



بررسی جذب انرژی پانل ساندویچی با هسته و رویه آلومینیومی تحت بارگذاری شبه استاتیکی: مطالعه عددی و تجربی

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

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

۲- عضو هیئت علمی، 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

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۲ دی ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۳ اردیبهشت ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

پانل ساندویچی

جذب انرژی

آلومینیوم

نفوذ سنبه

ساندویچ پانل‌ها به دلیل جذب انرژی مطلوب نسبت به وزنی پایینی که دارند در سازه هواپیما از قبیل سطوح فرامین بال و دماغه هواپیما به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. امروزه از ساندویچ پانل‌های هیبریدی با توجه به خواص مکانیکی متفاوتی که دارند در صنایع هوایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ساختار ساندویچ پانل‌ها متشکل از دو رویه نازک و یک هسته می‌باشند، هسته از تاثیر بارهای برشی خارج از صفحه بر روی ورق‌های سطحی جلوگیری می‌کند و آن‌ها را در برابر کمناش پشتیبانی می‌کند. در این مقاله به بررسی جذب انرژی و استحکام پانل‌های ساندویچ با صفحه آلومینیومی 2024-T3 به عنوان پوسته و لانه زنبوری آلومینیومی 5052 به عنوان هسته آن تحت بارگذاری پانچ شبه استاتیکی با استفاده از دو سنبه با مقطع مسطح و کروی، به صورت تجربی و عددی پرداخته شده است. جهت انجام تحلیل‌های عددی، روش حل صریح در نرم افزار المان محدود آباکوس مورد استفاده قرار گرفته است. حالت‌های خرابی در این آزمون شامل چروک شدن صفحه، جدا شدن لایه چسب بین صفحه و هسته، پارگی صفحه، خرد کردن مغزی پانل ساندویچی خارج از صفحه، خم شدن مغزی پانل ساندویچی درون صفحه، پارگی مغزی پانل ساندویچی، طبقه‌بندی می‌شوند. نتایج تحلیل عددی نسبت به نتایج نمونه‌های تجربی از تطابق خوبی برخوردار هستند. حداقل میزان جذب انرژی نمونه‌های تجربی پانل ساندویچی در آزمون نفوذ سنبه ۲۱/۴۲ ژول و حداکثر ۲۵/۱۳ ژول می‌باشد.

Investigating the energy absorption of sandwich panel with aluminum core and skin under Quasi-static loading: A numerical and experimental study

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

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

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

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

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

Article Information

Original Research Paper

Received: 12 January 2024

Accepted: 2 May 2024

Keywords:

Sandwich Panel

Energy Absorption

Aluminum

Punch Penetration

Abstract

Sandwich panels are widely used in aircraft structures, such as the surfaces of the wing, radome and engine cowling, due to their optimal energy absorption compared to their low weight. Nowadays, hybrid sandwich panels are used in the aviation industry due to their different mechanical properties. The structure of sandwich panels consists of two thin layers and a core, the core prevents the effect of out-of-plane shear loads on the surface sheets and supports them against buckling. In this paper, the energy absorption and strength of sandwich panels with 2024-T3 aluminum plate as the shell and 5052 aluminum honeycomb as its core are investigated under quasi-static punch loading using two punchers with flat and spherical cross sections, experimentally and numerically. For numerical analysis, the explicit solution method is used in Abaqus finite element software. Failure modes in this test are classified as wrinkling of the panel, separation of the adhesive layer between the panel and the core, tearing of the panel, crushing of the core of the sandwich panel outside the plate, bending of the core of the sandwich panel inside the plate, and tearing of the core of the sandwich panel. The results of numerical analysis are in good agreement with the results of experimental samples. The minimum amount of energy absorption of sandwich panel experimental samples in the punch penetration test is 21.42 joules and the maximum is 25.13 joules.

Please cite this article using:

Rezayat HR, Toozandehjani H, Zakeri A. Investigating the energy absorption of sandwich panel with aluminum core and skin under Quasi-static loading: A numerical and experimental study. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Mar 20;11(1):61-75. doi: 10.22034/IJME.2024.434159.1900 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

پنل‌های ساندویچی 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. در ساخت سازه‌های ساندویچی از انواع کامپوزیت به عنوان رویه به‌طور متداول استفاده می‌شود. با توجه به نوع عملکرد سازه از فوم آلومینیومی، فوم پلی اورتان به عنوان پرکننده بصورت ترکیب با لانه زنبوری یا به صورت جداگانه به عنوان هسته استفاده می‌شود که خواص منحصر بفردی دارند [۱]. تحقیقات زیادی در زمینه جذب انرژی و خرابی در پانل‌های ساندویچی 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 [۲] به بررسی رفتار دینامیکی، مکانیکی و جذب انرژی پانل ساندویچی آلومینیومی با هسته لانه زنبوری تحت بار خستگی پرداختند. مدل‌سازی در نرم افزار المان محدود آباکوس انجام شد. نمودار نیرو-جابجایی و جذب انرژی نیز به صورت عددی بدست 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 همکاران [۳] به بررسی ویژگی‌های جذب انرژی در پانل ساندویچی با هسته لانه زنبوری پرداختند. برای آزمایش‌های تجربی از دو سنبه سرگرد و سرتخت استفاده کرده و تاثیر پارامترهای هندسی در میزان جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفت. خیری و همکاران [۴] در پژوهش حاضر به بررسی رفتار پانل‌های ساندویچ با هسته لانه زنبوری تحت آزمایش ضربه با سرعت بالا با استفاده از تفنگ هوای فشرده پرداخته‌اند. در این تحقیق از یک پرتابه با دماغه مخروطی استفاده شده است. تغییر شکل، حالت شکست و ویژگی‌های اتلاف انرژی برای هر دو نوع بارگذاری به دست آمد. نتایج آزمون عددی به‌دست‌آمده 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 ساندویچی تأثیر قابل توجهی بر اتلاف انرژی در جهت تغییر شکل مختلف داشتند. طریق و همکاران [۵] به بررسی تجربی پانل ساندویچی آلومینیومی با هسته لانه زنبوری پرداختند. نمونه‌ها تحت نفوذ چند سنبه با قطرهای مختلف قرار گرفتند و میزان استحکام و مقاومت فشاری آنها بررسی شد. سان و همکاران [۶] در مقاله‌ای به بررسی عددی و تجربی بر روی مکانیزم‌های شکست پانل ساندویچی با هسته لانه زنبوری 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 همکاران [۷] در مقاله‌ای با هدف بهبود مقاومت پانل‌های ساندویچی، پانل ساندویچی 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 ساندویچی بدون لوله بوده است. پتراس و همکاران [۸] به طور تجربی حالت‌های شکست پانل‌های ساندویچ ساخته شده از پوسته کامپوزیتی تقویت شده با الیاف و لانه زنبوری به عنوان هسته را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها همچنین یک مدل نظری در مسئله پانل‌های ساندویچ بر اساس یک نظریه کلاسیک ارائه کردند. فو و همکاران [۹] رفتار پانل‌های ساندویچی در معرض ضربه با سرعت کم را در نرم افزار المان محدود به صورت سه بعدی بررسی کردند و اثرات کرنش سختی پوسته آلومینیومی و چگالی هسته لانه زنبوری را در پاسخ ضربه مورد بحث قرار دادند. اپاستو و همکاران [۱۰] به تجزیه و تحلیل پاسخ ساختارهای ساندویچی آلومینیومی لانه زنبوری با اندازه سلول‌های مختلف پرداختند. آنها بر اساس روش انرژی، رفتار سازه به صورت عددی بررسی شده است. ژانگ و همکاران [۱۱] به بررسی و مدل‌سازی آسیب پیشرونده در پانل ساندویچی با هسته نومکس و رویه کامپوزیتی تحت آزمون ضربه سرعت پایین بصورت تجربی و عددی پرداخته‌اند. جهت مدل‌سازی آسیب از توسعه معیار پاک استفاده کرده‌اند. در مدل‌سازی عددی جدایش پوسته از هسته لانه زنبوری، کمانش سلول‌های لانه زنبوری، آسیب ماتریس و الیاف کامپوزیت بررسی شده‌اند. نتایج عددی از دقت مناسبی برخوردار هستند. یانگ سان و همکاران [۱۲] به بررسی عددی و تجربی تاثیر پارامترهای ساختاری مختلف در یک ساندویچ‌پنل با هسته لانه‌زنبوری تحت بار ضربه‌ای با سرعت پایین پرداختند. پارامترهای موردنظر در این تحقیق عبارت از ضخامت رویه‌ها، ارتفاع هسته، اندازه سلول لانه‌زنبوری و ضخامت دیواره سلول‌ها بودند. حسن پور و همکاران [۱۳] به بررسی تجربی مکانیزم‌های شکست، جذب انرژی ویژه در ساندویچ‌پنل‌ها 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. 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. در ساندویچ پانل‌های آلومینیومی به دلیل اتصال با چسب رویه به هسته به دلیل قرارگرفتن سازه در شرایط دمایی مختلف، پس از مدتی اتصال چسبی خاصیت خود را از دست داده و باعث نفوذ آب به داخل هسته شده و باعث خوردگی آن می‌شود. در تحقیقی رضایت و همکارانش [۱۴] به بررسی جذب انرژی ساندویچ پانل با هسته آلومینیومی و رویه کامپوزیت تحت آزمون شبه استاتیکی پرداخته و اتصال رویه کامپوزیتی به هسته لانه زنبوری را با دو روش با استفاده از لایه الاستومر و رزین مورد ارزیابی قرار داده‌اند. لایه الاستومر بهترین نوع چسبندگی را داشته است.

در تحقیق حاضر به عنوان نوآوری جهت اتصال رویه آلومینیومی به هسته لانه زنبوری آلومینیوم به جای استفاده از چسب‌های صنعتی از یک لایه کامپوزیت شیشه/اپوکسی استفاده شده است. با استفاده از آزمون کشش سطحی میزان استحکام اتصال مورد ارزیابی قرار گرفته است که نسبت به نمونه اتصال چسبی ۲۵ درصد استحکام اتصال بهبود پیدا کرده است. پس از بررسی استحکام اتصال به بررسی میزان جذب انرژی ساندویچ پانل به صورت تجربی و تحلیل عددی پرداخته شده است. در این تحقیق از معیار آسیب جانسون-کوک جهت مدل‌سازی آسیب استفاده شده است.

۲- ساخت نمونه پانل ساندویچی آلومینیومی

نمونه پانل ساندویچی آلومینیومی از هسته لانه زنبوری آلومینیومی 5052 با اندازه سلول ۳/۱۶ اینچ، ضخامت فویل ۰/۰۰۲ اینچ، ضخامت هسته ۰/۷۴ اینچ و پوسته آلومینیوم 2024-T3 با ضخامت ۰/۰۲ اینچ به ابعاد ۱۲۰×۱۲۰ میلی‌متر ساخته شده است. خواص مکانیکی هسته پانل ساندویچی در جدول ۱ و خواص مکانیکی پوسته آلومینیوم 2024-T3 در جدول ۲ آورده شده است.

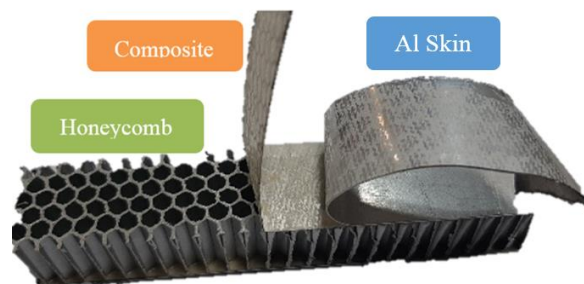
جدول ۱ خواص مکانیکی مغزی لانه زنبوری [۱۵]

چگالی	استحکام خرد کردن هسته	استحکام برشی در راستای L	مدول برشی در راستای L
$91.305 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	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 پوسته آلومینیوم 2024-T3 [۱۶]

مدول الاستیسیته (GPa)	چگالی (kg/mm ³)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)
71	2449.4	470	576

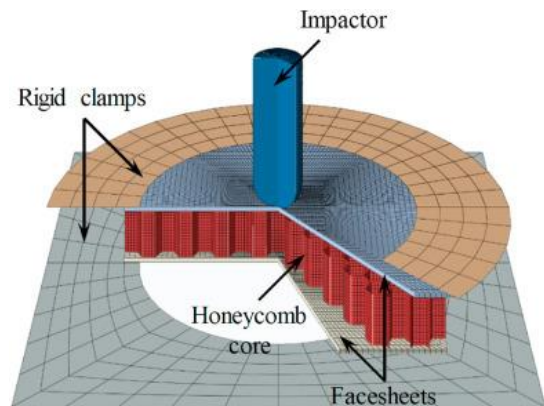
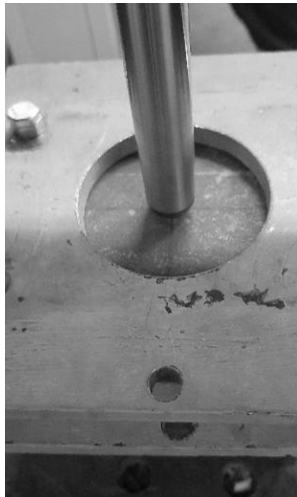
در این تحقیق به منظور بهبود اتصال پوسته آلومینیومی به هسته از یک لایه پارچه شیشه با رزین اپوکسی به عنوان لایه واسط استفاده شده است (شکل ۱).



شکل ۱ اتصال پوسته با یک لایه کامپوزیت

۳- آزمون تجربی نفوذ سنبه

آزمون‌های نمونه‌ها تحت بارگذاری شبه-استاتیکی با استفاده از دستگاه آزمون انیورسال شیجین ساخت کشور چین در محل آزمایشگاه ضربه دانشگاه تربیت مدرس 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 میل‌متر بر ثانیه انجام شده است، جهت انجام آزمون از فیکسچر فلزی مطابق شکل ۲ برای نگهداری پانل ساندویچی استفاده شده است.



شکل ۲ نحوه آزمون نفوذ سنبه

۳-۱- نتایج آزمون تجربی

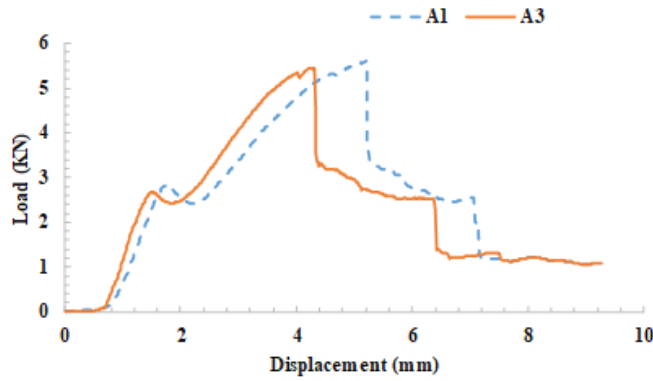
در این تحقیق ۸ نمونه پانل ساندویچی ساخته شده و مطابق جدول ۳ در سرعت‌های مختلف و با سنبه‌های سرگرد و تخت آزمون شده‌اند.

جدول ۳ شرایط آزمون نمونه‌ها

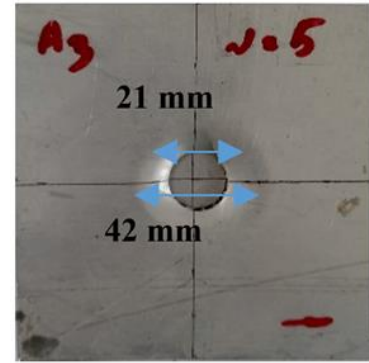
نمونه	سطح مقطع سنبه	سرعت نفوذ
A1-A3	تخت	۵ میلی‌متر بر دقیقه
A2-A4	تخت	۲۰ میلی‌متر بر دقیقه
B1-B3	کروی	۵ میلی‌متر بر دقیقه
B2-B4	کروی	۲۰ میلی‌متر بر دقیقه

طبق نتایج آزمون تجربی، بیشینه نیروی بدست آمده در نمونه‌های A1-A3 بیشینه ۵/۵ کیلونیوتن بوده است و میزان نفوذ سنبه در این آزمون ۵ میلی‌متر می‌باشد. با پاره شدن پوسته رویی میزان نیرو با افت شدیدی همراه است و سپس هسته لانه زنبوری دچار لهیدگی می‌شود. در شکل ۳ نحوه آسیب سازه پانل ساندویچی در آزمون نشان داده شده است. سوراخی به قطر ۲۱ میلی‌متر ایجاد شده و در ورق، در اطراف سوراخ، به قطر ۴۲ میلی‌متر لهیدگی ایجاد شده است.

نمونه‌های A2-A4 نیز رفتار مشابهی با نمونه‌های قبلی دارند با این تفاوت که بیشینه نیروی نفوذ در این نمونه‌ها حدود ۶/۲ کیلونیوتن است که نسبت به نمونه‌های قبلی بیشتر است. همچنین عمق نفوذ سنبه در این آزمون حدود ۴/۶ میلی‌متر است. در شکل ۴ نحوه آسیب سازه پانل ساندویچی در آزمون نشان داده شده است. سوراخی به قطر ۲۱ میلی‌متر ایجاد شده و در ورق، در اطراف سوراخ، به قطر ۴۶ میلی‌متر لهیدگی ایجاد شده است. در ورق در محل نفوذ سنبه دو ترک نیز ایجاد شده که با رنگ قرمز در شکل ۴ مشخص شده است.

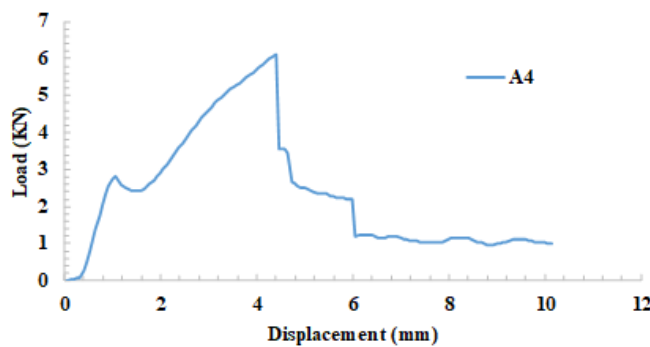


(ب)

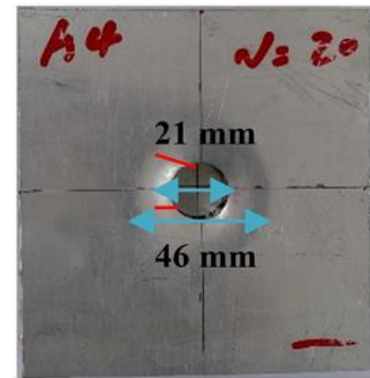


(الف)

شکل ۳ الف) نحوه آسیب نمونه، ب) نمودار نیرو-جابجایی نمونه A1-A3 پس از آزمون



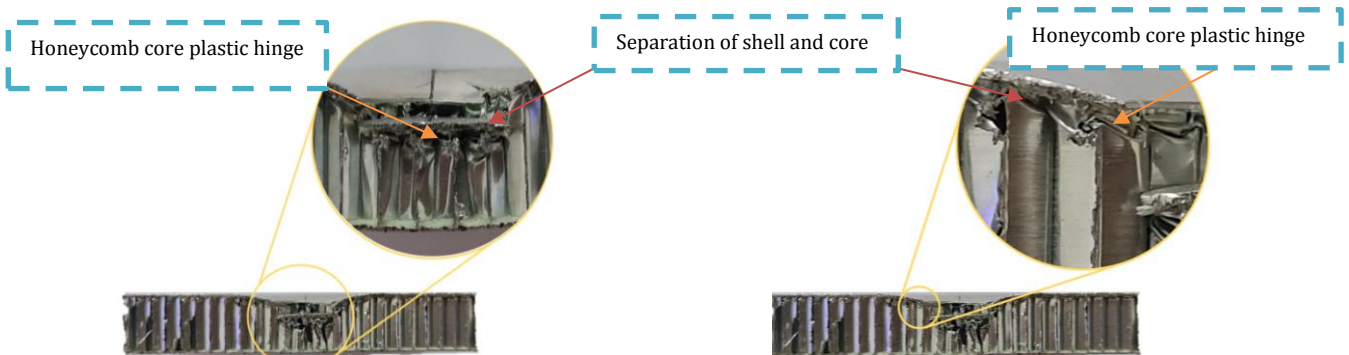
(ب)



(الف)

شکل ۴ الف) نحوه آسیب نمونه، ب) نمودار نیرو-جابجایی نمونه A4

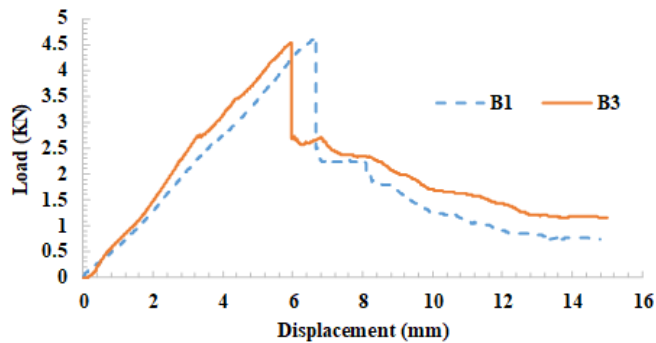
جهت بررسی دقیق‌تر، جدایش و اتصال پوسته به مغزی لانه زنبوری، نمونه‌ها پس از آزمون از وسط، توسط وایرکات بریده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ سطح مقطع برش نشان داده شده است در نواحی نشان داده شده با رنگ قرمز، جدایش مغزی لانه زنبوری از تک لایه کامپوزیت و در ناحیه نفوذ سنبه جدایش ورق از تک لایه کامپوزیت اتفاق افتاده است. در محل نفوذ سنبه سلول‌های مغزی لانه زنبوری دچار کمانش و برش شده‌اند.



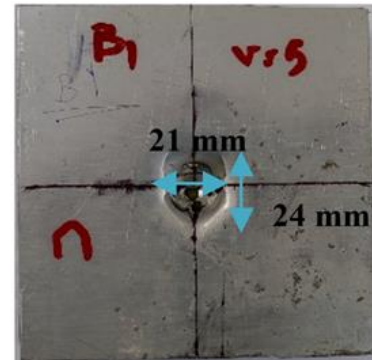
شکل ۵ برش نمونه آزمون شده و کمانش و برش سلول‌های لانه زنبوری

طبق نتایج آزمون تجربی، نمونه‌های B1-B3 بیشینه نیروی ۴/۶ کیلو نیوتن را تحمل نموده‌اند. طبق نمودار شکل ۶ در هنگام رسیدن به بیشینه نیرو میزان نفوذ سنبه در پانل ساندویچی حدود ۵/۳ میلی‌متر بوده است. در شکل ۶ نحوه آسیب سازه پانل

ساندویچی در آزمون نشان داده شده است. با توجه به کروی بودن سر سنبه، ورق رویی پانل ساندویچی 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 ۴۲ میلی‌متر لهیدگی ایجاد شده است.



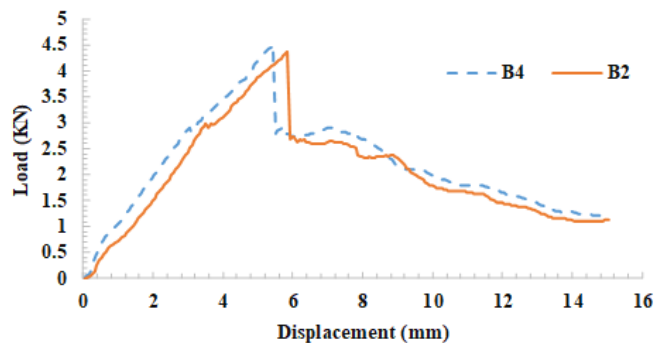
(ب)



(الف)

شکل ۶ الف) نحوه آسیب نمونه، ب) نمودار نیرو-جابجایی نمونه B1-B3

در نمونه‌های B2-B4 پس از اینکه نفوذ سنبه به حدود ۵/۳ میلی‌متر می‌رسد نیروی تماس به بیشینه مقدار خود یعنی ۴/۴۳ کیلو نیوتن می‌رسد. در شکل ۷ نحوه آسیب سازه پانل ساندویچی در آزمون نشان داده شده است.



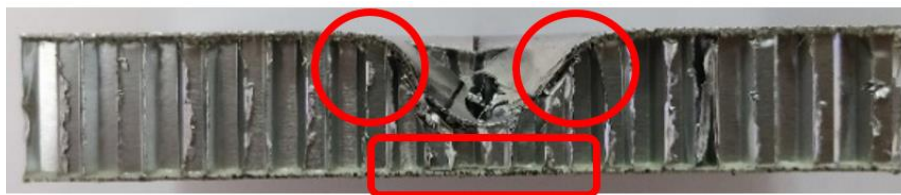
(ب)



(الف)

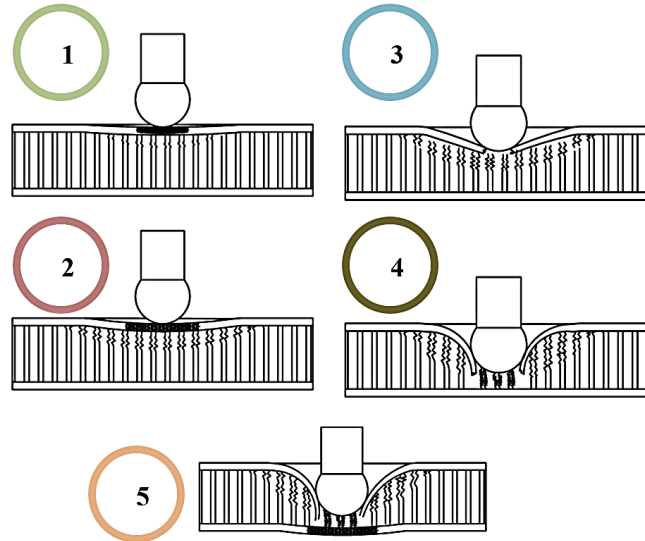
شکل ۷ الف) نحوه آسیب نمونه، ب) نمودار نیرو-جابجایی نمونه B2-B4

همانطور که در شکل ۸ سطح مقطع برش نشان داده شده است در نواحی نشان داده شده با رنگ قرمز، جدایش مغزی لانه زنبوری از تک لایه کامپوزیت و در ناحیه نفوذ سنبه جدایش ورق از تک لایه کامپوزیت اتفاق افتاده است.



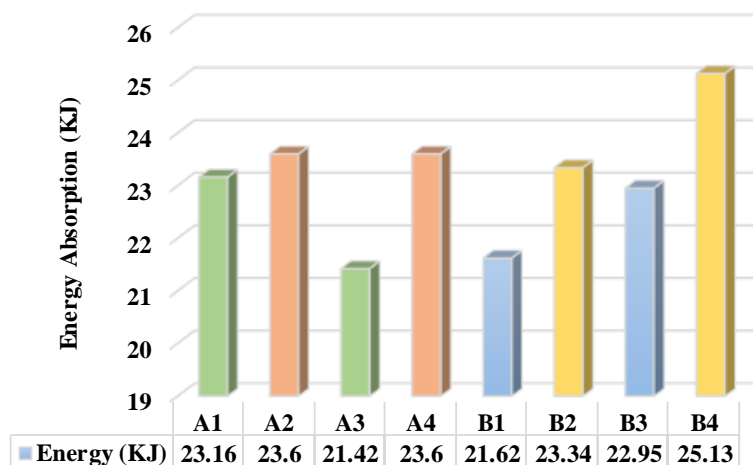
شکل ۸ برش نمونه آزمون شده

طبق شکل ۹ روند آسیب پانل ساندویچی بدین شرح می‌باشد 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 کمانش سول‌های 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.



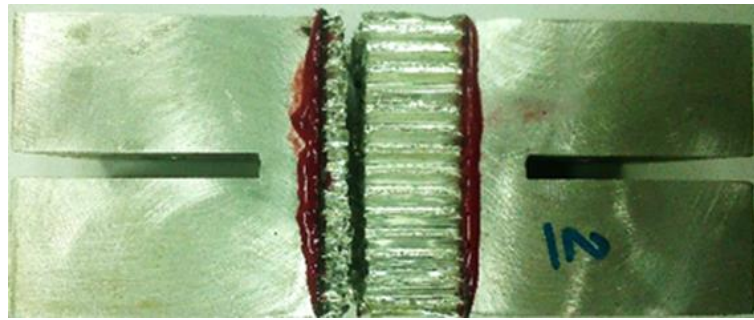
شکل ۹ روند آسیب پانل ساندویچی

در شکل ۱۰ بیشینه مقدار جذب انرژی نمونه‌های ساندویچی در آزمون نفوذ سنبه آورده شده است. بیشینه میزان جذب انرژی در نمونه‌های پانل ساندویچی آلومینیومی ۲۵/۱۳ کیلو ژول و کمترین آن ۲۱/۴۲ کیلو ژول می‌باشد.

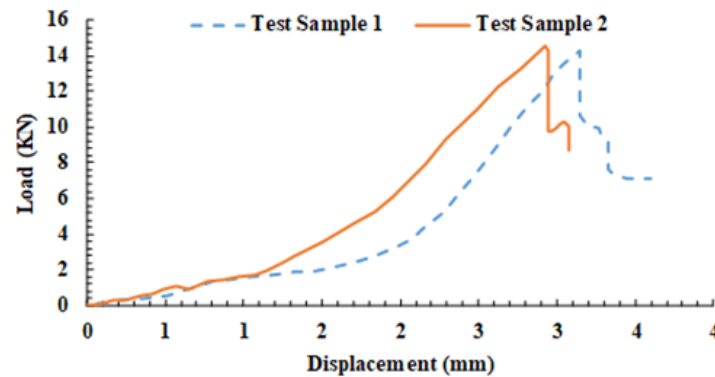


شکل ۱۰ میزان جذب انرژی نمونه‌های مختلف

جهت بررسی استحکام چسبندگی اتصال رویه به هسته ساندویچ پانل آزمون کشش سطحی طبق استاندارد ASTM C297 نیز انجام گردید. ابعاد نمونه ۵۰×۵۰ میلی‌متر می‌باشد. در این آزمون بهترین حالت نتایج، پارگی هسته ساندویچ پانل می‌باشد و بدترین حالت جدایش از محل اتصال رویه به هسته ساندویچ پانل می‌باشد. حداکثر نیروی ۱۴ کیلو نیوتن به قطعه در این آزمون وارد شده است.



(الف)



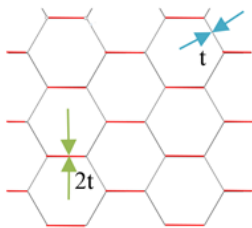
(ب)

شکل ۱۱ (الف) نحوه آسیب نمونه نمونه (ب) نمودار نیرو جابه‌جایی آزمون کشش سطحی ساندویچ پانل

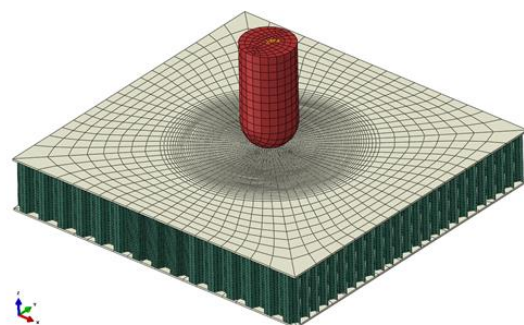
۴- تحلیل عددی آزمون نفوذ سنبه در پانل ساندویچی

۴-۱- مدل‌سازی

جهت شبیه‌سازی پدیده خرابی تحت نفوذ سنبه مدل‌سازی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس به صورت Dynamic/Explicit انجام شده است. بدین منظور هسته لانه زنبوری و پوسته پانل ساندویچی مطابق شکل ۱۲ به صورت المان پوسته مدل‌سازی شده‌اند. با توجه به نحوه ساخت مغزی لانه زنبوری و نقاط اتصال سلول‌های آن در راستای L مغزی لانه زنبوری، مطابق شکل ۱۲ نقاط اتصال در تحلیل عددی به صورت قید گره^۱ در نظر گرفته شده‌اند. در این نقاط اتصال ضخامت دیواره سلول $2t$ و در دیواره‌های آزاد ضخامت t می‌باشد. سنبه بصورت جسم صلب مدل‌سازی شده است. با توجه به قرار گرفتن نمونه آزمون در فیکسچر، شرایط مرزی فیکسچر بر روی نمونه پانل ساندویچی در تحلیل عددی مد نظر قرار گرفته است. در تحلیل عددی از المان S4 به تعداد ۲۰۶۲۴۴ استفاده شده است. نحوه شبکه بندی مناسب پس از مطالعه اثرات شبکه و همگرایی نتایج مطابق شکل ۱۲ می‌باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۱۲ (الف) نحوه المان بندی پانل ساندویچی، (ب) محل اتصال دیواره‌های سلول مغزی لانه زنبوری

¹ Tie

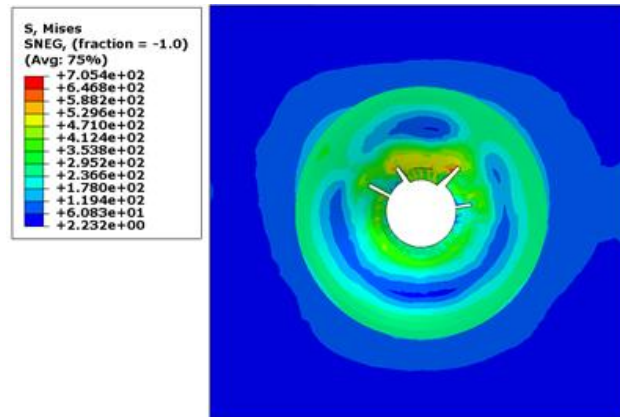
۴-۲- نتایج تحلیل عددی نمونه A

در شکل ۱۳ نحوه آسیب پوسته پانل ساندویچی در اثر نفوذ سنبه در تحلیل عددی نشان داده شده است. در تحلیل عددی با توجه به جنس پانل ساندویچی آلومینیوم، جهت مدل سازی آسیب، از معیار جانسون-کوک^۱ و حذف المان استفاده شده است. مقادیر معیار جانسون-کوک پوسته و هسته پانل ساندویچی در جدول ۴ آورده شده است.

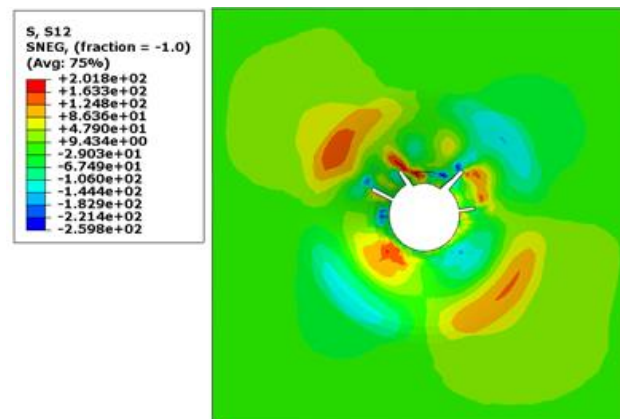
جدول ۴ مقادیر معیار جانسون-کوک پوسته و هسته پانل ساندویچی [۱۷]

پارامتر	Al 2024-T3	5052-H39
A (MPa)	352	265
B (MPa)	440	426
نرخ کرنش مرجع	0.00033	1
C	0.0083	0.015
n	0.42	0.34
m	1.7	1

در شکل ۱۳ بیشینه تنش برشی ۲۰۱ مگاپاسکال و در ناحیه نفوذ سنبه می باشد. همان طور که در نتایج تجربی آزمون نفوذ سنبه سر تخت در محل نفوذ سنبه ترک هایی مشاهده گردید، در تحلیل عددی نیز ترک هایی در محل نفوذ سنبه ایجاد شده اند.



(الف)

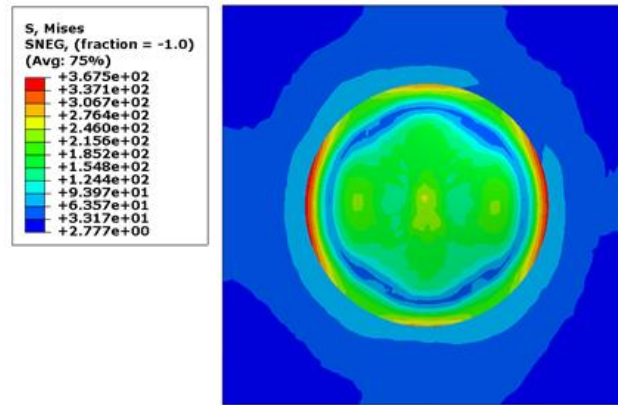


(ب)

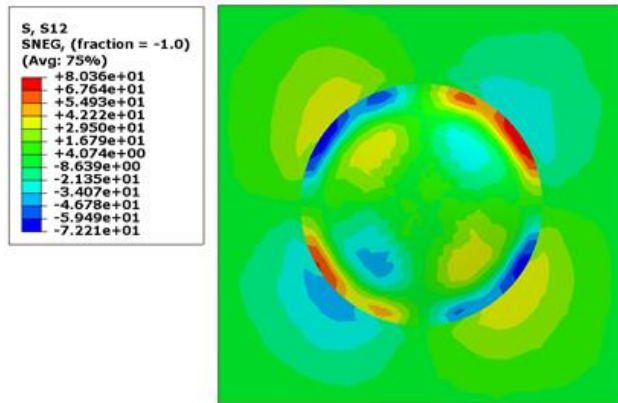
شکل ۱۳ (الف) توزیع تنش فون مایزر، (ب) تنش برشی منطقه آسیب محل نفوذ سنبه در پوسته

^۱ Johnson-Cook

در شکل ۱۴ توزیع تنش فون مایز پسته زیرین پانل ساندویچی و تنش برشی نشان داده شده است. در اثر نفوذ سنبه و فشار هسته لانه زنبوری به پسته زیرین پانل ساندویچی، بیشینه تنش فون مایز ۳۶۷ مگاپاسکال و در اطراف ناحیه فیکسچر می‌باشد. بیشینه تنش برشی در این ناحیه ۸۰/۳ مگاپاسکال می‌باشد.



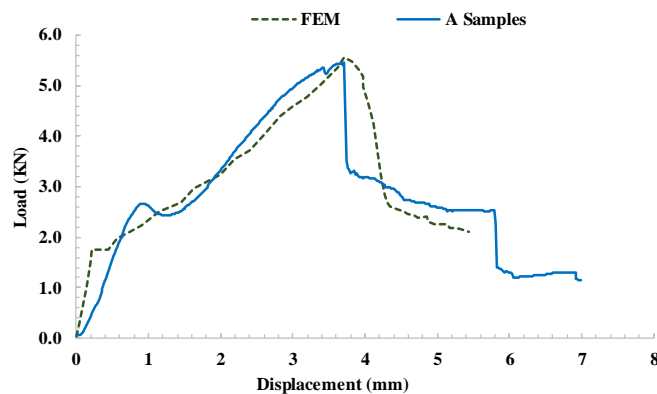
(الف)



(ب)

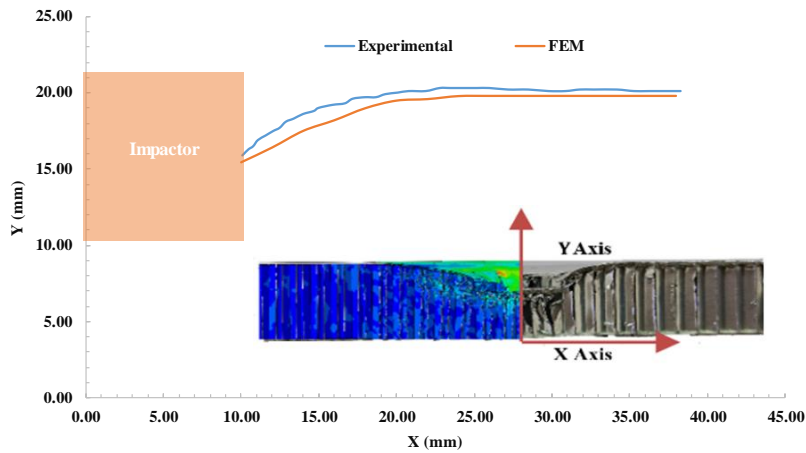
شکل ۱۴ (الف) توزیع تنش فون مایز، (ب) تنش برشی پسته پشتی پانل ساندویچی

بیشینه نیرویی که پانل ساندویچی در تحلیل عددی تحمل می‌کند ۵/۴۷۲ کیلو نیوتن می‌باشد. در این نقطه سنبه ۳/۸۲ میلی‌متر در پانل ساندویچی نفوذ می‌کند. نمودار نیرو بر حسب جابه‌جایی تحلیل عددی و نمونه تجربی A با سرعت نفوذ سنبه ۵ میلی‌متر بر دقیقه در شکل ۱۵ نشان داده شده است. بیشینه نیرو در نمونه تجربی ۵/۴۴۸ کیلو نیوتن می‌باشد.



شکل ۱۵ مقایسه نمودار نیرو بر حسب جابه‌جایی تحلیل عددی و تجربی

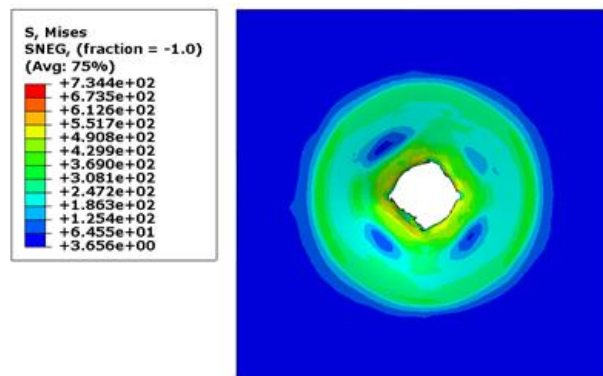
مقایسه انحناء تغییر شکل نمونه تجربی و عددی پانل ساندویچی در محل نفوذ سنبه در شکل ۱۶ نشان داده شده است که نتایج با هم تطابق مناسبی دارند.



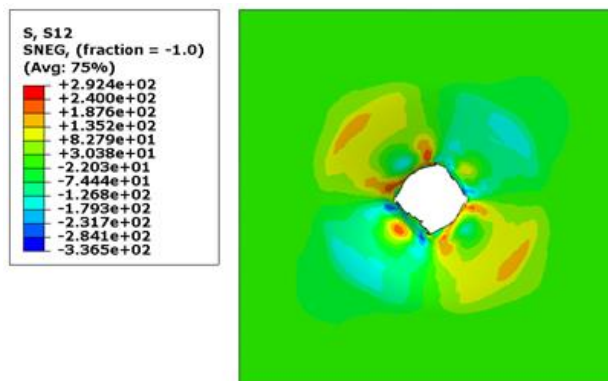
شکل ۱۶ نمودار تغییر شکل نمونه تجربی و عددی

۴-۳- نتایج تحلیل عددی نمونه B

در شکل ۱۷ نحوه آسیب پوسته پانل ساندویچی در اثر نفوذ سنبه در تحلیل عددی نشان داده شده است. در تحلیل عددی با توجه به جنس پانل ساندویچی آلومینیوم، جهت مدل سازی آسیب، از معیار جانسون-کوک استفاده شده است. بیشینه تنش برشی ۲۹۴ مگاپاسکال و در ناحیه نفوذ سنبه می باشد.



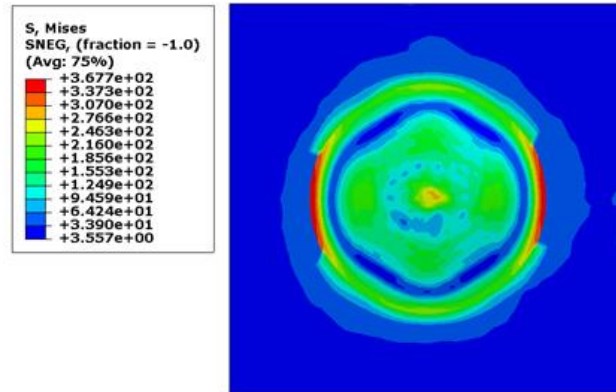
(الف)



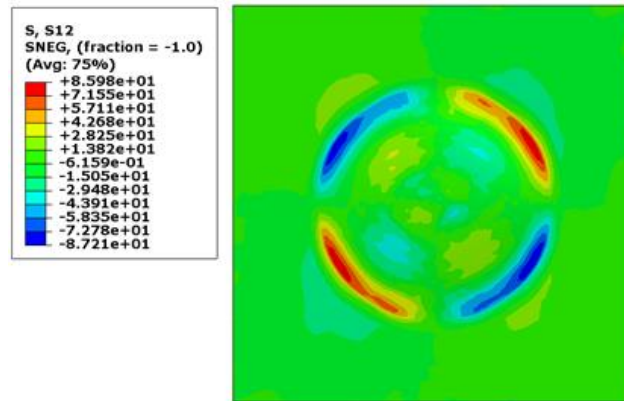
(ب)

شکل ۱۷ (الف) توزیع تنش فون مایز، (ب) تنش برشی منطقه آسیب محل نفوذ سنبه در پوسته

در شکل ۱۸ توزیع تنش فون مایرز پوسته زیرین پانل ساندویچی و در شکل تنش برشی نشان داده شده است. در اثر نفوذ سنبه و فشار مغزی لانه زنبوری به پوسته زیرین پانل ساندویچی، بیشینه تنش فون مایرز ۳۶۷ مگاپاسکال و در اطراف ناحیه فیکسچر می‌باشد. بیشینه تنش برشی در این ناحیه ۸۶ مگاپاسکال می‌باشد.



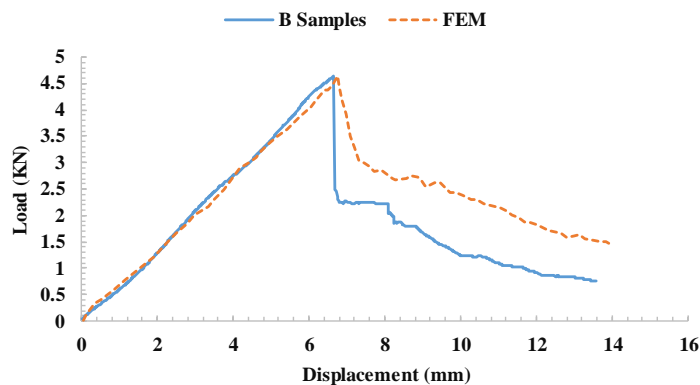
(الف)



(ب)

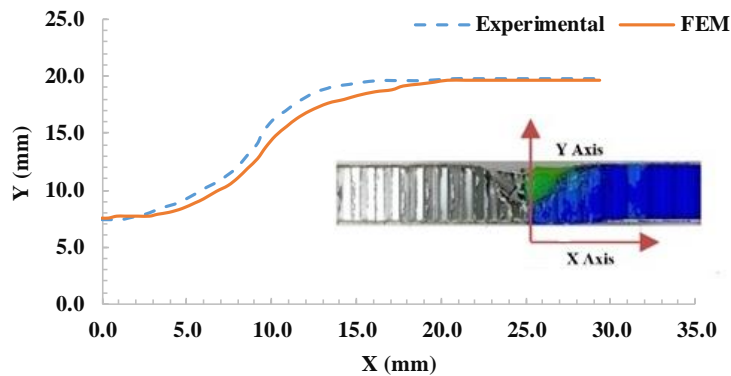
شکل ۱۸ (الف) توزیع تنش فون مایرز، (ب) تنش برشی پوسته پستی پانل ساندویچی

بیشینه نیرویی که پانل ساندویچی در تحلیل عددی تحمل می‌کند ۴/۶۴ کیلونیوتن می‌باشد. در این نقطه سنبه ۶/۷۵ میلی‌متر در پانل ساندویچی نفوذ می‌کند. نمودار نیرو بر حسب جابه‌جایی تحلیل عددی و نمونه تجربی B با سرعت نفوذ سنبه ۵ میلی‌متر بر دقیقه در شکل ۱۹ نشان داده شده است. بیشینه نیرو در نمونه تجربی ۴/۶۵ کیلونیوتن می‌باشد.



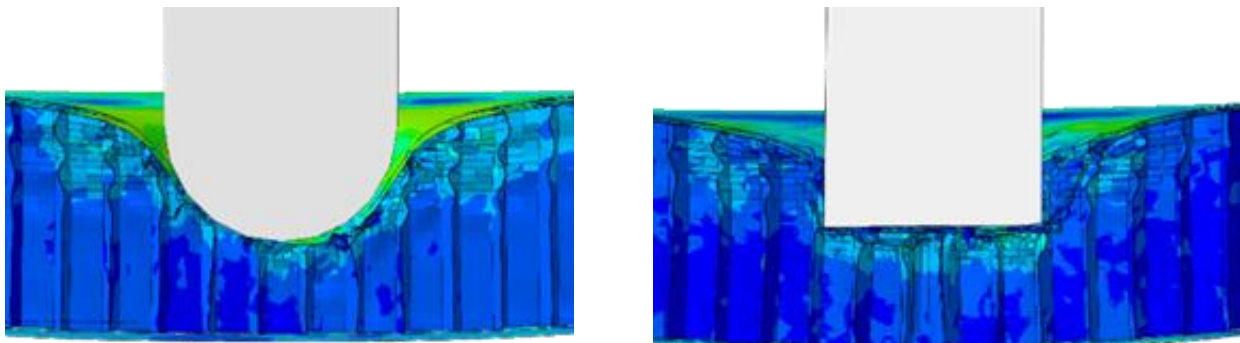
شکل ۱۹ مقایسه نمودار نیرو بر حسب جابه‌جایی تحلیل عددی و تجربی

مقایسه انحناء تغییر شکل نمونه تجربی و عددی پانل ساندویچی در محل نفوذ سنبه در شکل ۲۰ نشان داده شده است که نتایج تحلیل عددی مناسب می‌باشد.



شکل ۲۰ نمودار تغییر شکل نمونه تجربی و عددی

لازم به ذکر است در محل نفوذ سنبه در تحلیل عددی همانند نمونه تجربی هسته پانل ساندویچی و سلول‌های لانه زنبوری دچار کمانش و لهیدگی شده و پوسته پانل ساندویچی دچار پارگی می‌شوند. در شکل ۲۱ این موضوع نشان داده شده است.



شکل ۲۱ کمانش سلول‌های لانه زنبوری در محل نفوذ سنبه

بیشینه نیرو و اختلاف نتایج تجربی و عددی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵ مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی

مقایسه نتایج	تحلیل عددی	نمونه تجربی	تحلیل عددی	نمونه تجربی
	B1-B3	B1-B3	A1-A3	A1-A3
بیشینه نیرو (کیلو نیوتن)	۴/۶۴	B1 ۴/۶۵	۵/۴۷۲	A1 ۵/۴۴۸
		B3 ۴/۵۴		A3 ۵/۶۰
بیشترین درصد خطا	۲/۲			۲/۳

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی جذب انرژی و استحکام پانل‌های ساندویچ با صفحه آلومینیومی 2024-T3 به عنوان پوسته و لانه زنبوری آلومینیومی 5052 به عنوان هسته آن تحت بارگذاری پانچ شبه استاتیکی با استفاده از دو سنبه با مقطع مسطح و کروی، به صورت تجربی و عددی با نرم افزار آباکوس با روش حل صریح پرداخته شده است. نتایج تحلیل عددی و آزمون تجربی نشان می‌دهد که:

- نتایج تحلیل عددی نسبت به نتایج تجربی از تطابق خوبی برخوردار هستند. در تحلیل عددی دینامیک صریح استفاده از مقیاس جرم در عین حال که سرعت تحلیل عددی را بالا می‌برد ولی در دقت نتایج بسیار تاثیر گذار می‌باشد. در این تحقیق از مقیاس جرم استفاده نشده است. با توجه به نتایج تحلیل عددی، معیار جانسون-کوک معیار مناسبی جهت مدل‌سازی آسیب بوده است.
- میزان جذب انرژی نمونه‌های پانل ساندویچی A به طور میانگین ۲۲/۹۴ ژول و نمونه‌های پانل ساندویچی B به طور میانگین ۲۳/۲۶ ژول می‌باشند.
- مقایسه‌ی انحنای تغییر شکل نمونه‌های پانل ساندویچی در محل نفوذ سنبه در نتایج تجربی با نتایج عددی مناسب بوده و تقریباً بر روی یک‌دیگر منطبق می‌شوند.
- میزان درصد خطای نتایج تحلیل عددی با نتایج تجربی در بیشینه نیروی اعمالی به نمونه، بیشینه ۲/۳ درصد می‌باشد اما لازم به ذکر است به دلیل عدم مدل‌سازی اتصال رویه به هسته و استفاده از قید گره در مدل‌سازی، نمودارهای تجربی و عددی با یکدیگر کمی اختلاف دارند.

References

- [1] Darab S, Pol MH, Rahi A. Experimental Investigation of Aluminum Foam Sandwich Panels under Quasi-static Loading. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2020 Sep 22;7(7):14-23. [In Persian]
- [2] Zhang Y, Li Y, Guo K, Zhu L. Dynamic mechanical behaviour and energy absorption of aluminium honeycomb sandwich panels under repeated impact loads. Ocean Engineering. 2021 Jan 1;219:108344. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108344
- [3] Mahmoudabadi MZ, Sadighi M. Experimental investigation on the energy absorption characteristics of honeycomb sandwich panels under quasi-static punch loading. Aerospace Science and Technology. 2019 May 1;88:273-86. doi: 10.1016/j.ast.2019.02.035
- [4] Khaire N, Tiwari G, Patel V, Iqbal MA. Assessment of the ballistic response of honeycomb sandwich structures subjected to offset and normal impact. Defence Technology. 2023 Oct 1;28:56-73. doi: 10.1016/j.dt.2022.12.018
- [5] 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. 2022 Feb;24(2):1189-205. doi: 10.1177/10996362211036987
- [6] Sun G, Chen D, Wang H, Hazell PJ, Li Q. High-velocity impact behaviour of aluminium honeycomb sandwich panels with different structural configurations. International Journal of Impact Engineering. 2018 Dec 1;122:119-36. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2018.08.007
- [7] Zhang Y, Yan L, Zhang C, Guo S. Low-velocity impact response of tube-reinforced honeycomb sandwich structure. Thin-Walled Structures. 2021 Jan 1;158:107188. doi: 10.1016/j.tws.2020.107188
- [8] Petras A, Sutcliffe MP. Failure mode maps for honeycomb sandwich panels. Composite structures. 1999 Apr 1;44(4):237-52. doi: 10.1016/S0263-8223(98)00123-8
- [9] Foo CC, Seah LK, Chai GB. Low-velocity impact failure of aluminium honeycomb sandwich panels. Composite structures. 2008 Sep 1;85(1):20-8. doi: 10.1016/j.compstruct.2007.10.016
- [10] Crupi V, Epasto G, Guglielmino E. Collapse modes in aluminium honeycomb sandwich panels under bending and impact loading. International Journal of Impact Engineering. 2012 May 1;43:6-15. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2011.12.002
- [11] 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 Mar 15;236:111882. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.111882
- [12] Sun G, Huo X, Wang H, Hazell PJ, Li Q. On the structural parameters of honeycomb-core sandwich panels against low-velocity impact. Composites Part B: Engineering. 2021 Jul 1;216:108881. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108881
- [13] Hassanpour Roudbened F, Liaghat G, Sabouri H, Hadavinia H. Experimental investigation of quasistatic penetration tests on honeycomb sandwich panels filled with polymer foam. Mechanics of advanced materials and Structures. 2020 Nov 2;27(21):1803-15. doi: 10.1080/15376494.2018.1525628
- [14] Rezayat HR, Toozandehjani H, Zakeri A. Experimental study of energy absorption of sandwich panel with composite/elastomer skin. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 Dec 22;10(10):26-42. doi: 10.22034/IJME.2023.418015.1840 [In Persian]

- [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] Zhu S, Chai GB. Damage and failure mode maps of composite sandwich panel subjected to quasi-static indentation and low velocity impact. *Composite structures*. 2013 Jul 1;101:204-14. doi: [10.1016/j.compstruct.2013.02.010](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.02.010)