومت به ضربه صفحه ساندویچی با رویه الیاف شیشه بیش از ۲٫۸ برابر صفحه ساندویچی با رویه الیاف کربن می‌باشد. با توجه به مشابه بودن جنس و سازه هسته و نوع چسب استفاده شده به عنوان متصل کننده هسته به رویه ها، می‌توان نتیجه گرفت که یکی از دلایل مقاومت به ضربه بالای صفحه ساندویچی با رویه الیاف شیشه می‌تواند مربوط به خواص ترکیبی رویه شیشه به هسته باشد که قبلاً نیز ذکر گردید و از خواص منحصر به فرد صفحه ساندویچی می‌باشد که ترکیب چند ماده ضعیف منجر به ساخت یک سازه قدرتمند و سبک می‌شود.



شکل ۶. نمودار عمق آسیب به جرم وزنه در صفحه ساندویچی با رویه الیاف کربن در تست تجربی و شبیه سازی



شکل ۷. نمودار نسبت عمق آسیب به جرم وزنه در صفحه ساندویچی با رویه الیاف شیشه در تست تجربی و شبیه سازی

۸- نتیجه گیری

- ۱- نتایج تست تجربی تا حد قابل قبولی نتایج شبیه سازی نرم افزاری را تایید نمود و حداکثر میزان اختلاف این دو فرایند حدود ۱۴/۸ درصد بود.
- ۲- حداکثر مقاومت ضربه‌ای صفحه ساندویچی با رویه الیاف شیشه در این تحقیق ۱۱۸ ژول و برای صفحه ساندویچی با هسته مشابه و رویه الیاف کربن ۴۲ ژول می باشد.
- ۳- مقاومت ضربه‌ای صفحه ساندویچی با رویه الیاف شیشه ۲/۸ برابر مقاومت صفحه ساندویچی با هسته مشابه و رویه الیاف کربن می باشد.
- ۴- با توجه نتایج تحقیق بنظر می رسد که سختی سطحی الیاف شیشه دلیل بر مقاومت بیشتر در مقابل ضربه می باشد.

مراجع

1. [1] A. F. Johnson, and M. Holzappel, "Modeling Soft Body Impact on Composite Structures", *Journal of Composite Structure*, 61, 103-113 (2003).
2. N. K. Naik, P. Shrirao, and B. C. K. Reddy, "Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: formulation", *International Journal of Impact Engineering*, 32(9), 1521-1552 (2006).
3. L. Aktay, F. Alastair, and B. Johnson, "Numerical Modeling of Honeycomb Core Crush Behavior", *Engineering fracture mechanics*, 75(9), 2616-2630 (2007).
4. F. X. Xu, and P. Qiao " Homogenized Elastic Properties of Honeycomb Sandwich with Skin Effect ", *International Journal of Solids Structure*, 39, 2153-88 (2002).
5. C. Lira, P. Innocenti and F. Scarpa, "Transverse Elastic Shear of Auxetic Multi Reentrant Honeycombs", *Composite Structure*, 90, 314-322 (2009).
6. M. S. HooFatt and K. S. Park, "Perforation of Honeycomb Sandwich Plates by Projectiles", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(8), 889-899 (2000).
7. R. Hosseinzadeh, M. M. Shokrieh and L. Lessard, "Damage Behavior of Fibre Reinforced Composite Plates Subjected to Drop Weight Impacts", *Composite Science and Technology*, 66, 61-68 (2006).
8. R. Ghajar and A. Rassaf, "Effect of impactor shape and temperature on the behavior of E-glass/epoxy composite laminates", *Modares Mechanical Engineering*, 14(10), 1-8 (2014).