




ISSN: 2476-6909; Modares. Mech. Eng. 2026;26(08):609-620.

Modares Mechanical Engineering

DOI: 10.48311/mme.2026.119262.82977
journal homepage: mme.modares.ac.ir

Manufacturing Process and Bending Behaviour of Sandwich Panels made by Unidirectional Thermoplastic Composite Skin with Wood Core

Mostafa Babaei, Mohammad Golzar* , Hadi Ghorbani

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

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article Type

Original Research

Article History

Received: February 16, 2026

Revised: March 14, 2026

Accepted: April 22, 2026

ePublished: June 17, 2026

In recent years, significant advances in materials science and engineering have enabled the development and application of novel materials in engineered structures. Among these materials, composites have attracted increasing attention due to their high strength-to-weight ratio, favorable mechanical properties, and design flexibility. One important application of these materials is the fabrication of sandwich panels with lightweight cores and stiff skins, which can serve as suitable alternatives to conventional materials in sectors such as construction and transportation. In the present study, the fabrication and mechanical characterization of bio-based wood-core composite sandwich panels were investigated. Thermoplastic samples were fabricated using the hot-press method, while thermoset samples were produced by the vacuum-assisted resin infusion process. The face sheets of the thermoplastic panels consisted of glass fiber-reinforced polyamide 6, whereas glass fiber-reinforced epoxy resin was used as the face sheet in thermoset samples. Mechanical performance was assessed by three-point bending tests, and parameters such as face bending stress, core bending stress, and overall flexural strength were obtained experimentally. Furthermore, indices of strength-to-weight ratio and energy absorption were calculated and compared across the different systems. By increasing one thermoplastic layer the mass force to weight is increased 12 percent and the face bending stress over weight is increased by 7 percent meanwhile the energy absorbed energy is constant. Finally, the results were benchmarked against findings from previous studies to highlight performance improvements and potential advantages of the proposed configurations.

Keywords: Composite, Thermoplastic composite sandwich panel, Wood core, Three-point bending test

How to cite this article

Babaei M, Golzar M, Ghorbani H, Manufacturing Process and Bending Behaviour of Sandwich Panels made by Unidirectional Thermoplastic Composite Skin with Wood Core. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(08):609-620.

*Corresponding author's email: m.golzar@modares.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0003-3873-7262



Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



شاپا: ۷۹۰۹-۷۴۷۷؛ مهندسی مکانیک مدرس. ۷۲۰-۷۰۹-۲۶(۰۸):۱۴۰۵

مهندسی مکانیک مدرس

DOI: 10.48311/mme.2026.119262.82977

صفحه اصلی مجله: mme.modares.ac.ir



فرآیند ساخت و رفتار خمشی ساندویچ پنل با پوسته کامپوزیت‌های الیاف ممتد ترموپلاستیک و هسته‌ی چوبی

مصطفی بابایی، محمد گلزار^{ib*}، هادی قربانی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷

چکیده

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشم‌گیر در حوزه‌ی علم مواد و مهندسی، زمینه‌ساز توسعه و به‌کارگیری مواد نوین در ساختارهای مهندسی شده است. از میان این مواد، کامپوزیت‌ها به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت مطلوب و امکان طراحی متنوع، توجه بسیاری از پژوهش‌گران را به خود جلب کرده‌اند. یکی از کاربردهای مهم این خانواده، تولید ساندویچ پنل‌ها با هسته‌های سبک و پوسته‌های مقاوم است که می‌توانند جایگزین مناسبی برای مصالح سنتی در صنایع مختلف به‌ویژه ساختمان و حمل‌ونقل باشند. در مقاله حاضر، ساخت و بررسی خواص مکانیکی ساندویچ پنل‌های کامپوزیتی مبتنی بر هسته‌ی زیستی چوب مورد مطالعه قرار گرفته است. فرآیند ساخت نمونه‌های ترموپلاستیک با روش پرس گرم و نمونه‌ی ترموست با روش پمپ خلأ انجام شد. مواد مصرفی شامل پوسته‌های ترموپلاستیک پلی‌آمید ۶ تقویت‌شده با الیاف شیشه و نیز رویه‌ی اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه در نمونه‌ی ترموست می‌باشند. جهت ارزیابی خواص مکانیکی، آزمون خمش سه‌نقطه‌ای انجام شد و نتایجی همچون تنش خمشی رویه، تنش خمشی پوسته و استحکام خمشی به دست آمد. در ادامه، شاخص‌های استحکام به وزن و جذب انرژی محاسبه و با یکدیگر مقایسه گردید. با افزایش لایه ترموپلاست حداکثر نیرو به وزن میزان ۱۲ درصد افزایش یافت در حالیکه تنش خمشی به وزن تنها ۷ درصد افزایش یافته و جذب انرژی تقریباً یکسان بوده است. هم‌چنین نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین تطبیق داده شد تا نقاط قوت و بهبودهای احتمالی برای کاربردهای صنعتی در سازه‌های سبک و خوردوسازی و ساختمان مشخص شود.

کلیدواژه‌ها: کامپوزیت، ساندویچ پنل کامپوزیتی ترموپلاستیک، هسته‌ی چوبی، آزمون خمش سه‌نقطه.

نحوه ارجاع به این مقاله

بابایی مصطفی، گلزار محمد، قربانی هادی، فرآیند ساخت و رفتار خمشی ساندویچ پنل با پوسته کامپوزیت‌های الیاف ممتد ترموپلاستیک و هسته‌ی چوبی، مهندسی مکانیک مدرس. ۷۲۰-۷۰۹-۲۶(۰۸):۱۴۰۵

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.golzar@modares.ac.ir

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0000-0003-3873-7262



Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

دریایی و حتی ساختمان‌سازی مدرن به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

ساختارهای ساندویچی با قرار دادن یک هسته‌ی سبک میان دو پوسته‌ی صلب، نسبت استحکام به وزن بالایی ایجاد می‌کنند و به همین دلیل کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. امروزه، مهندسان با به‌کارگیری هسته‌هایی از جنس فوم، بالسا، آلومینیوم لانه‌زنبوری و مواد مرکب سبک، در کنار پوسته‌هایی از فایبرگلاس، کربن یا فلزات نازک، سازه‌هایی طراحی می‌کنند که ضمن داشتن وزن اندک، عملکرد مکانیکی و حرارتی بسیار بالایی ارائه می‌دهند [۹-۷]. در نتیجه، ساختارهای ساندویچی به‌عنوان یکی از کارآمدترین راهکارهای مهندسی برای دستیابی به تعادل میان سبکی، استحکام و صرفه‌جویی در مصرف ماده شناخته می‌شوند.

۲- شرح مسئله

مقاله حاضر با تمرکز بر بررسی خواص مکانیکی ساندویچ پنل‌های ترموپلاستیک تقویت‌شده با الیاف ممتد و هسته‌ی چوبی، گامی در جهت توسعه‌ی سازه‌های سبک، مقاوم و زیست پذیر برداشته است.

پژوهش‌های متعددی در دهه‌های اخیر بر توسعه و بهبود سازه‌های کامپوزیتی متمرکز بوده‌اند. نینگ و همکاران (۲۰۰۶) ساندویچ پنل ترموپلاستیک با رویه‌ی شیشه/پلی‌پروپیلن و هسته‌ی پلی‌پروپیلن طراحی کردند و با انجام آزمون خمش و شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس (Ansys)، کاهش ۵۵ درصدی وزن نسبت به پنل آلومینیومی را گزارش نمودند [۱۰]. حلیمی و همکاران (۱۳۹۰) امکان ساخت سازه‌ی ساندویچی با هسته‌ی فوم به روش کیسه‌ی خلأ را بررسی کردند و بهبود ۳۸ درصدی مقاومت خمشی را نشان دادند [۱۱]. جی و همکاران (۲۰۱۵) چهار روش مختلف ساخت پنل شیشه/اپوکسی - فوم ترموست را مقایسه کردند و افزایش صلبیت و خواص برشی را گزارش نمودند [۱۲].

در همان سال، گرانوالد و همکاران (۲۰۱۵) روش‌های اتصال پوسته و هسته در پنل‌های ترموپلاستیک را مرور کردند [۱۳]. ژو و همکاران (۲۰۱۶) با معرفی هسته‌ی خریایی و انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای، مکانیسم‌های شکست جدیدی را شناسایی کردند [۱۴]. اکان و همکاران (۲۰۱۸) پنل زیستی با رویه‌ی ترموپلاستیک و هسته‌ی چوب بالسا را تحت بارهای ضربه‌ای مورد بررسی قرار دادند و ظرفیت بالای جذب انرژی را گزارش کردند [۱۵].

در ایران، نیک‌فروز و همکاران (۲۰۱۸) اثر پارامترهای پردازش پرس داغ بر ورقه‌های پلی‌آمید ۶/الیاف شیشه را مطالعه کردند [۱۶]. ادگارز و همکاران (۲۰۱۹) سه نوع پنل سبک ساختمانی بر پایه‌ی چوب و ترموپلاستیک معرفی کردند که تا ۴۲ درصد صلبیت بیش‌تری نسبت به تخته‌ی چنل داشتند [۱۷]. آذر افزا و همکاران (۱۴۰۰) عملکرد خمشی ساندویچ پنل‌های کربن/اپوکسی و

ساختارهای ساندویچی از دیرباز در طبیعت وجود داشته‌اند و نمونه‌های گوناگونی از آن در میان موجودات زنده و سازه‌های طبیعی مشاهده می‌شود. برای مثال، اسکلت جانوران که ترکیبی از بخش‌های سبک و مقاوم است، لانه‌ی زنبور که از هندسه‌ی شش‌ضلعی منظم با حداقل مصرف ماده و بیشترین سختی تشکیل شده، و ساقه‌ی گیاهان که دارای ساختار توخالی اما مستحکم هستند، همگی نمونه‌هایی از سازه‌های ساندویچی طبیعی به شمار می‌روند. این پدیده‌ها در گذر زمان الهام‌بخش طراحان و مهندسان بوده‌اند تا با الگوگیری از طبیعت، سازه‌هایی سبک، مقاوم و بهینه خلق کنند. استفاده‌ی مصنوعی از چنین ساختارهایی پیشینه‌ای طولانی دارد و ریشه‌ی آن به دوران باستان بازمی‌گردد. گفته می‌شود دیادالوس، مهندس و مخترع یونانی، حدود ۱۳۰۰ سال پیش از میلاد، نخستین نمونه‌ی سازه‌ی لانه‌زنبوری فلزی را طراحی کرده است [۱،۲]. در قرون بعد، ایده‌ی ساختارهای چندلایه به‌تدریج در معماری و طراحی کشتی‌ها نیز مورد توجه قرار گرفت، اما نقطه‌ی عطف اصلی در قرن نوزدهم و با پیشرفت علم شیمی و متولد شدن مواد جدید رقم خورد.

با ظهور رزین‌های مصنوعی و توسعه‌ی فایبرگلاس، امکان تولید مصالح مرکب یا همان کامپوزیت‌ها فراهم شد [۳]. این مواد جدید با ترکیب الیاف تقویتی (نظیر شیشه، کربن یا آرامید) و زمینه‌ی پلیمری، ویژگی‌هایی منحصر به فرد از جمله استحکام ویژه‌ی بالا، مقاومت شیمیایی، وزن کم و قابلیت شکل‌دهی در هندسه‌های پیچیده را فراهم آوردند. به همین دلیل، کامپوزیت‌ها به‌سرعت جای خود را در میان مصالح مهندسی باز کردند و راه را برای تولید ساختارهای ساندویچی پیشرفته هموار نمودند. نخستین کاربرد گسترده و نظام‌مند این ساختارها در خلال جنگ جهانی دوم بود، زمانی که برای ساخت هواپیماهایی سبک و مقاوم از پنل‌های ساندویچی با پوسته‌ی چوبی و هسته‌ی بالسا استفاده شد [۴]. این تلاش‌ها موجب شکل‌گیری نخستین تحلیل‌های نظری در زمینه‌ی رفتار مکانیکی ساندویچ پنل‌ها گردید و پایه‌های علمی طراحی این سازه‌ها را بنا نهاد.

در دهه‌های بعد، پیشرفت در فناوری الیاف و رزین‌ها، به‌ویژه با ظهور الیاف کربن و اپوکسی‌های پیشرفته، موجب گسترش چشمگیر کاربرد ساختارهای ساندویچی در صنایع مختلف شد. کامپوزیت‌ها معمولاً از ترکیب الیاف تقویتی و زمینه‌ی پلیمری ساخته می‌شوند و ویژگی‌هایی مانند استحکام ویژه‌ی بالا، مقاومت در برابر خوردگی، سبکی و قابلیت طراحی انعطاف‌پذیر دارند [۵،۶]. این سازه‌ها به دلیل نسبت استحکام به وزن بسیار بالا، قابلیت جذب انرژی، پایداری در برابر خستگی و مقاومت مطلوب در محیط‌های خورنده، در حوزه‌های هوافضا، خودروسازی، صنایع

۳- روش حل

۳-۱- مواد مصرفی

مواد مورد استفاده در این مقاله شامل پیش آغشته‌های شیشه/پلی‌آمید ۶ به‌عنوان پوسته و چوب‌های زیستی با ضخامت‌های پایین به‌عنوان هسته‌ی ساندویچ پل‌ها بوده است. پیش آغشته‌ها از نوع الیاف شیشه ممتد و پل آمید ۶ به شکا آماده خریداری شده اند و مشخصات کامل پیش آغشته‌ها شامل سازنده ابعاد، ضخامت، درصد حجمی الیاف و دما ذوب در مقاله ای کامل گزارش شده است [16] [برای تهیه‌ی هسته‌های چوبی، ابتدا تنه‌ی درخت به کمک دستگاه اره به الوار تبدیل شد. سپس، با استفاده از دستگاه گندگی موجود در کارگاه چوب خاوران، ضخامت‌ها به ابعاد مورد نیاز کاهش یافت. پس از آن، با بهره‌گیری از دستگاه برش، ورق‌های چوبی به ابعاد مشخص برای نمونه‌ها آماده گردید. برای تثبیت ابعاد و آماده‌سازی فرآیند ساخت، قاب فلزی مورد نیاز در نرم‌افزار سالی‌دورکس (SolidWorks) طراحی شد و پس از خرید ورق‌های فولادی از بازار آهن، توسط نرم‌افزار سیپ-کات (Cypcut) عملیات برش لیزر به ابعاد مورد نظر انجام گرفت.

۳-۲- ساخت نمونه‌ها

ساخت دقیق نمونه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا حتی باوجود دستگاه‌های آزمایشگاهی و حسگرهای دقیق، خطای ناشی از ساخت می‌تواند نتایج آزمون‌ها را تحت تأثیر قرار دهد.

۳-۲-۱- ساخت نمونه‌های ترموپلاستیک

در نمونه‌ی نخست، از چوب راش با ضخامت ۵/۱ میلی‌متر استفاده شد که ابعاد آن به ۲۱۰ در ۲۱۰ میلی‌متر آماده گردید. در این نمونه، ابتدا لایه‌ی زیرین پلی‌آمید ۶ با ضخامت ۶/۱۰ میلی‌متر و آرایش (۹۰/۰) در قالب فلزی قرار گرفت، سپس هسته‌ی چوبی در وسط و در نهایت لایه‌ی بالایی پلی‌آمید با همان مشخصات جایگذاری شد. در نمونه‌ی دوم، از بلوک‌های چوبی موسوم به چوب بستنی با طول ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت حدود ۲ میلی‌متر در دو ردیف استفاده شد. لایه چینی مشابه نمونه‌ی اول و در ابعاد قالب ۲۱۰ در ۲۱۰ میلی‌متر انجام گردید.

پس از آماده‌سازی، فرآیند هات‌پرس با استفاده از دستگاه پرس ۵۰ تنی شرکت پردیس افق ایرانیان انجام شد. به‌منظور جلوگیری از چسبندگی، صفحات تفلون در بالا و پایین نمونه قرار گرفتند. دما طی ۳۰ دقیقه به ۲۴۵ درجه‌ی سلسیوس افزایش یافت و سپس فشار ۳۰ کیلو نیوتن به مدت ۵ دقیقه اعمال گردید. این مقدار نیرو بر سطح نمونه‌ها تنش معادل ۶۸۰ کیلو پاسکال وارد می‌کند پس از اتمام سیکل حرارتی، نمونه‌ها به مدت دو ساعت در دستگاه تا رسیدن به دمای محیط سرد شدند. در طی این فرآیند، به دلیل حساسیت بالای چوب به حرارت، بخش‌هایی از یحاشیه‌ی نمونه چوب اکسیده شدند؛ این پدیده در نمونه‌ی دوم مشهودتر بود.

شیشه/اپوکسی با هسته‌ی آلومینیومی را مقایسه کردند و برتری قابل‌توجه نمونه‌های کربنی را گزارش نمودند [۱۸].

در سال‌های اخیر، مطالعات بر رفتار ترکیبات جدید ادامه یافته است. هریزی و همکاران (۲۰۲۱) پل‌های ترموپلاستیک کربنی را با هسته‌های مختلف آزمودند و نشان دادند که هسته‌ی آلومینیومی بیش‌ترین صلبیت و هسته‌ی PEI بیش‌ترین انرژی جذب‌شده را دارد [۱۹]. منوچهری و همکاران (۱۴۰۱) به مقایسه‌ی عددی و تجربی جذب انرژی پل‌های ترموست و ترموپلاستیک با هسته‌ی لانه‌ی زنبوری پرداختند [۲۰]. فوکان ژیا و همکاران (۲۰۲۲) انواع هسته‌های موجدار، لانه‌ی زنبوری و خریایی را بررسی کردند و نشان دادند که SEA با افزایش چگالی نسبی افزایش می‌یابد [۲۱]. در تازه‌ترین پژوهش، یان و همکاران (۲۰۲۴) دیوارهای ساندویچی با پوسته‌ی شیشه/پلیمر و هسته‌ی چوب پائولونیا را تحلیل کردند و با کاهش نسبت ارتفاع به ضخامت، بهبود ۱۲۴ درصدی ظرفیت باربری را گزارش کردند [۲۲].

این مرور نشان می‌دهد که طیف گسترده‌ای از مواد و روش‌ها برای ساخت ساندویچ پل‌ها به کار گرفته شده است و هر یک ویژگی‌های خاص خود را ارائه کرده‌اند. باوجود این، استفاده از هسته‌های زیستی مانند چوب در کنار پوسته‌های ترموپلاستیک تقویت‌شده، هم به بهبود خواص مکانیکی و هم به پایداری زیست‌محیطی کمک می‌کند.

این مقاله به بررسی یک پیشنهاد و نوآوری در سازه ساندویچی پرداخته می‌شود که هم سبک و هم نسبتاً ارزان و برای توسعه پایدار مناسب هستند. این ساندویچ پل جدید دارای هسته‌ی ای از چوب که یک ماده طبیعی، زیستی و بازیافت پذیر و سبک است و پوسته از ماده مرکب بالیاف پیوسته و یک ترموپلاست که علاوه بر سبکی بازیافت پذیر و نرم است. در مقابل ساندویچ پل‌های مرسوم و متداول که پوسته آنها از ترموست ترد و بازیافت ناپذیر است و البته در ساندویچ پل‌های موجود دارای هسته‌های کاغذی، پلیمری فومی مانند پی وی سی یا آلومینیومی هستند که عمدتاً گران و نیاز به فنآوری پرهزینه هستند.

در این مقاله ابتدا پس از شرح مواد اولیه مورد استفاده در ساندویچ پل جدید به فنآوری ساخت آن گزارش می‌شود نکات مهم و کلیدی در ساخت آن توضیح داده می‌شود و محدودیت‌های تولید هم اشاره می‌شود. سپس نمونه‌های استاندارد برای آزمایش‌های خمشی استاندارد تهیه و در چند لایه چینی پوسته مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج آزمایش‌ها شامل نمودارهای نیرو جابجایی بررس و برای محاسبات و مقایسه از روابط استاندارد استفاده می‌شود. و در پایان با سازه‌های ساندویچی مرسوم و متداول در صنعت مقایسه می‌شوند.

جدول 2 مشخصات نمونه ترموست ساخته شده

Table 2 Specifications of the fabricated thermoset sample

Layup	Dimension (mm)	Skin	core	Sample
[0/90]	260*260	CGF/PA6	Pine	5

۳-۳-۳- دستگاه‌ها و تجهیزات

۳-۳-۱- دستگاه برش

پس از آماده‌سازی و خط‌کشی، عملیات برش نمونه‌ها توسط دستگاه برش کامپوزیت در آزمایشگاه تحقیقاتی کامپوزیت دانشگاه علم و صنعت و هم‌چنین دستگاه برش سرامیک انجام شد.

۳-۳-۲- دستگاه کشش SANTAM STM-20

آزمون‌های مکانیکی با دستگاه کشش سنتم (SANTAM) مدل STM-20 موجود در آزمایشگاه سازه‌های هوشمند و سبز دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. این دستگاه قابلیت اعمال بار دقیق و ثبت داده‌ها با حساسیت بالا را داراست.

۳-۴-۳- آزمون‌ها

۳-۴-۳-۱- آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

به‌منظور ارزیابی رفتار مکانیکی نمونه‌ها، آزمون خمش سه‌نقطه مطابق استاندارد ASTM C393 انجام شد. نسبت دهانه به ضخامت مطابق استاندارد رعایت شده است و مانند مرجع ۱۱ انجام شده است. سرعت حرکت فک بالایی دستگاه ۵ میلی‌متر بر دقیقه تعیین گردید. ابعاد نمونه‌های ترموپلاستیک و ترموست در جدول ۳ آورده شده‌اند.

در طی آزمون مشخص شد که هسته‌های با ضخامت پایین به دلیل سوختگی ناشی از فرآیند ساخت، نتایج قابل‌اعتمادی ارائه نمی‌دهند؛ بنابراین این گروه از نمونه‌ها از تحلیل خارج شدند و بررسی‌ها تنها بر روی نمونه‌های با ضخامت ۵ میلی‌متر متمرکز گردید. شاخص‌های استخراج‌شده از آزمون شامل تنش خمشی رویه، تنش خمشی هسته، استحکام خمشی و میزان جذب انرژی بودند که مبنای مقایسه‌ی بین نمونه‌های ترموپلاستیک و ترموست قرار گرفتند.

تنش برشی هسته τ را می‌توان از طریق رابطه‌ی ۱ که از استاندارد ASTM C393 استخراج گردیده است محاسبه کرد:

$$\tau = \frac{P}{(h+t_c)b} \quad (1)$$

که در آن τ تنش برشی هسته برحسب مگاپاسکال (MPa)، P نیرو برحسب نیوتن (N)، h ضخامت کل برحسب میلی‌متر (mm)، t_c ضخامت هسته برحسب میلی‌متر (mm) و b عرض نمونه برحسب میلی‌متر (mm) است.

گفتنی است مدت نگهدار و دمای حداکثر و نیرو و تمامی چرخه دما زمان و نیرو زمان برای تمامی نمونه‌ها با پوسته گرم‌انرم از پیش آغشته‌های الیاف ممتد شیشه و پلی‌آمید ۶ برابر شکل ۱ در نظر گرفته شده‌اند. توضیحات کامل در باره شکل ۱ و نمودار زمان در بخش نتایج آمده است. روش کنترل دمای پرس با توجه به حسگرهای و حلقه‌های کنترل داخلی پرس به شکل خودکار انجام شد. بنابراین دما پرس با توجه به خود پرس تنظیم و کنترل می‌شود.

جدول 1 نمونه‌های ترموپلاستیک ساخته شده به روش پرس گرم

Table 1 Thermoplastic samples made by hot pressing method

Layup	Dimension (mm)	skin	Core wooden	Sample
[0/90]	210*210	CGF/PA6	Beech	1
[0/90]	210*210	CGF/PA6	Ice Stick	2
[0/90]	260*260	CGF/PA6	Pine	3
[0/90/0]	260*260	CGF/PA6	Pine	4

در نمونه‌ی سوم، از چوب روسی با ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شد و ابعاد قالب به ۲۶۰ در ۲۶۰ میلی‌متر تغییر یافت. لایه چینی پوسته‌ها به‌صورت (۰/۹۰/۰) انجام شد تا خواص مکانیکی پوسته‌ها و هسته به شکل بهینه ترکیب شوند. برای جلوگیری از آسیب‌های حرارتی، سطوح داخلی قاب فلزی با نوار کپتون پوشش داده شدند و کل نمونه در یک کیسه‌ی کپتون قرار گرفت. این تغییرات موجب بهبود کیفیت نهایی و کاهش آسیب حرارتی هسته گردید.

نمونه‌ی چهارم نیز با هسته‌ی چوب کاج روسی ۵ میلی‌متری و لایه‌چینی مشابه ساخته شد. مشخصات مربوط به نمونه‌های ترموپلاستیک در جدول شماره‌ی ۱ ارائه شده است.

۳-۲-۲- ساخت نمونه ترموست

برای ساخت نمونه‌ی ترموست، از هسته‌ی چوب کاج روسی و رویه‌های با الیاف شیشه‌ی ممتد (یک‌جهت (از معادل بهتر استفاده شود، جهت در فارسی نداریم: جهتی) استفاده شد. رویه‌ها شامل دولایه پارچه‌ی شیشه‌ای آغشته به رزین اپوکسی ۲۰۲۵ بودند. پس از لایه‌چینی، تجهیزات فرآیند وکیوم شامل لایه‌های رها‌ساز، تنفسی و کیسه‌ی خلأ بر روی نمونه قرار داده شد. پس از آب‌بندی کامل، پمپ خلأ فعال شد تا فشار یکنواخت بر سطح پنل اعمال گردد و رزین به‌طور کامل عمل‌آوری شود. نمونه‌های ساندویچ پنل با رویه ترموست در مدت زمان دو و نیم ساعت و مقدار خلا حدود یک بار منفی و دمای پنجاه درجه سلسیوس پخت می‌شود و پس از در دمای شصت و پنجه سلسیوس برای پسا پخت نگهداری می‌شود. قطعه‌ی نهایی با ابعاد ۲۶۰ در ۲۶۰ میلی‌متر و ضخامت ۵/۷ میلی‌متر طی ۲۴ ساعت آماده گردید. مشخصات نمونه ترموست در جدول ۲ آورده شده است.

جدول 3 اطلاعات ابعادی مربوط به قطعات

Table 3 Dimensional information related to parts

sample	core thickness* t _c (mm)	Skin thickness* t _f (mm)	thickness h (mm)	width b (mm)	span (mm) l	mass W (gr)
3	5	0.6	5.6	73	150	68
4	5	0.9	5.9	73	150	75
5	5	1.15	7.3	73	150	90

* درصد تغییر ضخامت هسته و پوسته حداکثریک در صدر انداره است.

تنش خمشی رویه را نیز می توان از رابطه ۲ به دست آمده از همین استاندارد محاسبه نمود:

$$\sigma = \frac{Pl}{2t_f(h+t_c)b} \quad (2)$$

که در آن σ تنش خمشی رویه برحسب مگاپاسکال (MPa)، l طول دهانه ای آزمون برحسب میلی متر (mm) و t_f ضخامت رویه برحسب میلی متر (mm) است.

استحکام خمشی سازه ی ساندویچی با بهره گیری از اصول و تئوری های مکانیک سازه ها قابل محاسبه است. در این نوع سازه ها، تنش های خمشی عمدتاً در لایه های رویه متمرکز می شوند و مقدار آن ها به ضخامت و مدول الاستیک مواد تشکیل دهنده بستگی دارد [۲۳].

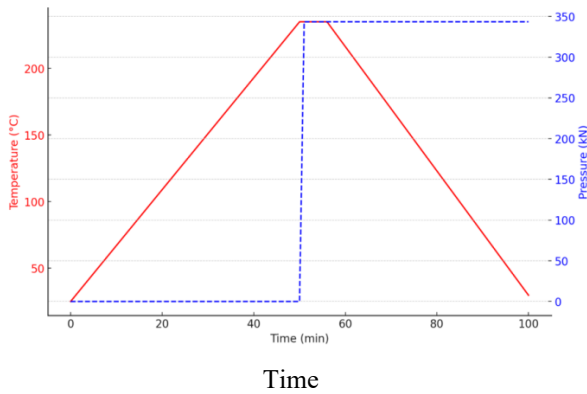
$$\sigma_f = \frac{P \cdot l}{4bh} \quad (3)$$

که در آن σ_f استحکام خمشی برحسب مگاپاسکال (MPa) است. برای مقایسه ی بازده مکانیکی دو ساختار ساندویچی نسبت به وزن، از معیار نسبت استحکام به چگالی استفاده می شود [۲۴].

۴- تفسیر و تحلیل نتایج

۴-۱- نمودار فشار - زمان و دما - زمان ترموپلاستیک ها

شکل ۱ نمودار فشار-زمان و دما-زمان در فرآیند پرس گرم را نشان می دهد. این نمودار شامل سه ناحیه است: ناحیه ی اول مربوط به افزایش دما بدون اعمال فشار است؛ ناحیه ی دوم با نقطه ی اوج فرآیند همراه است و فشار در زمان رسیدن به دمای ذوب مورد نظر اعمال می شود؛ و ناحیه ی سوم مربوط به خنک سازی قطعه پس از حدود ۵ دقیقه ماندن در دمای ذوب است که هم زمان فشار نیز اعمال می شود و سپس فرآیند کاهش دما بدون برداشتن بار ادامه می یابد. قابل توجه است که به منظور کاهش اکسیداسیون، دما تا ۲۰ درجه ی سلسیوس بالاتر از دمای ذوب پیش آغشته ها افزایش یافته است.



شکل 1 نمودار فشار - زمان و دما - زمان

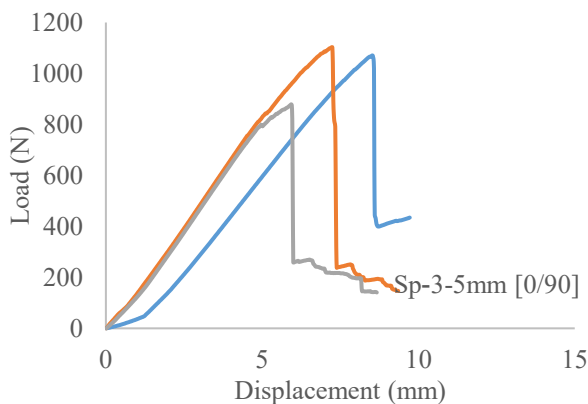
Figure 1 Pressure-time and temperature-time diagrams

۴-۲- نتایج آزمون خمش برای نمونه های ترموپلاستیک

شکل ۲ نمودار نیرو- جابه جایی را برای ساندویچ پنل با ضخامت ۵ میلی متر نشان می دهد. هر سه آزمون انجام شده روی نمونه ها به طور هم زمان در یک نمودار نمایش داده شده اند. همان طور که مشخص است، نمونه ها رفتار مشابهی از خود در طول روند تغییر شکل از ناحیه ی الاستیک تا شکست نشان می دهند، اما تفاوت نقاط شکست و میزان جابه جایی به خواص ناهمسان گرد چوب نسبت داده می شود.

نمودار نیرو- جابه جایی را می توان به دو ناحیه ی مجزا تقسیم کرد: **ناحیه ی اول:** این ناحیه تغییر شکل الاستیک نمونه را توجیه می کند. همان طور که در شکل دیده می شود، قطعات در این ناحیه رفتار خطی و الاستیک از خود نشان می دهند. نیرو به صورت خطی افزایش می یابد و وقتی به مقدار ماکزیمم می رسد، شکست هسته ی چوب بر اثر نیروهای برشی ناشی از تنش فشاری رخ می دهد. پس از آن، نیرو به طور ناگهانی کاهش می یابد و از باربرداری تیر به شکل قابل توجهی کاسته می شود.

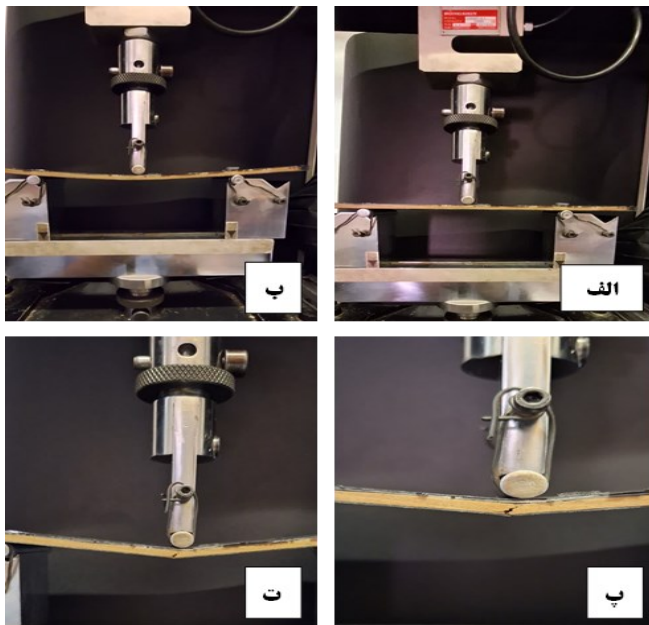
ناحیه ی دوم: در این ناحیه، نیرو تقریباً ثابت باقی می ماند و رویه های زیرین تحت کشش قرار می گیرند و در نهایت کل قطعه تخریب می شود.



شکل 2 نمودار نیرو - جابجایی نمونه ی شماره ۳

Figure 2 Force-displacement diagram of sample number 3

در مرحله‌ی بعد، به دلیل ترد بودن هسته‌ی چوبی، شکست در هسته ایجاد می‌شود که در شکل ۴-ج نمایش داده شده است. در ادامه، با شکسته شدن هسته، نیروی وارده به پوسته‌های زیرین منتقل می‌شود و بر اثر کشش، لایه‌های زیرین دچار شکست می‌شوند. این مرحله در شکل ۴-د نشان داده شده است.



شکل 4 مراحل شکست در نمونه‌های ۳ و ۴

Figure 4 Failure stages in samples 3 and 4

۳-۴- نتایج آزمون خمش برای نمونه‌ی ترموست

آزمون خمش سه‌نقطه برای نمونه‌ی شماره‌ی ۵ (SP-5-5) که با مواد ترموست ساخته شده، انجام شد. نمودارهای نیرو-جابجایی به‌دست‌آمده برای طول دهانه‌ی ۱۵۰ میلی‌متر با دو بار تکرار انجام گرفت. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نوع پاسخ مکانیکی قطعات در حین آزمون خمش سه‌نقطه مشابه یکدیگر است و تفاوت آن‌ها عمدتاً در میزان باربرداری است.

نمودار ۵ شامل سه ناحیه است:

ناحیه‌ی اول: مربوط به کماتش ساندویچ پنل و تغییر شکل الاستیک قطعه است که با رفتار خطی در نمودار نشان داده شده است.

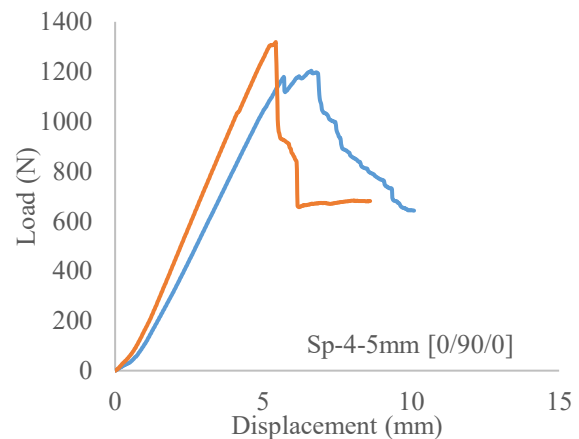
ناحیه‌ی دوم: پس از کامل شدن تغییر شکل الاستیک نمونه و همراه با جدا شدن رویه در اطراف پین بالایی و ایجاد شکست در رویه‌های بالایی رخ می‌دهد. با اعمال نیرو بر قطعه، بار از رویه به هسته منتقل می‌شود و شکست در هسته ایجاد می‌گردد. همان‌طور که در نمودارها مشخص است، شیب ناحیه‌ی پلاستیک کمتر از ناحیه‌ی الاستیک است.

برخلاف نمودار ۲، نمودار ۳ شامل سه ناحیه است:
ناحیه‌ی اول: مشابه نمودار قبلی، این ناحیه مربوط به ناحیه‌ی الاستیک است و شیب نیرو به‌صورت خطی افزایش می‌یابد و تفاوت چندانی با ناحیه‌ی اول در نمودار قبلی ندارد. نیرو به‌صورت افزایشی بوده تا اولین شکست بر اثر فشار وارد بر رویه‌ها رخ دهد و پس از آن نیرو کاهش می‌یابد.

ناحیه‌ی دوم: در این ناحیه نمونه دچار تغییر شکل پلاستیکی می‌شود. پس از کاهش نیرو به دلیل شکست در ناحیه‌ی الاستیک، بر اثر تغییر شکل پلاستیک، نیرو مجدداً افزایش می‌یابد اما با شیب کم‌تری نسبت به ناحیه‌ی اول، تا زمانی که ترک‌های اولیه در هسته ایجاد شده و نیرو مجدداً کاهش یابد.

ناحیه‌ی سوم: این ناحیه پس از شکست هسته شکل می‌گیرد. پس از خرابی رویه‌ی بالایی و هسته، نیروهای کششی به رویه‌ی زیرین وارد می‌شوند. رویه‌ها در برابر کشش کمی مقاوم‌تر هستند، بنابراین نیرو تقریباً ثابت باقی می‌ماند تا در نهایت قطعه به‌طور کامل تخریب شود و تغییر شکل قابل‌توجهی در نمودار ایجاد نگردد.

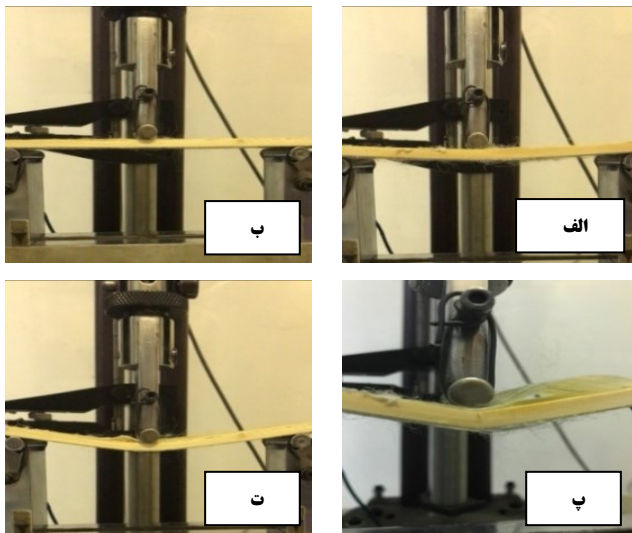
مدل رفتار و پاسخ قطعات در نمونه‌های SP-3-5 و SP-4-5 ترموپلاستیک مشابه یکدیگر بوده و قابل‌توجه است که اثر لایه چینی‌ها به‌وضوح در افزایش میزان تحمل بار در نمودارها مشاهده می‌شود. شکست در شکل ۲ و شکل ۳ با توجه در هسته رخ می‌دهد. تفاوت در نمونه شکل ۳ این است که شکست تدریجی است چرا که لایه‌های پوسته یک لایه صفر درجه اضافه شده است در حالیکه در شکل ۲ زاویه مجاور چوب ۹۰ درجه است و در اثر تنش کششی و فشاری عمود بر الیاف قرار گرفته است.



شکل 3 نمودار نیرو - جابجایی نمونه‌ی شماره ۴

Figure 3 Force-displacement diagram of sample number 4

شکل ۴ مراحل شکست در نمونه‌های ترموپلاستیک ۳ و ۴ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصاویر مشخص است، پس از قرار گرفتن قطعه درون دستگاه و ثابت شدن فک‌ها، فرآیند آزمون خمش سه‌نقطه آغاز می‌شود. در ابتدا، قطعه بدون هیچ ترک یا شکستی در ناحیه‌ی الاستیک شروع به خمش می‌کند.



شکل 6 مراحل شکست در نمونه‌ی شماره ۵

Figure 6 Failure stages in sample number 5

۴-۴- مقایسه‌ی شاخص‌های جرم، استحکام و جذب انرژی نمونه‌ی ترموپلاستیک و ترموست

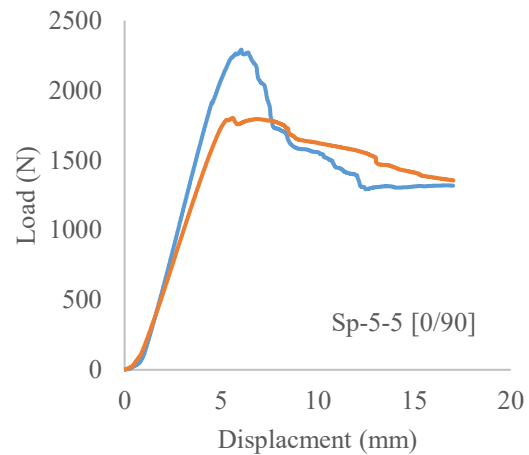
در شکل ۷، تصاویر تمام نمودارهای مربوط به آزمون نیرو-جابجایی برای قطعات شماره‌ی ۳، ۴ و ۵ به‌طور هم‌زمان آورده شده است. همان‌طور که در نمودارها به‌وضوح مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد لایه‌ها، میزان بارگذاری به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. هم‌چنین، افزایش لایه‌ها منجر به ایجاد ناحیه‌ی پلاستیک در قطعات شده است که در نمونه‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل مشخص است، نمونه‌ی شیشه/اپوکسی ترموست از خواص مکانیکی بالاتری نسبت به نمونه‌ی ترموپلاستیک شیشه/پلی‌آمید ۶ برخوردار است. دو عامل اصلی این تفاوت عبارت‌اند از: اول، خواص ترموست‌ها و دوم، ضخامت بیش‌تر رویه‌ها در نمونه‌ی ترموست.

جدول ۴ میانگین شاخص‌های جرم، استحکام و جذب انرژی پنل‌های ساندویچی در آزمون خمش سه‌نقطه برای نمونه‌های ذکر شده و هم‌چنین برخی از نمونه‌های مربوط به پژوهش‌های پیشین را ارائه می‌کند.

۴-۴-۱- مقایسه‌ی شاخص استحکام به وزن

یکی از معیارهای مهم در طراحی‌های مهندسی، وزن سازه‌ها است. ساندویچ پنل ترموپلاستیک شماره‌ی ۳ نسبت به جرم خود قادر به تحمل $5/1496$ نیوتن بار است. این نسبت برای پنل شماره‌ی ۴ برابر با $4/1682$ نیوتن است که $1/12$ برابر بیش‌تر از نمونه‌ی شماره‌ی ۳ است. در نمونه‌ی شماره‌ی ۵، نسبت تحمل بار به جرم برابر با $2/2275$ نیوتن است که نسبت به نمونه‌ی شماره‌ی ۳، $1/5$ برابر و نسبت به نمونه‌ی شماره‌ی ۴، $1/3$ برابر افزایش یافته است.

ناحیه‌ی سوم: در این ناحیه، نیروهای وارد بر قطعه تقریباً ثابت باقی می‌مانند و ترک‌های ایجادشده در سراسر نمونه منتشر می‌شوند و منجر به تخریب کلی نمونه می‌گردند. برای تحلیل اطلاعات به‌دست‌آمده، از مقدار میانگین داده‌ها انحراف معیار محاسبه شد و با توجه به میزان پراکندگی داده‌ها، نتایج در محدوده‌ی قابل‌قبول واقع شدند.

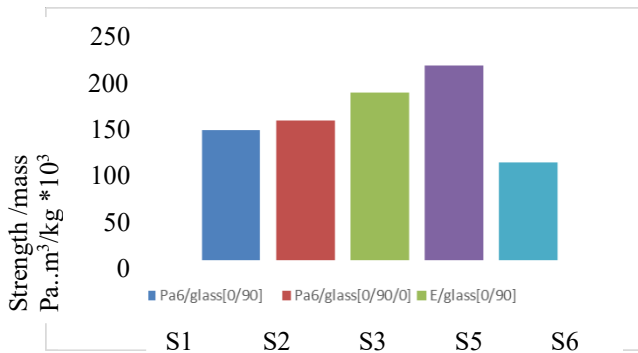


شکل 5 نمودار نیرو - جابجایی برای نمونه‌ی ترموست

Figure 5 Force-displacement diagram for the thermoset sample

بر اساس شکل ۶ که مراحل و نحوه‌ی شکست یک ساندویچ پنل ترموست را نشان می‌دهد، سه ناحیه‌ی ذکر شده برای نمودار ۵ به‌وضوح قابل‌مشاهده هستند. در مرحله‌ی اول، پس از قرارگیری قطعه بین فک‌های دستگاه و اعمال بار، قطعه در ناحیه‌ی الاستیک قرار می‌گیرد که در شکل ۶-الف نمایش داده شده است. سپس، با بلند شدن رویه در اطراف پین و ایجاد شکست در محل پین روی رویه‌ها مواجه می‌شویم و در ادامه، این شکست به هسته‌ی چوبی نیز منتقل می‌شود، همان‌طور که در شکل‌های ۶-ب و ۶-ج نشان داده شده است.

یکی از دلایل تفاوت رفتار شکست ساندویچ پنل با رویه‌های ترموپلاستیک مانند شکل ۴ و ساندویچ پنل با رویه ترموست چسبندگی رویه‌ها به هسته چوبی می‌باشد. این موضوع البته نیاز به بررسی بیشتر دارد چون از طرفی فشار اعمالی پرس در تولید ساندویچ پنل ترموپلاست حدود $0/78$ بار ولی فشار خلا در تولید ترموست کمی بیشتر تا $0/9$ بار است و خود پژوهشی بسیار مفید خواهد بود که در کارهای آینده پرداخته می‌شود. یک دلیل دیگر این است که ترموست‌ها رفتار ترد دارند و لی ترموپلاست‌ها کمی نرم‌تر هستند.

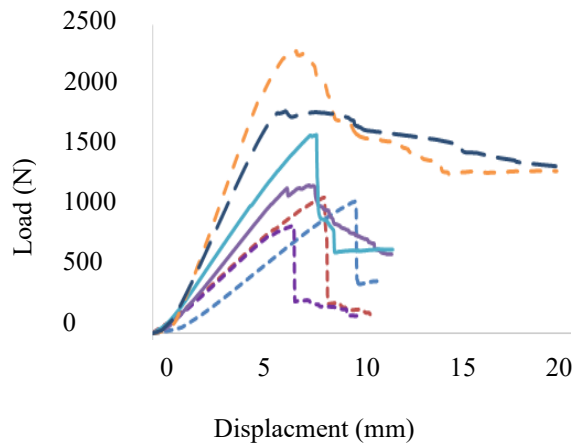


شکل ۹ نمودار مقایسه‌ی استحکام به وزن پنج نمونه ساندویچ پانل
Figure 9 Strength-to-mass comparison chart

نتایج برخی از مراجع به دلیل گزارش نکردن شرایط آزمون، مطابق با شرایط استاندارد فرض شده است و اعتبار این مقایسه در شکل ۴ با فرض یکسان بودن ابعاد نمونه‌ها و شرایط بارگذاری می‌باشد. با این حال، مقایسه‌ی صرف تحمل نیرو ممکن است معیار مناسبی برای طراحی‌های مهندسی نباشد. شاخص مهم‌تر و حیاتی‌تر در بررسی خواص ساندویچ پنل‌ها، نسبت استحکام به وزن سازه است که نشان‌دهنده‌ی توانایی یک ماده در تحمل بار نسبت به وزن آن است. با توجه به حساسیت استحکام و وزن پایین، به‌ویژه در سازه‌های فضایی، این شاخص از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در میان سه نمونه، نمونه‌ی ترموست از استحکام به وزن بالاتری نسبت به نمونه‌های ترموپلاستیک برخوردار است و نمونه‌ی کربن/اپوکسی با هسته‌ی آلومینیوم بالاترین میزان استحکام به وزن را دارد؛ این امر با توجه به ابعاد (۱۲/۳ × ۲۰۰ × ۳۰۰ میلی‌متر)، وزن (۲۳۴ گرم) و خواص ویژه‌ی کربن تقویت‌شده با الیاف شیشه و استحکام بسیار بالای آلومینیوم قابل توجیه است. نمودار میله‌ای مقایسه‌ی استحکام به وزن در شکل ۹ ارائه شده است.

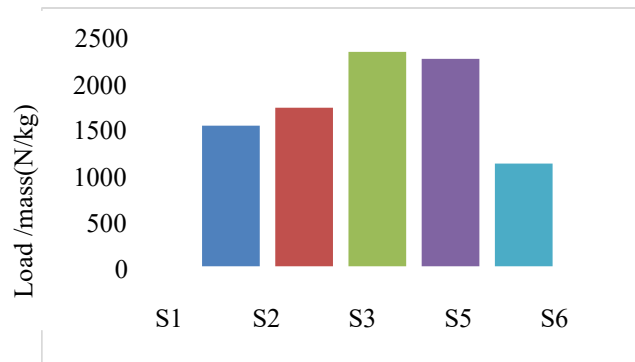
۴-۴-۲- مقایسه‌ی جذب انرژی ویژه

یکی از مهم‌ترین خاصیت‌هایی که محققان در ارتباط با سازه‌های ساندویچی مورد مطالعه خود قرار می‌دهند، جذب انرژی ویژه است. این شاخص نشان‌دهنده‌ی میزان انرژی‌ای است که یک سازه می‌تواند تا پیش از شکست خود جذب نماید. انرژی ویژه بیانگر مقاومت یک ماده در برابر نیروهای ناگهانی و ضربه‌ای است. شاخص جذب انرژی ویژه که نمودار آن در شکل ۱۱ آمده است در آزمون خمش سه نقطه، مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی تا نقطه‌ی شکست تقسیم بر وزن سازه است.



شکل ۷ نمودار مقایسه‌ای نیرو - جابجایی همه‌ی نمونه‌ها
Figure 7 Force-displacement comparison diagram of all samples

هم‌چنین، این نسبت‌ها با نتایج پژوهش‌های انجام‌شده بر روی دو نوع ساندویچ پنل اپوکسی/کربن با هسته‌ی لانه‌زنبوری آلومینیوم و اپوکسی/شیشه با هسته‌ی لانه‌زنبوری آلومینیوم نیز مقایسه شده‌اند. نمودار میله‌ای این مقایسه در شکل ۸ ارائه شده است. داده‌های مربوط به نیروی حداکثر به وزن در نمونه‌های با رویه ترموپلاستیک مانند شکل ۸ مقدار افزایش بیشتری برای نمونه با ضخامت پوسته نشان می‌دهد در حالیکه در شکل ۹ افزایش استحکام به وزن گرچه دوباره مشاهده می‌شود ولی مقدار افزایش آن کمتر است که با توجه به رابطه ۲ بدست آمده است.



شکل ۸ نمودار نسبت نیروی تحمل شده به جرم
Figure 8 Force-to-mass ratio diagram

جدول ۰ مقایسه‌ی شاخص‌های در ساندویچ پنل‌ها

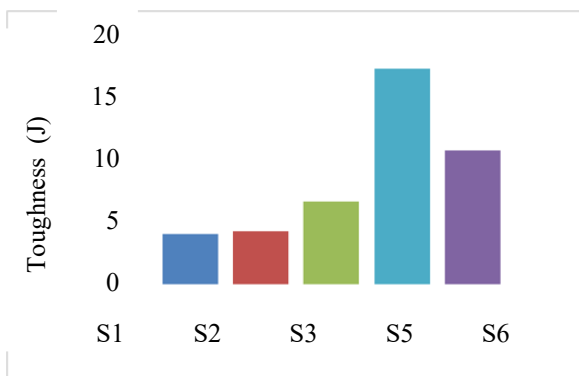
Table 4 Comparison of indicators in sandwich panels

Sandwich panel						
Properties	PA6/Glass-wood [0,90/1]	PA6/Glass-wood [0,90/01]	E/Glass-wood [0,90/1]	E/Glass-PVC [۱۱]Halimi et al.	E/carbon-Al [۱۸] Azar afza et al.	E/Glass-Al [۱۸] Azar afza et al.
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Mass* (gr)	68	75	90	80	234	26
Max force over mass** (N/kg)	145	168	222	152	220	109
Bending strength (MPa)	53	61	42	20	138	61
Strength over mass (Pa.m ³ /kg) * ۱۰ ^۳	140	150	180	---	210	105
Toughness (J) s	3.6	3.8	5.9	3.8	15.4	9.6
Toughness over (J/kg)mass	52	51	64	---	66	37

* درصد انحراف معیار در اندازه گیر یجرم قطعات کمتر از یک درصد می باشد

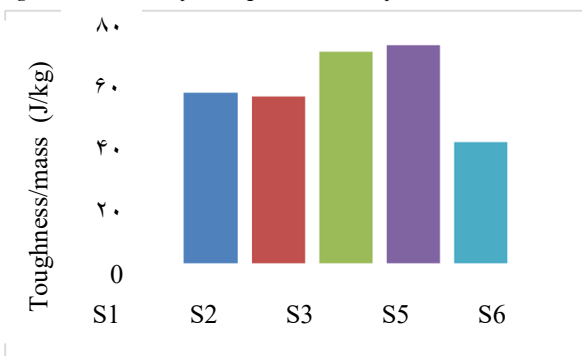
** در صد انحراف از معیار حداکثر نیرو حدود ± ده درصد است.

در سه نمونه‌ی آزمایش شده در پژوهش، نمونه‌ی شماره ۵ بیشترین جذب انرژی را نسبت به دو نمونه‌ی دیگر (۱/۶ برابر نسبت به نمونه‌ی شماره ۳ و ۱/۵ برابر، بیشترین نسبت به نمونه‌ی شماره ۴) داشت و پنل کربن/ اپوکسی با هسته‌ی آلومینیومی در مقایسه با پژوهش‌های گذشته، میزان انرژی ویژه‌ای در حد ۲/۶ بیش‌تر از نمونه‌ی ترموست با هسته‌ی چوب، جذب کرده است. معیار شکست با استفاده از نمودار نیرو جابجایی انتخاب شده است و با توجه به رفتار دیده شده از حداکثر نیرو به عنوان نقطه شکست استفاده شد. البته پوسته چون ترموپلاستیک است بعد از منطقه کشسان از خط صاف به منحنی گرایش دارد.



شکل 10 نمودار جذب انرژی ساندویچ پنل‌ها

Figure 10 Energy absorption diagram of sandwich panels



شکل 11 نمودار انرژی ویژه تا اولین نقطه‌ی واماندگی

Figure 11 Specific energy diagram up to the first stagnation point

۴-۵- بررسی حالت‌های خرابی ساندویچ پنل

برای تعیین خواص خمشی و برشی نهایی تیرهای ساندویچی، آزمایش خمش سه نقطه‌ای یکنواخت با شرایط یکسان بر روی نمونه‌ها انجام شد. بر اساس تصاویر دریافتی، دو حالت شکست عمده شناسایی شد: شکست فشاری در پوسته‌ی بالایی و شکست برشی در هسته.

در نمونه‌ی شماره ۳ با ترتیب لایه‌چینی (۹۰/۰)، هسته پس از اعمال نیرو، بدون ایجاد شکست در رویه، دچار خرابی می‌شود و در نهایت کل هسته تخریب می‌گردد. در نمونه‌ی شماره ۴، پس از

- نتایج آزمون خمش نشان داد نمونه‌ی ترموست (شماره‌ی ۵) به دلیل استحکام بیش‌تر، انرژی بالاتری نسبت به نمونه‌های ترموپلاستیک جذب کرده است و انرژی جذب ویژه در این نمونه نسبت به نمونه‌های شماره‌ی ۳ و ۴ به ترتیب ۱۹ و ۲۰ درصد افزایش داشته است.
- بررسی حالت‌های شکست در نمونه‌ها نشان داد نوع شکست اولیه در ترموست‌ها همراه با چروکیدگی رویه و ایجاد ترک در بخش فوقانی هسته است. درحالی‌که در ترموپلاستیک‌ها، شکست ابتدا در رویه ایجاد شده و بدون چروکیدگی بوده است و سپس ترک در هسته شکل می‌گیرد و در بخش پایینی هسته گسترش می‌یابد.
- با توجه به افزایش چشم‌گیر خواص ساندویچ پنل با هسته‌ی چوب نسبت به خود چوب، این سازه‌ها گزینه‌ی مناسبی برای کف اتوبوس و قطار، خانه‌های همراه، کاروان‌ها و سایر موارد مشابه می‌باشند.
- برای کاربردهای صنعتی باید علاوه بر در نظر گرفتن محدودیت‌ها در فرآیند ساخت و همچنین بررسی رفتار ساندویچ پانل با پوسته ترموپلاست و هسته چوبی بر اثر براهای دینامیکی و بررسی خستگی و مقاومت به دما بالا و اشتعال و دیگر موارد ویژه کاربرد صنایع ساختمانی، خودروسازی و سازه‌های سبک است.

پژوهش‌های فرارو:

- یکی از مباحث بسیار مهم برای پژوهش‌های آینده در باره چسبندگی پوسته ترموپلاست به هسته چوبی است و در نظر گرفتن مکانیزم این اتصال با بررسی تصاویر بزرگنمایی شده و اثر آن در عملکرد و مودهای شکست در خمش است.
 - علاوه بر این بحث‌های کاربردی نیاز به پژوهش درباره مدول‌های خمشی معادل سازه ساندویچی یاد شده و سهم پوسته و هسته در تحمل گشتاور خمشی است.
 - برای آینده این پژوهش رفتارهای خستگی یا آتش‌گیر و مقاومت به دماهای بالا در نظر گرفته شده است همچنین بررسی‌های عددی در تحلیلی رفتار ساندویچ پانل با پوسته ترموپلاست و هسته چوبی نیز در نظر است انجام شوند.
- تأییدیه‌ی اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه‌ی ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.
- تعارض منافع:** در این مقاله از برخی نتایج حاصل از پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد نویسنده‌ی اول [24] استفاده شده است. هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.

اعمال نیرو، اولین خرابی رخ داده مربوط به شکست در رویه‌ی بالایی است و پس از آن، شکست در هسته اتفاق می‌افتد. نکته‌ی قابل‌توجه در نمونه‌های ترموپلاستیک این است که شکست در مقطع پایینی هسته ایجاد می‌شود، که کاملاً برعکس رفتار مشاهده شده در نمونه‌های ترموست است.

در نمونه‌ی شماره‌ی ۵ ترموست، با اعمال فشار، رویه‌ی بالایی در نزدیکی پین دستگاه جدا شده و دچار چروکیدگی می‌شود؛ همچنین، پس از آن، بر اثر نیروی فشاری، رویه دچار شکست می‌گردد. با توجه به استحکام بالاتر ترموست‌ها، پایداری پوسته‌های ترموست تحت فشار نسبت به نمونه‌های ترموپلاستیک بهتر بود.

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی خواص مکانیکی ساندویچ پنل‌های زیستی مبتنی بر هسته‌ی چوب و رویه‌های ترموپلاستیک و ترموست تقویت‌شده با الیاف شیشه پرداخته است. فرآیند ساخت نمونه‌های ترموپلاستیک از طریق پرس گرم تحت شرایط دمایی و زمانی مشخص انجام شد، درحالی‌که نمونه‌های ترموست به روش کیسه‌ای، خلأ ساخته شدند. سپس با انجام آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای، خواص مکانیکی هر ساندویچ پنل استخراج گردید و با محاسبه‌ی کمی داده‌ها، شاخص‌های استحکام به وزن و انرژی جذب آن‌ها تعیین شد و در نهایت با پژوهش‌های دیگر در حوزه‌ی ساندویچ پنل‌ها مقایسه شد.

بر اساس تحلیل داده‌های حاصل از فرآیند ساخت و آزمایش‌های تجربی، یافته‌های کلیدی زیر به دست آمده آمد:

- در فرآیند پرس گرم، هرچند سرعت ساخت بالا بود، اما هسته‌ی چوبی به دلیل قرارگیری در معرض حرارت، تغییراتی در خواص خود تجربه می‌کند.
- استفاده از روش‌های ساخت، هم باعث بهبود کیفیت و هم کاهش آسیب در فرآیند پرس گرم شد. به طوری‌که با استفاده از ورق کپتون و قرار دادن قالب درون آن قبل از پرس گرم، هسته بدون سوختگی حفظ شد.
- افزایش تعداد لایه‌ها و ضخامت در نمونه‌های ترموپلاستیک منجر به بهبود حداکثر نیروی وارد شده و خواص مکانیکی ساندویچ پنل‌ها شد. نمونه‌ی ترموست شماره‌ی ۵ نسبت به نمونه‌های ترموپلاستیک ۳ و ۴ به ترتیب ۳۴ و ۲۶ درصد نیروی بیش‌تری را تحمل کرد.
- مقاومت و خواص مکانیکی نمونه‌های ترموست برتری قابل‌توجهی نسبت به نمونه‌های ترموپلاستیک داشت. در نمونه‌ی ترموست، استحکام خمشی به میزان ۲۰ درصد نسبت به نمونه‌ی ترموپلاستیک شماره‌ی ۳ و ۶ درصد نسبت به نمونه‌ی شماره‌ی ۴ افزایش یافت. همچنین، استحکام به وزن به ترتیب ۲۲ و ۱۷ درصد افزایش پیدا کرد.

- [15] Ozdemir O, Oztoprak N, Kandas H. *Single and repeated impact behaviors of bio-sandwich structures consisting of thermoplastic face sheets and different balsa core thicknesses*. Composites Part B: Engineering. 2018;149:49–57, doi:10.1016/j.compositesb.2018.05.016.
- [16] Nikforooz M, Golzar M, Shokrieh MM, Montesano J. *Processability and tensile performance of continuous glass fiber/polyamide laminates for structural load-bearing applications*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2018;105:156–164, doi:10.1016/j.compositesa.2017.11.010.
- [17] Labans E, Kalnins K, Bisagni C. *Flexural behavior of sandwich panels with cellular wood, plywood stiffener/foam and thermoplastic composite core*. Journal of Sandwich Structures & Materials. 2019;21(2):784–805, doi: 10.1177/1099636217699587.
- [18] Azarafza R, Davar A, Veisi A. *Experimental three-point bending test of composite sandwich panels with honeycomb core*. In: *Proceedings of the 29th Annual International Conference of the Iranian Society of Mechanical Engineers (ISME) and the 8th Thermal Power Plants Industry Conference; 2021; Tehran, Iran*. Tehran: Iranian Society of Mechanical Engineers; 2021. [In Persian]
- [19] Harizi W, Fazzini M, Guillaumat L, Assarar M. *Mechanical behavior of carbon-reinforced thermoplastic sandwich composites with several core types during three-point bending tests*. Composite Structures. 2021;262:113590, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113590.
- [20] Manouchehri A. *Experimental and numerical study of energy absorption in non-metallic honeycomb-core composite sandwich panels under low-velocity impact* [master's thesis]. Tehran, Iran: Tarbiat Modares University; 2021. [In Persian]
- [21] Xia F, Zhu J, Zhang T, Liu Y. *Three-point bending performance of sandwich panels with various types of cores*. Thin-Walled Structures. 2022;179:109723, doi: 10.1016/j.tws.2022.109723.
- [22] Yan Z, Zhang L, Lin Y, Zhang H, Zhao Y. *Compressive performance of full-scale GFRP composite sandwich wall panels with wood core*. Journal of Building Engineering. 2022;86:108979, doi: 10.1016/j.job.2024.108979.
- [23] Gibson LJ, Ashby MF, Harley BA. *Cellular materials in nature and medicine*. Cambridge University Press; 2010, www.cambridge.org/9780521195447.
- [24] Allen HG. *Analysis and design of structural sandwich panels: The Commonwealth and International Library, Structures and Solid Body Mechanics Division*. Elsevier; 2013.
- [25] Babaei M, *Mechanical behaviour of unidirectional thermoplastic composite and wooden core sandwich panel*, MSc Thesis, Tarbiat modares university, 2025
- [1] Bitzer T. Honeycomb core. In: *Honeycomb technology: Materials, design, manufacturing, applications and testing*. Springer; 1997. p.10–42, doi: 10.1007/978-94-011-5856-5.
- [2] Nayak GS, Palkowski H, Carradò A. *Precepts for designing sandwich materials*. Journal of Experimental and Theoretical Analyses. 2024;2(1):31–45, doi: 10.3390/jeta2010003.
- [3] Markab ASM, Esmaeili MM. *Training course on the fabrication of composites, fiberglass, and carbon composites*. Tehran: Tarah Publications; 2002. [In Persian]
- [4] Engin M. *Characteristics of innovative 3-D FRP sandwich panels [dissertation]*. Raleigh, NC, USA: North Carolina State University; 2005.
- [5] Mazumdar S. *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. CRC Press; 2001, doi: 10.1201/9781420041989.
- [6] Ashby MF. *Metal foams: a design guide*. Elsevier; 2000.
- [7] Petras A, Sutcliffe M. *Failure mode maps for honeycomb sandwich panels*. Composite Structures. 1999;44(4):237–252, doi: 10.1016/S0263-8223(98)00123-8.
- [8] Evans TH. *Design of composite sandwich panels for lightweight applications in heavy vehicle systems* [master's thesis]. 2006, .
- [9] Hajji M. *Experimental investigation of delamination phenomenon in glass/polyester, glass/epoxy, and sandwich composites using acoustic emission* [master's thesis]. Tehran, Iran: Amirkabir University of Technology; 2010. [In Persian]
- [10] Ning H, Pillay S, Vaidya UK. *Thermoplastic sandwich structure design and manufacturing for the body panel of mass transit vehicle*. Composite Structures. 2007;80(1):82–91, doi: 10.1016/j.compstruct.2006.04.090.
- [11] Halimi F, Golzar M, Asadi P, Beheshty MH. *Core modifications of sandwich panels fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding*. Journal of composite materials 47 (15), 1853-1863, doi: 10.1177/0021998312451763.
- [12] Hemanth G, Ramya M, Padmanabhan K. *Flexural behaviour of sandwich composite panels fabricated through different vacuum bagging techniques*. Journal of Materials Science and Surface Engineering. 2015;3(4):293–297, doi: 10.jmsse/2348-8956/3-4.3
- [13] Grünwald J, Parlevliet P, Altstädt V. *Manufacturing of thermoplastic composite sandwich structures: A review of literature*. Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2017;30(4):437–464, doi: 10.1177/0892705715604681.
- [14] Xu Gd, Zhang W, Li J, Liu T, Zhou G. *Bending behavior of graded corrugated truss core composite sandwich beams*. Composite Structures. 2016;138:342–351, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.11.057.