



بررسی تجربی جذب انرژی ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت/الاستومر

حمیدرضا رضایت^۱، حسین توزنده جانی^{۲*}، امیر ذاکری^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: h.toozandehjani@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۳ مهر ۱۴۰۲

پذیرش: ۹ دی ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

الاستومر

جذب انرژی

ساندویچ پانل

کامپوزیت

امروزه در اکثر سازه‌های هوایی و صنایع دیگر از پانل‌های ساندویچی به عنوان سازه‌های باربر سبک استفاده می‌شود. سطوح صاف و یکنواخت و مقاومت عالی آن در مقابل خستگی، وزن پایین و جذب انرژی خوب آن از ویژگی‌های پانل‌های لانه زنبوری است. در این مقاله به بررسی جذب انرژی و استحکام پانل‌های ساندویچ با رویه کامپوزیتی و استفاده از لایه الاستومر به عنوان لایه بین رویه کامپوزیتی و هسته لانه زنبوری آلومینیومی ۵۰۵۲، تحت بارگذاری پانچ شبه استاتیک، با استفاده از دو سنبه با مقطع مسطح و کروی، به صورت تجربی پرداخته شده است. حالت‌های خرابی در این آزمون شامل چروک شدن صفحه، جدا شدن لایه چسب بین صفحه و هسته، پارگی صفحه، خرد کردن هسته پانل ساندویچی خارج از صفحه، خم شدن مغزی پانل ساندویچی درون صفحه، پارگی مغزی پانل ساندویچی، طبقه‌بندی می‌شوند. با بررسی نتایج تجربی آزمون نفوذ سنبه مشخص گردید که استحکام و جذب انرژی ساندویچ پانل با استفاده از لایه الاستومر ۲۰ درصد افزایش پیدا کرده و انسجام و چسبندگی رویه ساندویچ پانل به هسته بسیار بهبود پیدا کرده است. با استفاده از لایه الاستومر، در آزمون خمش سه نقطه‌ای میزان جابجایی نمونه تا رسیدن به نیروی شکست سازه ۸.۷ برابر افزایش پیدا کرده است.

Experimental study of energy absorption of sandwich panel with composite/elastomer skin

Hamid Reza Rezayat¹, Hossein Toozandehjani^{2*}, Amir Zakeri³

1- PhD Student, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: h.toozandehjani@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 25 September 2023

Accepted: 30 December 2023

Keywords:

Elastomer

Energy Absorption

Sandwich Panel

Composite

Abstract

Nowadays, sandwich panels are used as light load-bearing structures in most aerospace structures and other industries. Smooth and uniform surfaces, excellent resistance to fatigue, low weight, and good energy absorption are the characteristics of honeycomb panels. In this article, to investigate the energy absorption and strength of sandwich panels with composite skin and the use of an elastomer layer as a layer between the composite skin and aluminum honeycomb core 5052 under quasi-static punch loading, using two mandrels with flat and spherical cross-section. The experimental form has been discussed. The failure modes in this test include wrinkling of the skin, separation of the adhesive layer between the plate and the core, tearing of the plate, crushing of the core of the sandwich panel outside the plate, bending of the core of the sandwich panel inside the plate, rupture of the core of the sandwich panel are classified. By examining the experimental results of the mandrel penetration test, it was determined that the strength and energy absorption of the sandwich panel increased by 20% using the elastomer layer, and the cohesion and adhesion of the skin of the sandwich panel to the core was greatly improved. Using the elastomer layer, in the three-point bending test, the displacement of the sample increased by 8.7 times until reaching the breaking force of the structure.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Rezayat H R, Toozandehjani H, Zakeri A. Experimental study of energy absorption of sandwich panel with composite/elastomer skin. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 December 22;10(10):26-42. doi: 10.22034/IJME.2023.418015.1840 [In Persian]

۱- مقدمه

سازه‌های ساندریج پانل در قسمت‌های مختلف هواپیما از قبیل سطوح فرمان‌ها هواپیما، دماغه هواپیما، محفظه موتور هواپیما مورد استفاده قرار می‌گیرند، این اجزاء در طول عمرشان ممکن است در معرض برخورد اشیاء مختلف قرار گیرند، که سبب آسیب رساندن به این اجزاء و ایجاد اختلال در عملکرد آن‌ها می‌شود. تحقیقات زیادی در زمینه جذب انرژی و خرابی در پانل‌های ساندریجی به صورت تجربی و عددی انجام شده است، تلاش برای یافتن یک مدل عددی مناسب برای شبیه‌سازی این پدیده می‌تواند منجر به طراحی دقیق چنین سازه‌هایی شود. ژانگ و همکاران [۱] به بررسی رفتار دینامیکی، مکانیکی و جذب انرژی پانل ساندریجی آلومینیومی با هسته لانه‌زنبوری تحت بار خستگی پرداختند. مدل‌سازی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شد. نمودار نیرو-جابجایی و جذب انرژی نیز به صورت عددی به دست آمد. آن‌ها همچنین نمونه را به صورت تجربی تحت آزمون خستگی قرار دادند و نشان دادند که تطابق خوبی بین نتایج عددی و تجربی برقرار است. زارعی و همکارانش [۲] به بررسی ویژگی‌های جذب انرژی در پانل ساندریجی با هسته لانه‌زنبوری پرداختند. برای آزمایش‌های تجربی از دو سنبه سرگرد و سر تخت استفاده کرده و تأثیر پارامترهای هندسی در میزان جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفت. خیری و همکارانش [۳] در پژوهش حاضر به بررسی رفتار پانل‌های ساندریجی با هسته لانه‌زنبوری تحت آزمایش ضربه با سرعت بالا با استفاده از تفنگ هوای فشرده پرداخته‌اند. یک پرتابه با دماغه مخروطی تیز به طور معمول و با مقداری فاصله (۲۰ و ۴۰ میلی‌متر) اصابت کرد. تغییر شکل، حالت شکست و ویژگی‌های اتلاف انرژی برای هر دو نوع بارگذاری به دست آمد. نتایج آزمون عددی به دست آمده با آزمایش تجربی برای بررسی صحت مدل‌سازی مقایسه شد. علاوه بر این، تأثیر قطر دایره، ضخامت دیواره سلولی، روی اتلاف انرژی، تغییر شکل و حالت شکست مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش سطح ورق و ضخامت دیواره از نظر جذب انرژی تأثیر مثبتی بر مقاومت بالستیک داشت. همچنین پارامترهای هندسی سازه ساندریجی تأثیر قابل توجهی بر اتلاف انرژی در جهات تغییر شکل مختلف داشتند. طریق و همکارانش [۴] به بررسی تجربی پانل ساندریجی آلومینیومی با هسته لانه‌زنبوری پرداختند. نمونه‌ها تحت نفوذ چند سنبه با قطرهای مختلف قرار گرفتند و میزان استحکام و مقاومت فشاری آن‌ها بررسی شد. سان و همکارانش [۵] در مقاله‌ای به بررسی عددی و تجربی بر روی مکانیزم‌های شکست پانل ساندریجی با هسته لانه‌زنبوری در معرض ضربه سرعت بالا پرداختند. در این تحقیق تأثیر ضخامت پوسته، ارتفاع هسته، ضخامت دیواره‌های سلول و اندازه سلول‌ها مورد بررسی قرار گرفت. ژانگ و همکارانش [۶] در مقاله‌ای با هدف بهبود مقاومت پانل‌های ساندریجی، پانل ساندریجی از جنس آلومینیوم که درون سلول‌های آن از یک لوله توخالی فلزی پر شده است را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از افزایش سرعت جذب انرژی و کاهش تغییر شکل پوسته به نسبت پانل‌های ساندریجی بدون لوله بوده است. پتراس و همکارانش [۷] به طور تجربی حالت‌های شکست پانل‌های ساندریجی ساخته شده از پوسته کامپوزیتی تقویت شده با الیاف و لانه‌زنبوری به عنوان هسته را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها همچنین یک مدل نظری در مسئله پانل‌های ساندریجی بر اساس یک نظریه کلاسیک ارائه کردند. فو و همکارانش [۸] رفتار پانل‌های ساندریجی در معرض ضربه با سرعت کم را در نرم‌افزار المان محدود به صورت سه‌بعدی بررسی کردند و اثرات کرنش سختی پوسته آلومینیومی و چگالی هسته لانه‌زنبوری را در پاسخ ضربه مورد بحث قرار دادند. اپاستو و همکارانش [۹] به تجزیه و تحلیل پاسخ ساختارهای ساندریجی آلومینیومی لانه‌زنبوری با اندازه سلول‌های مختلف پرداختند. آن‌ها بر اساس مدل تعادل انرژی، رفتار سازه به صورت عددی بررسی شده است. ژانگ و همکارانش [۱۰] به بررسی و مدل‌سازی آسیب پیش‌رونده در پانل ساندریجی با هسته نومکس و رویه کامپوزیتی تحت آزمون ضربه سرعت پایین به صورت تجربی و عددی پرداخته‌اند. جهت مدل‌سازی آسیب از توسعه معیار پاک استفاده کرده‌اند. در مدل‌سازی عددی جدایش پوسته از هسته لانه‌زنبوری، کماتش سلول‌های لانه‌زنبوری، آسیب ماتریس و الیاف کامپوزیت بررسی شده‌اند. نتایج عددی از دقت مناسبی برخوردار هستند. لیاقت و همکارانش [۱۱] در مطالعه‌ای باهدف بررسی اثرات الاستومرها بر روی ورقه‌های فلزی-کامپوزیتی تحت بارهای ضربه‌ای با سرعت پایین انجام شد. یک لایه لاستیک طبیعی مرکب به ورقه حاوی لایه‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی و لایه‌های آلومینیوم ۲۶-۶۰۶۱ اضافه شد و تأثیر آن بر رفتار سازه در فرورفتگی با سرعت کم در سطوح انرژی ۲۵ و ۴۵ ژول اندازه‌گیری شد. مشخص شد که افزودن یک لایه الاستومری به سطح پشتی لایه کامپوزیت باعث افزایش چقرمگی ساختاری، تغییر شکل قبل از شکستگی و جذب انرژی ویژه در عین کاهش آسیب و حداکثر بار شد. یانگ سان و همکاران [۱۲] به بررسی عددی و تجربی تأثیر پارامترهای ساختاری مختلف در یک ساندریجی پانل با هسته لانه‌زنبوری تحت بار ضربه‌ای با سرعت پایین پرداختند. پارامترهای مورد نظر در این تحقیق عبارت از ضخامت رویه‌ها، ارتفاع هسته، اندازه سلول لانه

زنبوری و ضخامت دیواره سلولها بودند. حسن پور و همکاران [۱۳] به بررسی تجربی مکانیزمهای شکست، جذب انرژی ویژه در ساندویچ پانلها با هسته لانه زنبوری در دو حالت مختلف که در حالت اول درون سلولهای هسته خالی و در حالت دوم درون سلولهای هسته از فوم پلی اورتان پر شده بودند در سه مدل سازه‌ای مختلف پرداختند. در این تحقیق نتایج حاکی از آن بود که در مدل‌هایی که از فوم در درون سلولها استفاده شده بود میزان جذب انرژی با توجه به نوع مدل هندسه بین ۲۳ تا ۵۸ درصد افزایش یافته و همچنین افزایش استحکام دینامیکی و کاهش ناحیه آسیب نیز قابل مشاهده بوده است. ریکاردوچی و همکاران [۱۴] در پژوهشی به بررسی تجربی، تحلیلی و عددی ساندویچ پانل با هسته لانه زنبوری از جنس کربن-اپوکسی تحت فشار لبه‌ای و بار خمش سه نقطه‌ای پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن بروز آسیب و سوراخ شدن به صورت کامل منتهی به سوراخ باز برای سازه‌ها تعمیر به روش اسکارف را در نظر گرفتند و از دو تکه اسکارف با زاویه ده درجه استفاده کردند. همچنین به منظور بررسی خرابی در پوسته‌های این ساندویچ پانل پس از تعمیر، آزمایش‌های تجربی نیز انجام گرفت. همچنین در این پژوهش مدل‌سازی سه بعدی عددی نیز با نرم‌افزار تجاری آباکوس انجام شد. سپس منحنی نیرو-جابجایی و همچنین حالت‌های شکست بدست آمده از مدل‌سازی عددی با نتایج تجربی مقایسه شد و مشخص گردید که مدل عددی برای تخمین رفتار شکست ساندویچ پانل‌های تعمیر شده مناسب است.

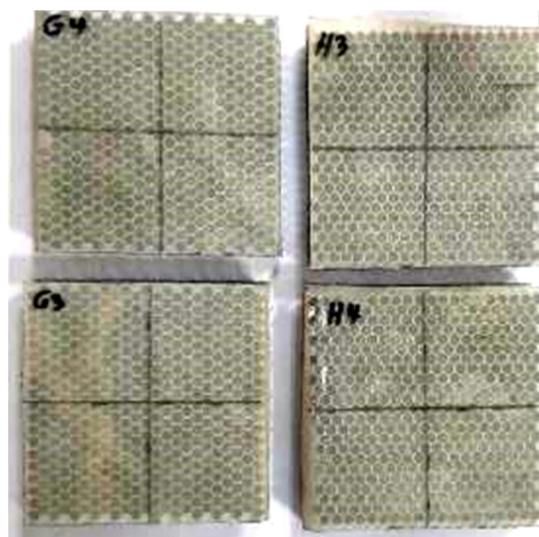
یکی از مسائل مهم در سازه‌های ساندویچی اتصال بین رویه و هسته ساندویچ پانل می‌باشد که اتصال باید به قدر کافی استحکام لازم را داشته باشد. آزمون‌های استوانه بالا رونده، فشار لبه‌ای و کشش سطحی از آزمون‌های بررسی اتصال رویه به هسته ساندویچ پانل می‌باشند. جهت اتصال رویه کامپوزیت به هسته لانه زنبوری آلومینیوم از رزین استفاده می‌شود که اتصال ضعیفی را طبق نتایج آزمون تجربی از خود نشان می‌دهد. در این تحقیق از لایه الاستومر به عنوان لایه واسط و اتصال دهنده رویه به هسته ساندویچ پانل استفاده شده است. جهت بررسی میزان جذب انرژی و استحکام ساندویچ پانل، ابتدا نمونه‌های ساندویچ پانل یکبار بدون لایه الاستومر با اتصال رویه کامپوزیت و هسته آلومینیومی توسط رزین و بار دیگر با اتصال توسط لایه الاستومر ساخته شده و آزمون‌های خمش سه نقطه‌ای و نفوذ سنبه انجام و به بررسی اثر لایه الاستومر در میزان جذب انرژی و استحکام نمونه‌ها پرداخته شده است.

۲- ساخت نمونه‌های ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت/الاستومر

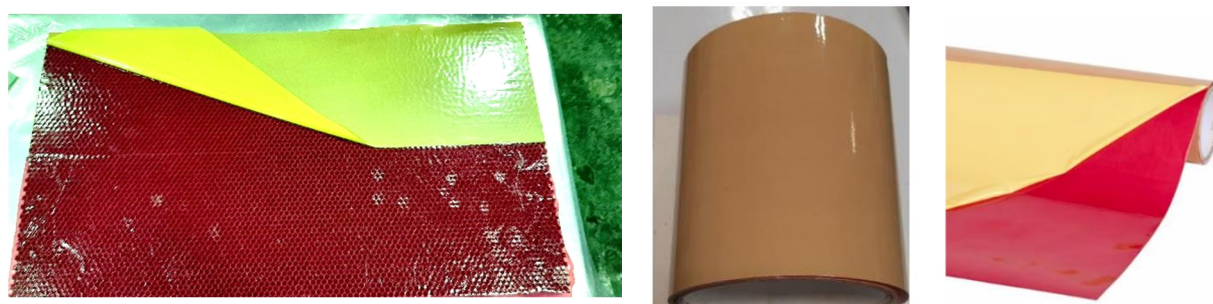
جهت بررسی میزان جذب انرژی و استحکام ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت/الاستومر و بررسی اثر لایه الاستومر در مقادیر جذب انرژی و استحکام سازه، در ابتدا ۸ عدد نمونه ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت بدون لایه الاستومر ساخته شده و پس از آن ۸ عدد نمونه ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت و لایه الاستومر به دلیل سطح مقطع و سرعت‌های نفوذ مختلف سنبه و تکرارپذیری آزمون، ساخته می‌شوند. جهت ساخت نمونه‌های ساندویچ پانل از هسته آلومینیوم ۵۰۵۲ و دو لایه پوسته کامپوزیت (شیشه/اپوکسی) استفاده شده است. نمونه‌های ساندویچ پانل به روش لایه چینی دستی و با استفاده از اتاق گرم ساخته شده‌اند. جهت خروج رزین اضافی از نمونه‌ها از پارچه‌های جاذب رزین (داکرون) و وزنه‌های سربی استفاده شده است. ابعاد نمونه‌های ساندویچ پانل ۱۰×۱۰ سانتی‌متر می‌باشند. ضخامت پوسته ساندویچ پانل ۰.۲۰ اینچ و ضخامت هسته ۱۸.۷۹۶ میلی‌متر است. از رزین EPON ۸۲۸ و هاردنر تا استفاده شده است. میزان درصد ترکیب رزین و هاردنر طبق اطلاعات شرکت سازنده، ۱۰۰ درصد رزین به ۱۰ درصد هاردنر است. نمونه‌های ساخته شده ساندویچ پانل در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است در این نمونه‌ها رویه کامپوزیتی با رزین به هسته لانه زنبوری اتصال پیدا کرده‌اند.

در این روش جهت اتصال رویه به هسته لانه زنبوری از لایه الاستومر با نام تجاری Scotch weld film 143-2 صورتی رنگ استفاده شده است (شکل ۲). ضخامت نامی این لایه ۰/۱۶ اینچ است.

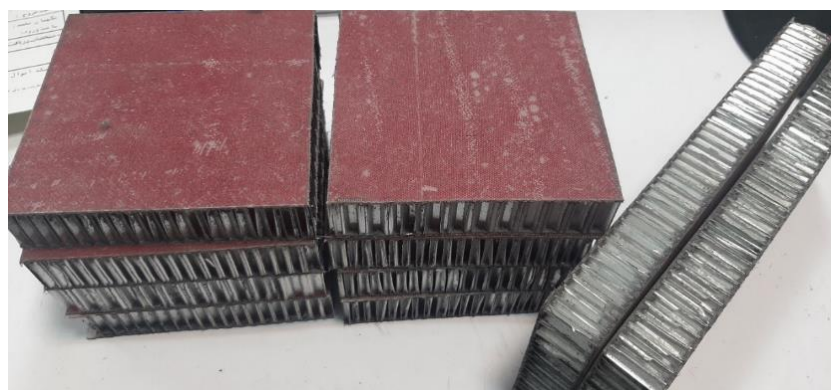
این لایه بهترین عملکرد را در دمای ۵۵ تا ۱۷۷ درجه سانتی‌گراد را دارا است. این لایه جهت ساخت ساندویچ پانل بین رویه و هسته استفاده می‌شود. این لایه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و در مدت زمان ۶۰ دقیقه و تحت فشار ۴۵ psi پخت کامل می‌شود. این چسب به مدت ۶ ماه در دمای ۱۸ درجه سانتی‌گراد نگهداری می‌شود. نمونه‌های ساخته شده مطابق شکل ۳ می‌باشند. خواص مکانیکی هسته آلومینیوم ۵۰۵۲ ساندویچ پانل در جدول ۱ آورده شده است و خواص مکانیکی رویه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی طبق نتایج آزمون‌های تجربی استاندارد خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۱ نمونه‌های ساخته شده ساندویچ پانل با رویه کامپوزیتی



شکل ۲ لایه الاستومر



شکل ۳ نمونه‌های ساخته شده ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت/الاستومر

جدول ۱ خواص مکانیکی هسته لانه زنبوری [۱۵]

چگالی	استحکام خرد کردن هسته	استحکام برشی در راستای L	مدول برشی در راستای L
$91.305 \frac{kg}{m^3}$	2.69 MPa	2.82 MPa	620.5 MPa
استحکام برشی در راستای W	مدول برشی در راستای W	مدول فشاری	استحکام فشاری
1.68 MPa	265.45 MPa	1516.85 MPa	4.13 MPa

جدول ۲ خواص مکانیکی رویه کامپوزیت شیشه/اپوکسی

E1 (MPa)	E2 (MPa)	ν_{12}	G12 (MPa)	G13 (MPa)	G23 (MPa)
13259	13259	0.159	3032	1200	1200

با توجه به اطلاعات کارخانه سازنده استحکام این لایه در ساندویچ پانل‌ها تحت آزمون استوانه بالا رونده و کشش سطحی^۱ طبق استاندارد MIL-A-25463 در جدول ۳ و ۴ آورده شده است.

جدول ۳ استحکام لایه الاستومر در آزمون استوانه بالا رونده [۱۶]

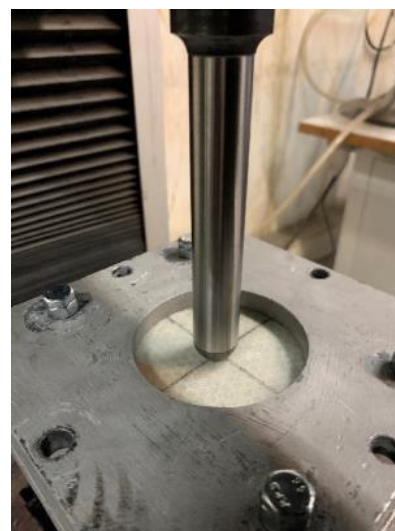
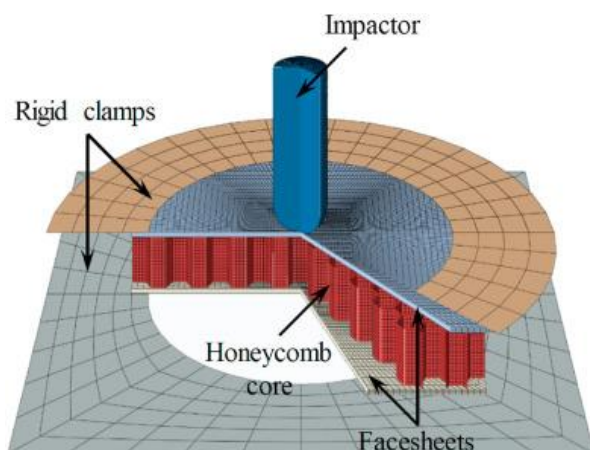
دمای تست	استحکام ساندویچ پانل در آزمون استوانه بالا رونده
24°C	40 in. lb./3 inch wide

جدول ۴ استحکام لایه الاستومر در آزمون کشش سطحی [۱۳]

دمای تست	استحکام ساندویچ پانل در آزمون کشش سطحی
24°C	1100 psi
149°C	700 psi

۳- آزمون تجربی نفوذ سنبه

آزمون‌های نمونه‌ها تحت بارگذاری شبه-استاتیکی با استفاده از دستگاه آزمون یونیورسال ساخت کشور چین انجام گرفته است. در این آزمون از سنبه فولادی با مقطع کروی و تخت با قطر ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. آزمون‌ها با سرعت نفوذ ۵ و ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه انجام شده است، جهت انجام آزمون از فیکسچر فلزی مطابق شکل ۴ برای نگهداری ساندویچ پانل استفاده شده است.



شکل ۴ آزمون نفوذ سنبه

۳-۱- نتایج آزمون تجربی ساندویچ پانل با رویه کامپوزیتی

در این تحقیق ۸ نمونه ساندویچ پانل با رویه کامپوزیتی ساخته شده و مطابق جدول ۵ در سرعت‌های مختلف و با سنبه‌های سرگرد و تخت آزمایش شده‌اند.

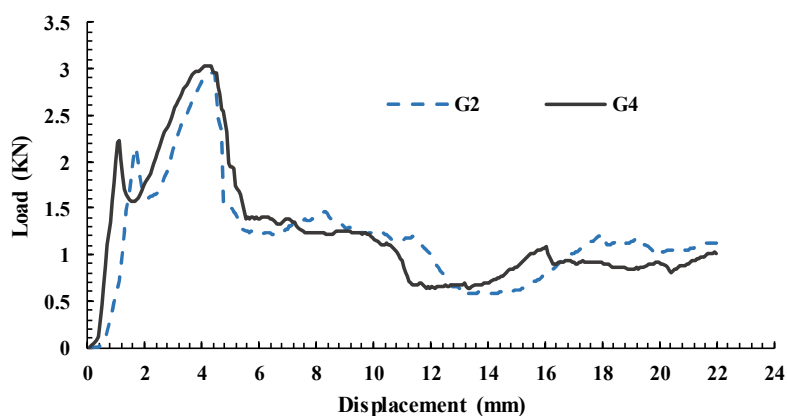
¹ Flatwise

² Drum Peel

جدول ۵ شرایط آزمون نمونه‌ها

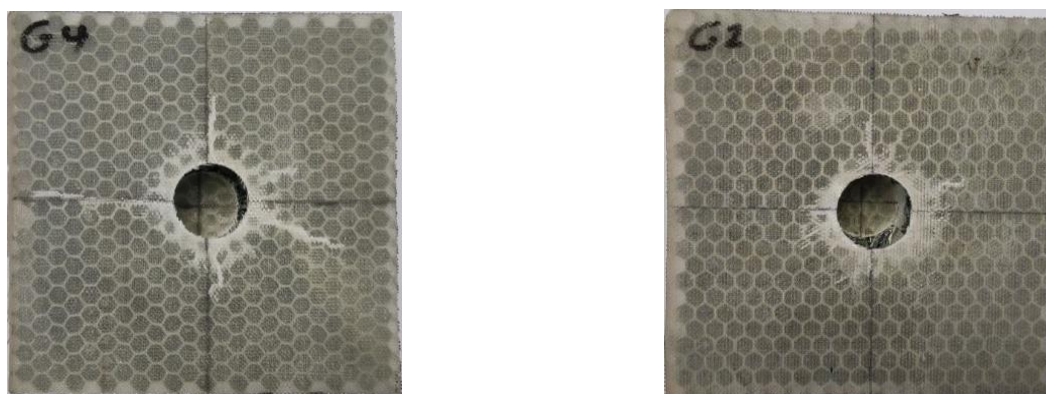
نمونه	سطح مقطع سنبه	سرعت نفوذ
H1-H3	کروی	5 میلی‌متر بر دقیقه
G2-G4	تخت	20 میلی‌متر بر دقیقه
G1-G3	کروی	20 میلی‌متر بر دقیقه
H2-H4	تخت	5 میلی‌متر بر دقیقه

طبق نتایج آزمون تجربی (شکل ۵)، ماکزیمم نیروی به‌دست‌آمده در نمونه‌های G2-G4 ماکزیمم ۲/۹۷ کیلو نیوتن بوده است و میزان نفوذ سنبه در این آزمون ۴/۴۵ میلی‌متر است. با پاره شدن پوسته رویی میزان نیرو با افت شدیدی همراه است و سپس هسته لانه‌زنبوری دچار لهیدگی می‌شود. میزان جذب انرژی در نمونه G2، ۱۵/۰۱ کیلوژول و میزان جذب انرژی در نمونه G4، ۱۶/۸۵ کیلوژول است.



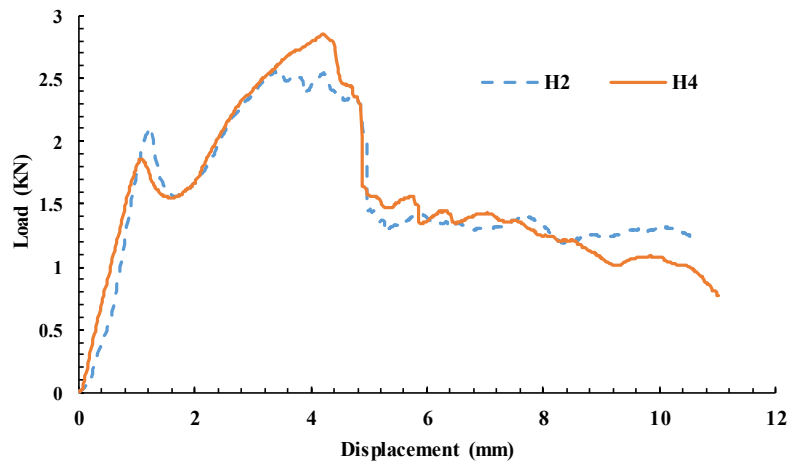
شکل ۵ نمودار نیرو-جابجایی نمونه G2-G4

در شکل ۶ نحوه آسیب سازه ساندویچ پانل در آزمون نشان داده شده است. سوراخی به قطر ۲۱ میلی‌متر ایجاد شده و در ورق، در اطراف سوراخ، به قطر ۳۲ میلی‌متر جدایش پوسته از مغزی اتفاق افتاده است. در ورق در محل نفوذ سنبه رشد ترک‌ها در پوسته مشاهده می‌شود.



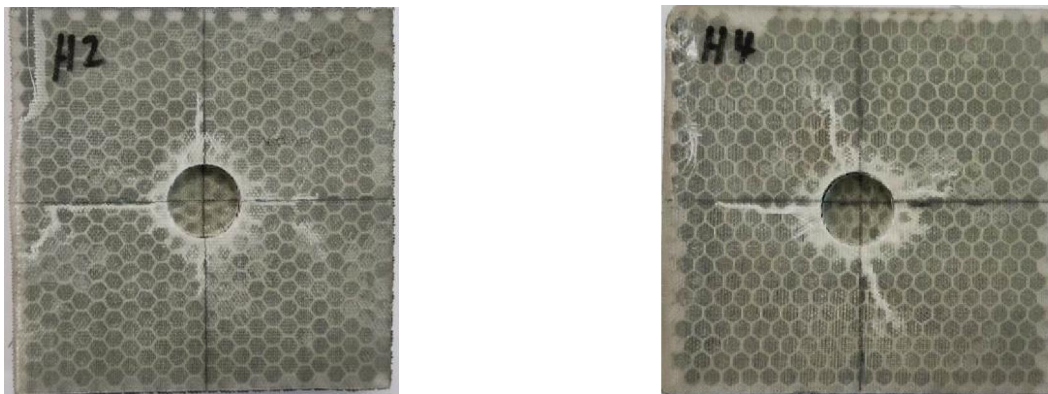
شکل ۶ نمونه G2-G4 پس از آزمون

نمونه‌های H2-H4 نیز رفتار مشابهی با نمونه‌های قبلی دارند با این تفاوت که مطابق شکل ۷ ماکزیمم نیروی نفوذ در این نمونه‌ها حدود ۲/۸ کیلو نیوتن می‌باشد که نسبت به نمونه‌های قبلی بیشتر است. همچنین عمق نفوذ سنبه در این آزمون حدود ۴/۳۴ میلی‌متر است. میزان جذب انرژی در نمونه H2، ۱۵/۸۶ کیلوژول و میزان جذب انرژی در نمونه H4، ۱۶/۲۶ کیلوژول است.



شکل ۷ نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های H2-H4

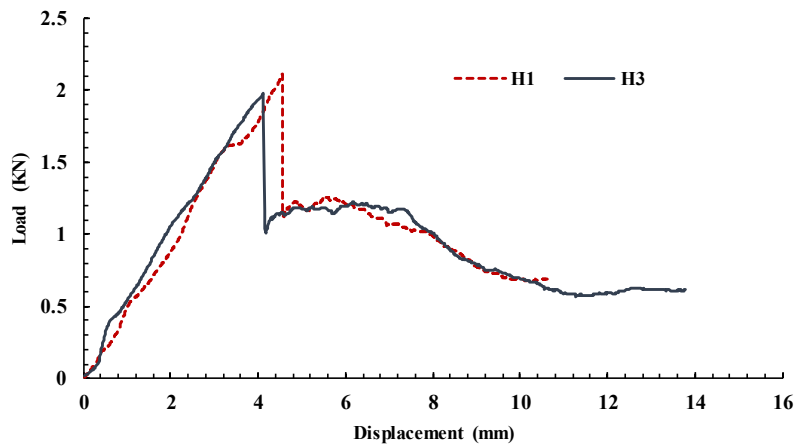
در شکل ۸ نحوه آسیب سازه ساندویچ پانل در آزمون نشان داده شده است. سوراخی به قطر ۲۱ میلی‌متر ایجاد شده و در ورق، در اطراف سوراخ، به قطر ۳۲ میلی‌متر جدایش پوسته از هسته ساندویچ پانل ایجاد شده است. در ورق در محل نفوذ سنبه ترک‌هایی نیز ایجاد شده که در شکل ۸ قابل مشاهده می‌باشند.



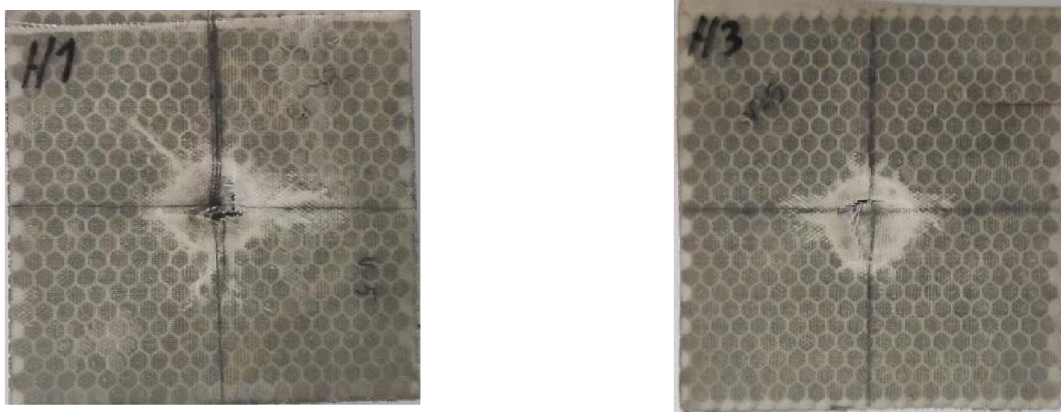
شکل ۸ نمونه H2-H4 پس از آزمون

طبق نتایج آزمون تجربی، نمونه‌های H1-H3 ماکزیمم نیروی ۲ کیلو نیوتن را تحمل نموده‌اند. طبق نمودار شکل ۹ در هنگام رسیدن به ماکزیمم نیرو میزان نفوذ سنبه در ساندویچ پانل حدود ۴/۱ میلی‌متر بوده است. میزان جذب انرژی در نمونه H1، ۱۰/۳۳ کیلوژول و میزان جذب انرژی در نمونه H3، ۱۰/۲۸ کیلوژول است.

در شکل ۱۰ نحوه آسیب سازه ساندویچ پانل در آزمون نشان داده شده است. با توجه به گروهی بودن سر سنبه، ورق رویی ساندویچ پانل در محل برخورد سنبه در نقطه شکست به صورت سه عدد ترک در زاویه تقریباً ۱۲۰ درجه نسبت به هم شروع به گسترش پیدا می‌کند. در نهایت سوراخی به ابعاد ۲۱ و ۲۴ میلی‌متر ایجاد شده و در ورق، در اطراف سوراخ، به قطر ۳۵ میلی‌متر جدایش پوسته از مغزی ساندویچ پانل اتفاق افتاده است.

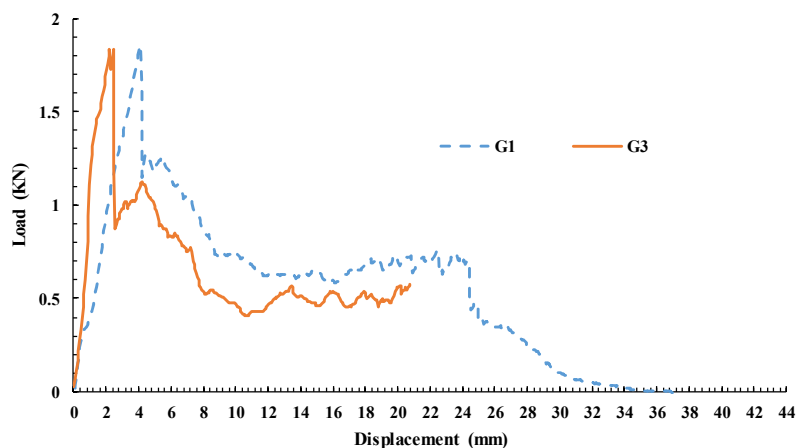


شکل ۹ نمودار نیرو-جابجایی نمونه H1-H3

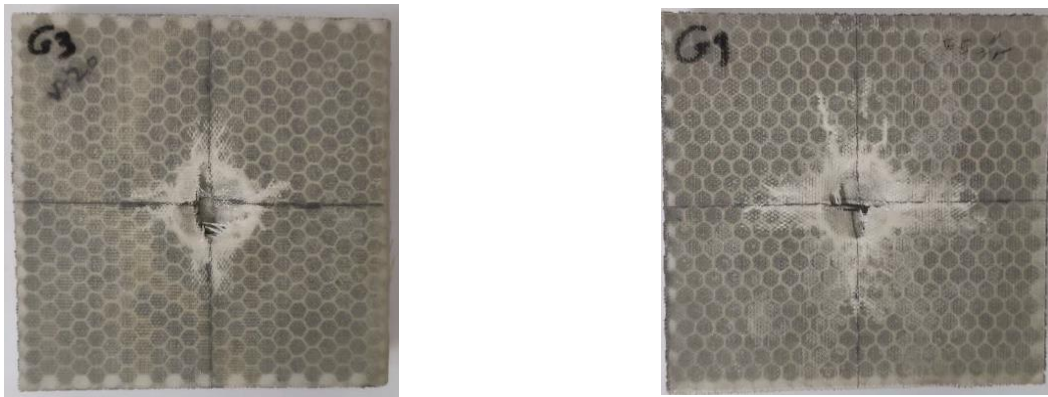


شکل ۱۰ نمونه H1-H3 پس از آزمون

طبق نتایج آزمون تجربی، نمونه‌های G1-G3 ماکزیمم نیروی ۱/۸۵ کیلو نیوتن را تحمل نموده‌اند. طبق نمودار شکل ۱۱ در هنگام رسیدن به ماکزیمم نیرو میزان نفوذ سنبه در ساندویچ پانل حدود ۲/۹ میلی‌متر بوده است. در شکل ۱۲ نحوه آسیب سازه ساندویچ پانل در آزمون نشان داده شده است. میزان جذب انرژی در نمونه G1، ۹/۸۱ کیلوژول و میزان جذب انرژی در نمونه G3، ۸/۷۳ کیلوژول است.

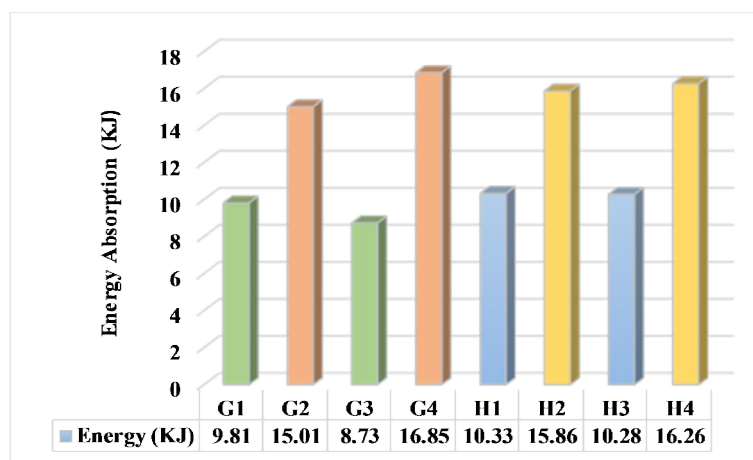


شکل ۱۱ نمودار نیرو-جابجایی نمونه G1-G3



شکل ۱۲ نمونه G1-G3 پس از آزمون

میزان جذب انرژی نمونه‌های مختلف ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت/الاستومر در شکل ۱۳ آورده شده است.



شکل ۱۳ میزان جذب انرژی نمونه‌های مختلف

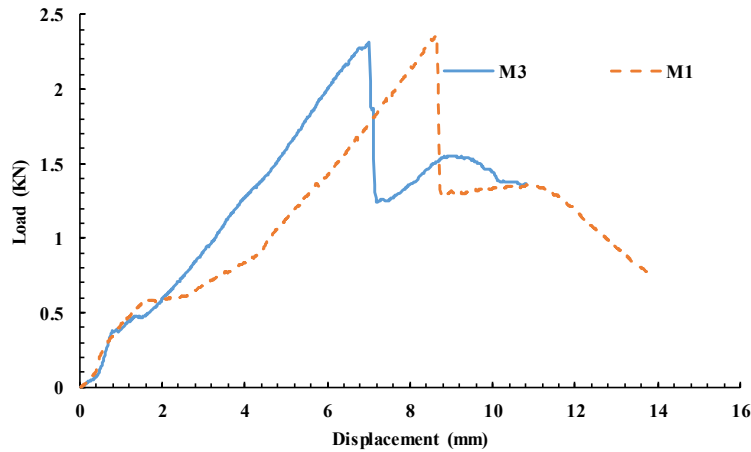
۳-۲- نتایج آزمون تجربی ساندویچ پانل با رویه کامپوزیتی /الاستومر

در این تحقیق ۸ نمونه ساندویچ پانل با رویه کامپوزیتی/الاستومر ساخته شده و مطابق جدول ۶ در سرعت‌های مختلف و با سنبه‌های سرگرد و تخت آزمون شده‌اند.

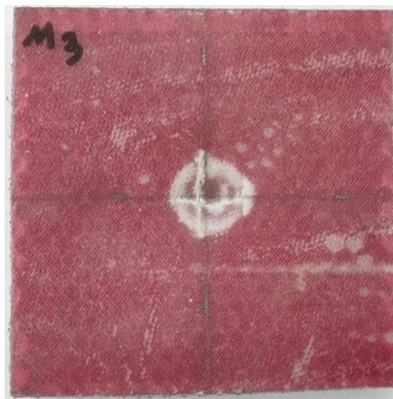
جدول ۶ شرایط آزمون نمونه‌ها

نمونه	سرعت نفوذ	سطح مقطع سنبه
M1-M3	5 میلی‌متر بر دقیقه	کروی
N2-N4	20 میلی‌متر بر دقیقه	تخت
M2-M4	20 میلی‌متر بر دقیقه	کروی
N1-N3	5 میلی‌متر بر دقیقه	تخت

مطابق شکل ۱۴ نمودار نیرو جابجایی در نمونه M3 پس‌ازاینکه نفوذ سنبه به حدود ۷/۱۶ میلی‌متر می‌رسد نیروی تماس به ماکزیمم مقدار خود یعنی ۲/۳۵ کیلو نیوتن و در نمونه M1 پس‌ازاینکه نفوذ سنبه به حدود ۸/۳۵ میلی‌متر می‌رسد نیروی تماس به ماکزیمم مقدار خود یعنی ۲/۳۴ کیلو نیوتن می‌رسد. در شکل ۱۵ نحوه آسیب سازه ساندویچ پانل در آزمون نشان داده شده است. میزان جذب انرژی نمونه، ۱۰ کیلوژول و نمونه M3 ۹/۹۷ کیلوژول است.

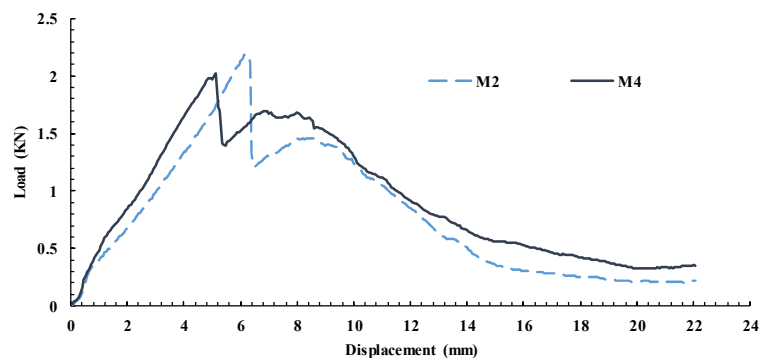


شکل ۱۴ نمودار نیرو-جابجایی نمونه M1-M3



شکل ۱۵ نمونه M3 پس از آزمون

طبق نتایج آزمون تجربی، مطابق شکل ۱۶ ماکزیمم نیروی به دست آمده در نمونه‌های M2-M4 ماکزیمم ۲.۰۶ کیلو نیوتن بوده است و میزان نفوذ سنبه در این آزمون ۵/۲۸ میلی‌متر است. مطابق شکل ۱۷ با پاره شدن پوسته رویی میزان نیرو با افت شدیدی همراه است و سپس هسته لانه زنبوری دچار لهیدگی می‌شود. مطابق شکل ۱۸ جهت بررسی استحکام رویه پشتی ساندویچ پانل در نمونه M4 سنبه تا تخریب کامل سازه مورد نظر در هسته نفوذ کرده است. همان‌طور که در نمودار ۱۶ نشان داده شده است تا جابجایی ۲۰ میلی‌متر با افت نیرو مواجه بوده ولی هنگامی که سنبه به رویه پشتی ساندویچ پانل می‌رسد نیروی نفوذ سنبه تا ۱.۴۶ کیلو نیوتن افزایش پیدا می‌کند تا بتواند رویه پشتی را دچار آسیب کند. میزان جذب انرژی نمونه M2، ۱۱/۸۹ کیلوژول و نمونه M4، ۱۳/۱۹ کیلوژول است.



شکل ۱۶ نمودار نیرو-جابجایی نمونه M2-M4

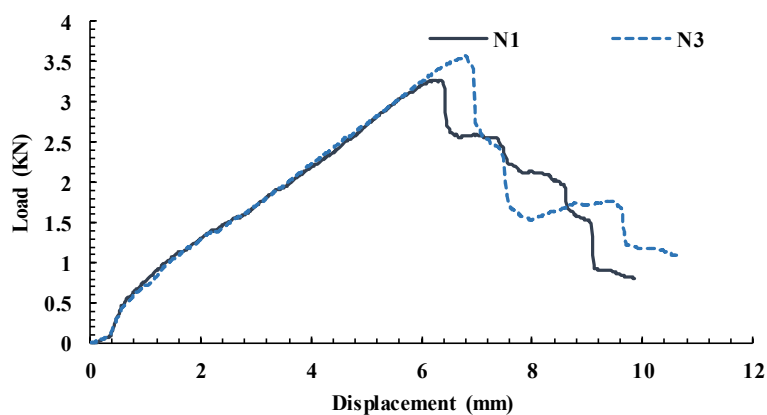


شکل ۱۷ نمونه M2-M4 پس از آزمون

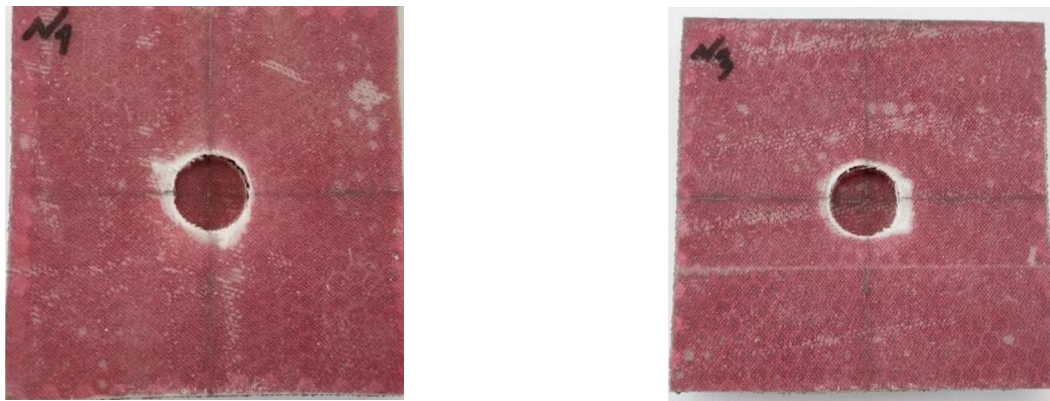


شکل ۱۸ پشت رویه نمونه M4 پس از آزمون

طبق نتایج آزمون تجربی، مطابق شکل ۱۹ ماکزیمم نیروی به دست آمده در نمونه‌های N1-N3 ماکزیمم ۳/۴ کیلو نیوتن بوده است و میزان نفوذ سنبه در این آزمون ۶/۴۴ میلی‌متر است. با پاره شدن پوسته رویی میزان نیرو با افت شدیدی همراه است و سپس هسته لانه زنبوری دچار لهیدگی می‌شود (شکل ۲۰). میزان جذب انرژی نمونه N1، ۱۸/۱۸ کیلوژول و نمونه N3، ۱۸/۹۹ کیلوژول است.

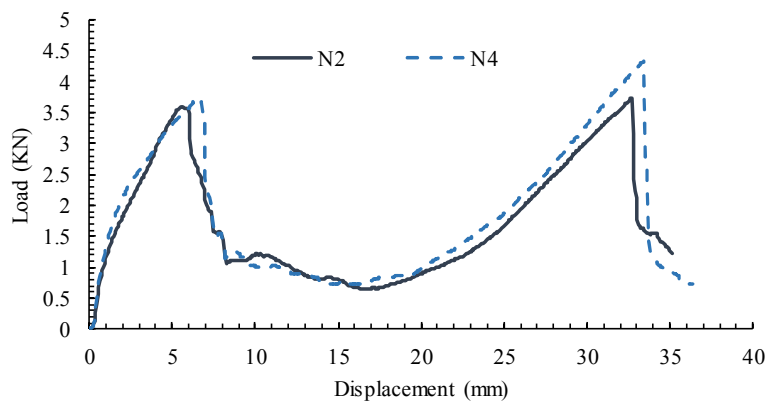


شکل ۱۹ نمودار نیرو-جابجایی نمونه N1-N3



شکل ۲۰ نمونه N1-N3 پس از آزمون

طبق نتایج آزمون تجربی شکل ۲۱، ماکزیمم نیروی به دست آمده در نمونه‌های N2-N4 ماکزیمم $3/612$ کیلو نیوتن بوده است و میزان نفوذ سنبه در این آزمون $6/46$ میلی‌متر است. با پاره شدن پوسته رویی میزان نیرو با افت شدیدی همراه است و سپس هسته لانه زنبوری دچار لهیدگی می‌شود (شکل ۲۲). جهت بررسی استحکام رویه پشتی ساندویچ پانل در نمونه N2-N4 سنبه تا تخریب کامل سازه مورد نظر در هسته نفوذ کرده است. همان‌طور که در نمودار شکل نشان داده شده است تا جابجایی 20 میلی‌متر با افت نیرو مواجه بوده ولی هنگامی که سنبه رویه پشتی ساندویچ پانل می‌رسد نیروی نفوذ سنبه $3/73$ کیلو نیوتن افزایش پیدا می‌کند تا بتواند رویه پشتی را دچار آسیب کند. میزان جذب انرژی نمونه N2، $21/78$ کیلوژول و نمونه N4، $20/09$ کیلوژول است.

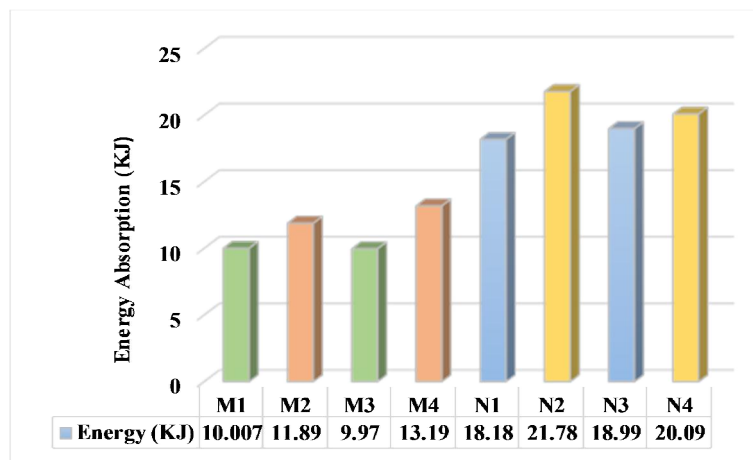


شکل ۲۱ نمودار نیرو-جابجایی نمونه N2-N4



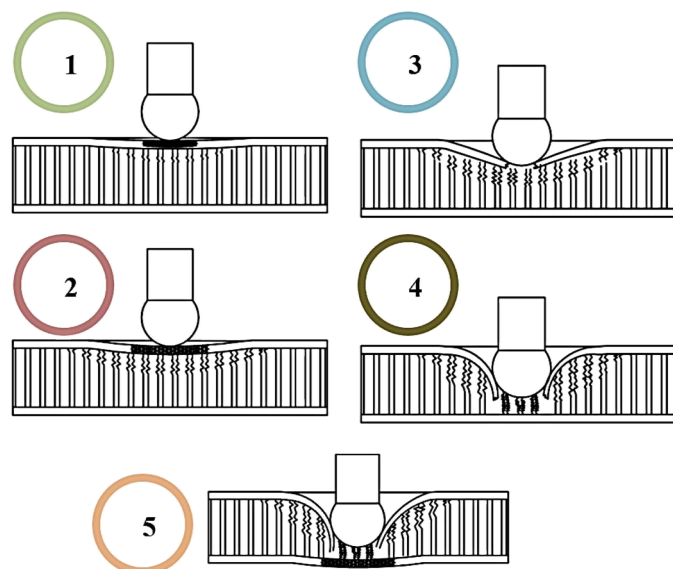
شکل ۲۲ نمونه N2-N4 پس از آزمون

میزان جذب انرژی نمونه‌های مختلف ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت/الاستومر در شکل ۲۳ آورده شده است. لازم به ذکر است میزان جذب انرژی هر نمونه برحسب نمودار نیرو-جابجایی تا ماکزیمم نیروی اعمالی بر روی هر نمونه محاسبه شده است.



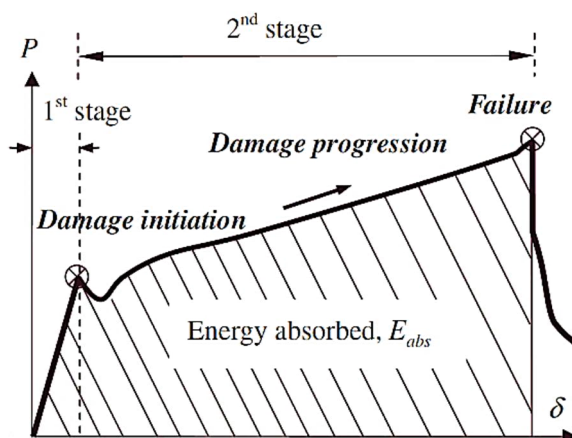
شکل ۲۳ میزان جذب انرژی نمونه‌های مختلف

طبق شکل ۲۴ روند آسیب پانل ساندویچی بدین شرح است که ابتدا با فشار سنبه بر روی پانل ساندویچی پوسته و مغزی بدون تغییر شکل نیرو تحمل می‌کنند سپس با افزایش نیرو که باعث تغییر شکل پوسته، لهیدگی پوسته در محل سنبه و کماتش سلول‌های مغزی لانه زنبوری می‌شود، آسیب در پوسته و مغزی لانه زنبوری پیشرفت کرده و پوسته دچار ترک می‌شود. با افزایش نیرو، ترک رشد کرده و با شکست پوسته و جدایش پوسته از هسته تخریب ادامه پیدا می‌کند با افزایش نفوذ سنبه به درون پانل ساندویچی، پوسته پایینی تحت کشش قرار گرفته و با جدا شدن از مغزی و پارگی روند تخریب به انتها می‌رسد.

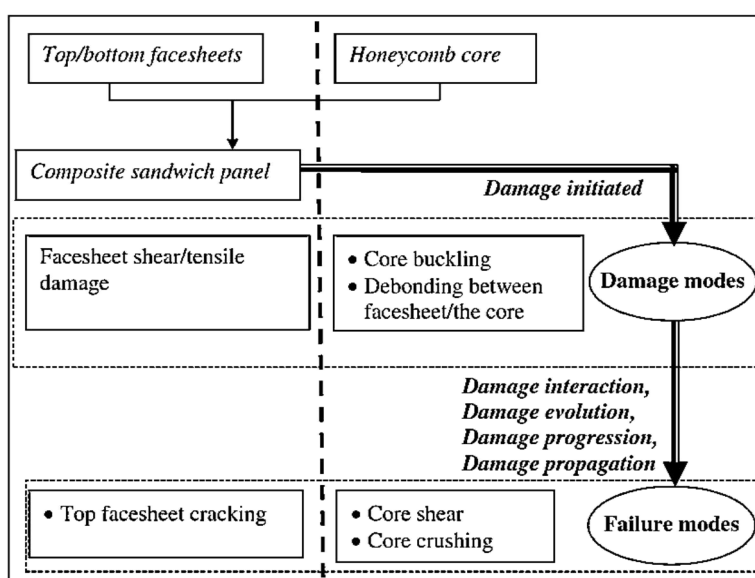


شکل ۲۴ روند آسیب پانل ساندویچی

نمودار نیرو - جابجایی معمولی یک پانل ساندویچی تحت آزمایش ضربه سرعت پایین، قبل از شکست را می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد: مرحله اول خطی و مرحله ۲ بعد از شروع مقداری آسیب همان‌طور که در شکل ۲۵ نشان داده شده است شروع می‌شود. توجه داشته باشید که اگر یکی از حالت‌های آسیب در شکل ۲۶ آغاز شود، حالت‌های آسیب دیگر ممکن است فعال شوند و ممکن است حالت‌های آسیب به هم متصل شوند. در نتیجه آسیب متقابل و پیشرفت آسیب در مرحله دوم تا شکست نهایی همراه است.



شکل ۲۵ انرژی جذب شده توسط ساندویچ پانل و پیشرفت آسیب [۱۷]



شکل ۲۶ حالت‌های آسیب/شکست پانل ساندویچ در معرض بارگذاری [۱۸]

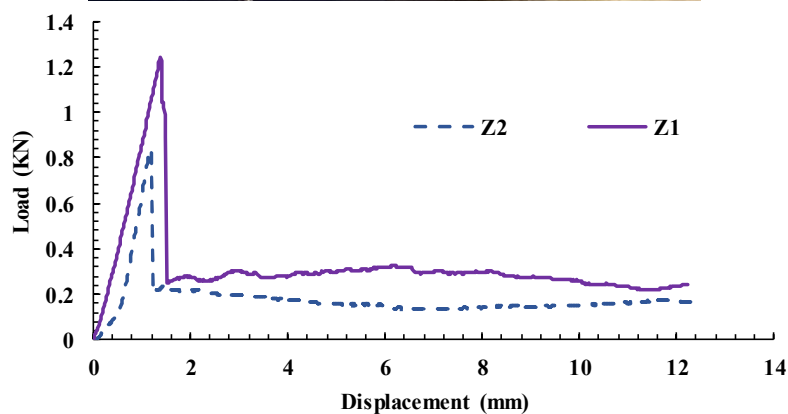
۴- نتایج آزمون تجربی خمش سه نقطه‌ای ساندویچ پانل با رویه کامپوزیتی/الاستومر

جهت بررسی رفتار سازه ساندویچ پانل با رویه کامپوزیتی در تحمل نیروی خمش، طبق استاندارد ASTM C393 خمش سه نقطه‌ای انجام شده است. در این آزمون فاصله بین تکیه‌گاه‌ها معمولاً ۴۵۷ میلی‌متر یا ۵۰۸ میلی‌متر می‌باشند و به دو صورت بارگذاری نقطه مضاعف یا واحد می‌تواند باشد. طول و عرض تیرها به‌طور نرمال به ترتیب ۱۰۱/۶ و ۷۶/۱۲ میلی‌متر می‌باشد که بزرگ‌تر از دهانه تیرک است. تیرک به چند شکل مختلف می‌تواند دچار شکست شود: شکست‌های کششی یا فشاری لایه‌های سطحی، چین و چروک شدگی لایه سطحی نازک تحت نیروی فشاری، برش لایه مغزی یا شکست فشاری موضعی لایه مغزی زیر پد نگه‌دارنده و پد بار، شکست‌های بین لایه مغزی-لایه سطحی. آرایش بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها نوع حالت شکست را تعیین می‌کنند. هر چه فاصله بین تکیه‌گاه‌ها بیشتر باشد احتمال شکست لایه سطحی بیشتر است و هر چه فاصله بین تکیه‌گاه‌ها کمتر باشد احتمال شکست برشی لایه مغزی بیشتر است. عرض پد نگه‌دارنده تیر باید به اندازه‌ای باشد تا از شکست‌های ناشی از لهیدگی موضعی لایه مغزی جلوگیری نماید. این امر به قرار دادن ورق‌های نازک لاستیکی در زیر پد بار کمک می‌کند و در نتیجه تمرکز بار در زیر لبه‌های پد بار کاهش یافته و مانع از لهیدگی لبه‌های پد بار می‌شود. جدا شدن اتصال لایه مغزی-لایه سطحی هشدار می‌دهد که در رابطه با ساندویچ اشکالی وجود دارد که باید اصلاح شود: مغزی یا لایه‌های سطحی آلوده شده، مقدار خیلی کم رزین در لایه پیش آغشته شده داخلی، یا کافی نبودن چسب. نمونه‌ها مطابق شکل ۲۷ به ابعاد ۲۰۰×۷۰ میلی‌متر ساخته می‌شود.



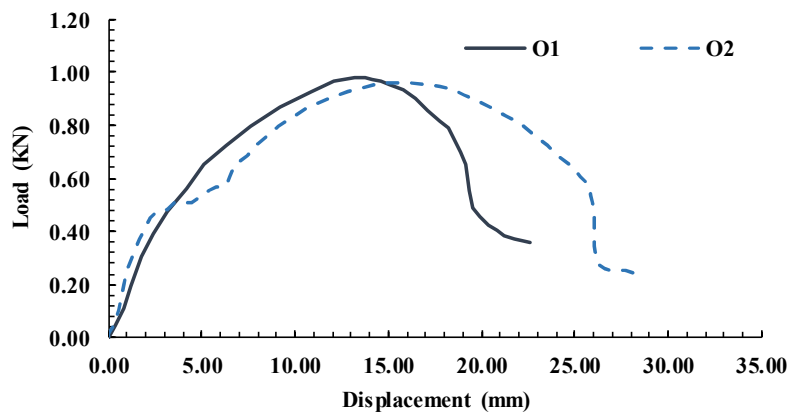
شکل ۲۷ نمونه Z1-Z2 خمش سه نقطه‌ای

دو نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای طبق این استاندارد ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. مطابق شکل ۲۸ ماکزیمم نیرویی که نمونه Z1 در آزمون خمش سه نقطه‌ای تحمل کرد ۱.۲۳۳ کیلو نیوتن و میزان جابجایی نمونه ۱.۳ میلی‌متر است. مطابق شکل ۲۸ در نمونه Z2 به علت اتصال ضعیف بین رویه و هسته لانه زنبوری، در حین انجام آزمون رویه از هسته لانه زنبوری جدا شده است.



شکل ۲۸ خمش سه نقطه‌ای نمونه Z1-Z2

طبق نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت/الاستومر (شکل ۲۹)، ماکزیمم نیرویی که نمونه O1 در آزمون خمش سه نقطه‌ای تحمل کرده است ۰/۹۸ کیلو نیوتن و میزان جابجایی نمونه ۱۳/۲۲ میلی‌متر است. در نمونه O2، ماکزیمم نیرو ۰/۹۶ کیلو نیوتن و میزان جابجایی نمونه ۱۵/۵۷ میلی‌متر است.



شکل ۲۹ خمش سه نقطه‌ای ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت/الاستومر

۵- نتیجه گیری

- در آزمایش نفوذ سنبه، ماکزیمم نیروی اعمالی نمونه‌های ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت/الاستومر نسبت به نمونه‌های ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت بیشتر بوده و استحکام نمونه‌های ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت/الاستومر تقریباً ۲۰ درصد بیشتر است.
- با بررسی نمونه‌های ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت و کامپوزیت/الاستومر پس از آزمایش نفوذ سنبه، در محل نفوذ سنبه در نمونه‌های با رویه کامپوزیت ترک‌های زیادی در اطراف محل نفوذ سنبه در رویه ایجاد شده است ولی در نمونه‌های با رویه کامپوزیت/الاستومر با توجه به انسجام رویه و هسته ساندویچ پانل ترکی ایجاد نشده است.
- با استفاده از لایه الاستومر در ساخت نمونه ساندویچ پانل، انسجام بین رویه و هسته بهبود پیدا می‌کند.
- میزان جذب انرژی نمونه‌های ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت/الاستومر نسبت به نمونه‌های با رویه کامپوزیتی تقریباً ۲۰ درصد افزایش پیدا کرده است.
- با بررسی نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌های ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت و کامپوزیت/الاستومر مدت‌زمان رسیدن به آسیب و میزان جابجایی نمونه کامپوزیت/الاستومر تحت آزمایش نفوذ سنبه و خمش سه نقطه‌ای افزایش پیدا کرده است.
- در آزمون خمش سه نقطه‌ای که بر روی نمونه‌های ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت-کامپوزیت/الاستومر انجام گرفت طبق نمودار نیرو-جابجایی ماکزیمم جابجایی نمونه O1، ۱۳/۲۲ میلی‌متر است. در نمونه O2، ماکزیمم نیرو ۰/۹۶ کیلو نیوتن و میزان جابجایی نمونه ۱۵/۵۷ میلی‌متر است. اما در نمونه‌های Z1-Z2 میزان جابجایی در ماکزیمم نیرو، ۱/۳۳ میلی‌متر

می‌باشد. نمونه ساندویچ پانل با رویه کامپوزیت/الاستومر رفتار بسیار متفاوتی نسبت به نمونه با رویه کامپوزیت از خود نشان داده شده است و جذب انرژی بسیار خوبی داشته است.

۷- استفاده از لایه الاستومر باعث آب‌بندی سازه ساندویچ پانل شده و از نفوذ آب در هسته آلومینیومی و از خوردگی هسته، جلوگیری می‌کند.

References

- [1] Zhang Y, Y. Li, Guo k, Zhu L. Dynamic mechanical behaviour and energy absorption of aluminium honeycomb sandwich panels under repeated impact loads. *Ocean Engineering*. 2020 Nov 1;219:108344. doi: [10.1016/j.oceaneng.2020.108344](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108344)
- [2] Zarei Mahmoudabadi M, Sadighi M. Experimental investigation on the energy absorption characteristics of honeycomb sandwich panels under quasi-static punch loading: *Aerospace Science and Technology*. 2019 Feb 23;88:273–86. doi: [10.1016/j.ast.2019.02.035](https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.02.035)
- [3] Khaire N, Tiwari G, Patel V, Iqbal M. Assessment of the ballistic response of honeycomb sandwich structures subjected to offset and normal impact. *Defence Technology*. 2022 Dec 27. doi: [10.1016/j.dt.2022.12.018](https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.12.018)
- [4] Tariq F, Uzair M, Shifa M, Residual compressive strength of aluminum alloy honeycomb sandwich panel in the presence of multiple impact dents. *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 2021 Aug 1;24:1189–205. doi: [10.1177/10996362211036987](https://doi.org/10.1177/10996362211036987)
- [5] Sun G, Chen D, Wang H, Hazell P, Li Q. High-velocity impact behaviour of aluminium honeycomb sandwich panels with different structural configurations. *International Journal of Impact Engineering*. 2018 Aug 13; 122:119–36. doi: [10.1016/j.ijimpeng.2018.08.007](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.08.007)
- [6] Zhang Y, Yan L, Zhang C, Guo S. Low-velocity impact response of tube-reinforced honeycomb sandwich structure. *Thin-Walled Structures*. 2020 Sept 20;158:107188. doi: [10.1016/j.tws.2020.107188](https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107188)
- [7] Petras A, Sutcliffe M. Failure mode maps for honeycomb sandwich panels. *Composite Structures*. 1999 Jul 6;44:237–52. doi: [10.1016/S0263-8223\(98\)00123-8](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(98)00123-8)
- [8] Foo C, Seah L, Chai G. Low-velocity impact failure of aluminium honeycomb sandwich panels. *Composite Structures*. 2007 Oct 17;85:20–8. doi: [10.1016/j.compstruct.2007.10.016](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.10.016)
- [9] Crupi V, Epasto G, Guglielmino E. Collapse modes in aluminium honeycomb sandwich panels under bending and impact loading. *International Journal of Impact Engineering*.: 2011 Dec 16;43:6–15. doi: [10.1016/j.ijimpeng.2011.12.002](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.12.002)
- [10] Zhang X, Xu F, Zang Y, Feng W. Experimental and numerical investigation on damage behavior of honeycomb sandwich panel subjected to low-velocity impact. *Composite Structures*. 2020 Jan 3;236:111882 doi: [10.1016/j.compstruct.2020.111882](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111882)
- [11] Zarezadeh mehrizi M, Liaghat G , Ahmadi H , Taherzadeh-Fard A. Numerical and experimental investigation of fiber metal laminates with elastomeric layers under low-velocity impact. *Polymer Composites*. 2022 Feb 8;43:1936-47. doi: [10.1002/pc.26509](https://doi.org/10.1002/pc.26509)
- [12] Sun G, Huo X, Wang H, On the structural parameters of honeycomb-core sandwich panels against low-velocity impact, *Composites. Part B Engineering*. 2021 Apr 5;216:108881. doi: [10.1016/j.compositesb.2021.108881](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108881)
- [13] Hassanpour F, Liaghat G, Sabouri H, Experimental investigation of quasistatic penetration tests on honeycomb sandwich panels filled with polymer foam. *Mechanics of advanced materials and Structures*. 2018 Sept 14;27:1803-15. doi: [10.1080/15376494.2018.1525628](https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1525628)
- [14] Ricardo J, Rocha B, Marcelo F. S, edgewise compression and three- point bending analysis of repaired composite sandwich panel. *MPDI Material Journal*. 2023 Jun 5;16:4249. doi: [10.3390/ma16124249](https://doi.org/10.3390/ma16124249)
- [15] Military standard Sandwich Constructions and core materials, MIL-STD-410B, General test method, Department of Defens, Washington, D.C. 1967.
- [16] Military standard adhesive film form Sandwich Constructions, MIL-A-25463. Department of Defens, Washington, D.C. 1982.
- [17] Shengqing Z and Boay C. Damage and failure mode maps of composite sandwich panel subjected to quasi-static indentation and low velocity impact Damage and failure mode maps of composite sandwich panel subjected to quasi-static indentation and low velocity impact. *Composite Structures*; 2013 Feb 26;101:204–14. doi: [10.1016/j.compstruct.2013.02.010](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.02.010)
- [18] Rahimijonoush A, Bayat M. Experimental and numerical studies on the ballistic impact response of titanium sandwich panels with different facesheets thickness ratios. *Thin-Walled Structures*: 2020 Aug 21;157:107079 doi: [10.1016/j.tws.2020.107079](https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107079)