



## بررسی آزمایشگاهی رفتار خمشی سازه ساندویچی با رویه کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله کربنی و هسته هیبریدی پلیمری

علی بن سعید<sup>1</sup>، سید علی موسوی<sup>1</sup>، حسن شکراللهی<sup>2\*</sup>، هادی صبوری<sup>2</sup>

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران

2- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران

\* [hshokrollahi@khu.ac.ir](mailto:hshokrollahi@khu.ac.ir)، 15719-14911، صندوق پستی

اطلاعات مقاله:	چکیده
دریافت: 1404/07/09	امروزه استفاده از سازه‌های کامپوزیتی در صنایع هوافضا، خودروسازی و ساختمان‌سازی به‌طور چشمگیری گسترش یافته و توسعه ساندویچ پنل‌های جدید با کاربردهای متنوع سرعت گرفته است. در این پژوهش، پنل ساندویچی سبک با رویه کامپوزیتی الیاف شیشه تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی با 0.3 درصد وزنی نسبت به رزین و هسته هیبریدی بر پایه فوم‌های XPS و PU طراحی و ساخته شد. برای ارتقای انتقال بار و پایداری برشی هسته، از میلگردهای GFRP به‌عنوان تقویت‌کننده داخلی استفاده شده‌است. فرآیند ساخت شامل مخلوط کردن نانولوله در رزین، لایه‌چینی دستی و پرس سرد می‌باشد. هسته‌ها با ترتیب‌های مختلف و توسط چسب PVA به رویه‌ها متصل شدند. آزمون خمش سه‌نقطه مطابق استاندارد ASTM C393 انجام گرفت و بار بیشینه، سختی اولیه، جابجایی شکست، انرژی کل و انرژی ویژه (SEA) استخراج شد. نتایج نشان داد افزودن نانولوله‌ها با بهبود چسبندگی و افزایش مدول مؤثر، سختی، بار بیشینه و سهم انرژی پلاستیک را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد. در برخی ترکیب‌های حاوی نانولوله، بار بیشینه به 700-1000 نیوتن، انرژی جذب به بیش از 20 ژول و جابجایی شکست به حدود 50 میلی‌متر رسید. مقایسه هسته‌های یکنواخت نشان داد هسته XPS سختی بالاتری دارد، درحالی‌که PU شکل‌پذیری بیشتری ایجاد می‌کند. در هسته‌های هیبریدی، XPX به‌دلیل حضور XPS در بیرون، سختی و SEA بالاتری داشت، درحالی‌که PXP با PU در لایه خارجی، انرژی کل و جابجایی شکست بیشتری نشان داد. در مجموع، ترکیب بهینه هسته و رویه‌های تقویت‌شده با نانولوله می‌تواند هم‌زمان مقاومت خمشی، جذب انرژی و شکل‌پذیری را ارتقا داده و مسیری ساده و مقیاس‌پذیر برای تولید پنل‌های سبک ارائه کند.
پذیرش: 1404/08/26	
کلیدواژگان	
ساندویچ پنل	
نانو لوله کربنی	
هسته هیبریدی	
پلاستیک تقویت شده با الیاف شیشه	

## Experimental investigation of the flexural behavior of sandwich structures with carbon nanotube-reinforced composite faces and polymeric hybrid core

Ali Bensaheed<sup>1</sup>, Seyed Ali Mousavi<sup>1</sup>, Hassan Shokrollahi\*<sup>1</sup>, Hadi Sabouri<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Kharazmi University, Tehran

\* P.O.B 14911-15719, Tehran, Iran, [hshokrollahi@khu.ac.ir](mailto:hshokrollahi@khu.ac.ir)

### Keywords

Sandwich Panels,  
 CNTs,  
 Hybrid Core,  
 GFRP

### Abstract

The application of composite structures has rapidly expanded in aerospace, automotive, and construction industries, accelerating the development of advanced sandwich panels with diverse applications. In this study, a lightweight sandwich panel was designed and fabricated, consisting of glass fiber-reinforced composite faces reinforced with 0.3 wt% carbon nanotubes and a hybrid polymeric core based on XPS and PU foams. To enhance load transfer and core shear stability, internal GFRP rods were employed as reinforcements. The fabrication process included CNT dispersion in resin, hand lay-up, and cold pressing. The cores were assembled in different sequences and bonded to the facesheets using PVA adhesive. Three-point bending tests were performed in accordance with ASTM C393, and parameters such as peak load, initial stiffness, failure displacement, total absorbed energy, and specific energy absorption (SEA) were evaluated. Results demonstrated that CNT incorporation significantly improved interfacial adhesion and effective modulus, leading to increased stiffness, peak load, and energy contribution. In CNT-containing configurations, peak load reached 700–1000 N, absorbed energy exceeded 20 J, and failure displacement was approximately 50 mm. Comparison of uniform cores revealed that XPS provided higher stiffness, while PU offered greater ductility and final displacement. In hybrid cores, the XPX arrangement (XPS in outer layers) achieved higher stiffness and SEA, whereas the PXP configuration (PU in outer layers) resulted in greater total energy absorption and failure displacement. Overall, optimizing core architecture combined with CNT-reinforced facesheets can simultaneously enhance flexural strength, energy absorption, and ductility, providing a simple and scalable pathway for producing lightweight panels.

Please cite this article using:

Bensaheed, A., Mousavi, S. A., Shokrollahi, H., Sabouri, H., "Experimental investigation of the flexural behavior of sandwich structures with carbon nanotube-reinforced composite faces and polymeric hybrid core," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 12, No. 2, pp. 2751-2760, 2025. <https://doi.org/10.22068/jstc.2025.2073291.1937>

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

## 1- مقدمه

در دهه اخیر، استفاده از سازه‌های ساندویچی با هسته هیبریدی و رویه‌های تقویت شده با نانومواد مانند نانولوله‌های کربنی به دلیل نسبت بالای سفتی به وزن و عملکرد مکانیکی مطلوب، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. این ترکیبات با بهبود خواص مکانیکی عملکرد سازه را تقویت می‌کند همچنین استفاده از هسته‌های ترکیبی شامل فوم‌ها با جنس‌های متفاوت و استفاده از تقویت کننده‌ها، قابلیت ارتقاء مقاومت مکانیکی بدون پیچیدگی تولید فراهم می‌کند و وزن سازه نیز به صورت چشمگیر افزایش نمی‌یابد.

با توجه به اهمیت سازه‌های ساندویچی در کاربردهای مهندسی، مهندسين در مطالعات متعددی به بررسی پارامترهای مؤثر بر خواص مکانیکی آن‌ها پرداخته‌اند. مرور این تحقیقات نشان می‌دهد که تغییر در ساختار هسته، جنس رویه‌ها و شرایط بارگذاری، نقش قابل توجهی در بهبود عملکرد دارد. در ادامه به برخی از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه اشاره شده است. چودھاری و همکاران [1] در پژوهشی به بررسی رفتار خمشی صفحات ساندویچی کامپوزیتی پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه<sup>1</sup> با هسته لانه‌زنبوری و رویه تقویت شده با نانولوله‌های کربنی چنددیواره<sup>2</sup> پرداختند. در این مطالعه، تحلیل خمشی بر پایه تئوری تغییرشکل برشی مرتبه بالا و با استفاده از فرمول بندی اجزای محدود انجام شد و اثر درصد وزنی MWCNT در هسته و لایه‌های بالایی و زیرین تحت شرایط مرزی و پیکربندی‌های لایه‌چینی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی، میزان خمش کاهش یافته و در نتیجه سختی خمشی افزایش می‌یابد. در میان شرایط مرزی، حالت گیردار چهار طرفه کمترین خمش و حالت گیردار-آزاد-آزاد-آزاد (C-F-F-F) بیشترین خمش را ایجاد کرده است. همچنین مشخص شد که حضور MWCNT در لایه‌های رویی و زیرین سهم بیشتری در افزایش سختی نسبت به افزودن آن در هسته دارد. به طور کلی، صفحات ساندویچی حاوی MWCNT تقریباً دو برابر کمتر از نمونه‌های بدون این نانوفیلر دچار خمش شدند که این امر افزایش چشمگیر سختی ناشی از حضور نانولوله‌های کربنی است. ما و همکاران [2] در یک مقاله مروری به بررسی روندهای نوین طراحی هسته و پاسخ ضربه‌ای پنل‌های ساندویچی پرداختند. این مرور سه دسته اصلی هسته شامل فوم، هسته‌های تناوبی دو بعدی و سه بعدی را معرفی کرده و نقش کلیدی هندسه هسته در عملکرد مکانیکی سازه را مشخص می‌کند. نویسندگان با مرور مطالعات، اثر بارگذاری‌های مختلف نظیر فشار، ضربه پرتابه‌ای و خمش سه نقطه‌ای را بر سازه‌های ساندویچی بررسی کرده‌اند و انواع مودهای شکست متداول مانند کماتش، جدایی لایه‌ها، لهیدگی یا ترک هسته و جدایش هسته رویه را توضیح داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد طراحی‌های نوین مانند هسته‌های آگزتیک، ساختارهای الهام گرفته از طبیعت (مانند ساختار لاک‌پشت و بال پرندگان و حشرات) و هسته‌های هیبریدی با فوم، بهبود چشمگیری در جذب انرژی و مقاومت ضربه‌ای ایجاد کرده‌اند. استفاده از ساختار سینوسی الهام گرفته از طبیعت موجب افزایش قابل توجه ظرفیت جذب انرژی و کاهش بار اولیه تا چند برابر نسبت به هسته‌های مثلثی شده است. همچنین بیان شده است که چیدمان‌های خاص مانند هسته‌های لانه‌زنبوری چندسطحی می‌توانند استحکام فشاری و بازدهی بارگذاری را بهبود دهند. کامل [3] در یک مقاله مروری به بررسی ساختارها و مواد استفاده شده در پنل‌های ساندویچی پیشرفته با هسته‌های منشوری و فومی پرداخته است. در این مطالعه، انواع

هسته‌ها شامل فوم، لانه‌زنبوری، هسته‌های بافته شده سه بعدی، و هسته‌های پرینت سه بعدی از نظر طراحی، مواد تشکیل دهنده، فرآیند ساخت و عملکرد مکانیکی مرور شدند. نقش نسبت بالای استحکام به وزن و سختی به وزن این سازه‌ها در کاربردهای هوافضا، دریایی، عمرانی و حمل‌ونقل زمینی بسیار پراهمیت است و بر مزایای چندمنظوره نظیر جذب انرژی بالا، عایق حرارتی و صوتی، و قابلیت یکپارچه‌سازی عملکردهایی همچون ذخیره‌سازی انرژی یا عبور کابل‌ها تأکید در بسیاری از پژوهش‌ها تأکید شده است. نتایج مطالعات پیشین نشان داده‌اند که هسته‌های با طراحی سلولی دوره‌ای یا بافته شده سه بعدی می‌توانند ظرفیت تحمل بار فشاری و خمشی را به طور محسوسی افزایش دهند، به طوری که نمونه‌هایی با ساختارهای الهام گرفته از طبیعت بهبود قابل توجهی در مقاومت و جذب انرژی ارائه داده‌اند. همچنین ذکر شده است که انتخاب صحیح جنس و ساختار رویه (فلزی یا پلیمری تقویت شده با الیاف) و هسته (همگن یا ساختاریافته) نقش تعیین کننده‌ای در بهینه‌سازی عملکرد مکانیکی و کاهش وزن دارد. مک و همکاران [4] در پژوهشی به بررسی پاسخ ضربه کم‌سرعت و مکانیزم‌های خرابی پنل‌های ساندویچی با هسته فوم و رویه‌های هیبریدی از جنس الیاف کربن و الیاف شیشه در دمای پایین پرداختند. نمونه‌ها شامل پیکربندی‌های مختلف هیبریدی و نمونه‌های مرجع تمام کربن و تمام شیشه بودند و با هسته فوم Divinycell H100 به ضخامت 6.35 میلی‌متر و رویه‌های بافته شده 90/0 درجه در مجموع ضخامت 10.35 میلی‌متر ساخته شدند. آزمون ضربه در دو دما 23°C و 70°C- انجام شد. نتایج نشان داد در دمای 70°C-، لایه‌های کربن و هسته فوم رفتار بسیار تردی داشتند، در حالی که لایه‌های شیشه انعطاف پذیری نسبی خود را حفظ کرده و استحکام لایه را افزایش دادند. ترکیب لایه‌ها باعث کاهش شکست ترد الیاف در دمای پایین و بهبود عملکرد ضربه شد، اما میزان بهبود وابسته به نوع هسته و چینش آن وابسته بود؛ به طور خاص، حضور لایه شیشه در سطح ضربه باعث کاهش شکست الیاف و افزایش جذب انرژی شد، در حالی که سازه‌ها با لایه کربن در سطح ضربه سختی بالاتری داشتند ولی آسیب‌های موضعی بیشتری ایجاد کردند. بررسی‌ها نشان داد که حالت‌های شکست شامل جدایش لایه‌ها، شکست الیاف، لهیدگی و برش هسته، جدایش رویه-هسته و ترک خوردگی لایه زیرین بودند. داده‌ها نشان دادند که مدول کشسان CFRP در 70°C- حدود 5٪ افزایش یافته ولی کرنش شکست دچار 10٪ کاهش، در حالی که مدول GFRP حدود 23٪ و استحکام فشاری آن 25٪ در دمای پایین افزایش یافته است. میرزا و همکاران [5] در پژوهشی به بررسی رفتار خمشی پس از ضربه و مکانیزم‌های شکست پنل‌های ساندویچی هیبریدی با هسته فوم و رویه‌های ترکیبی از الیاف کربن و الیاف شیشه در شرایط دمای محیط و دمای بسیار پایین پرداختند. نمونه‌ها با هسته فوم Divinycell H100 به ضخامت 6.35 میلی‌متر و رویه‌های بافته شده 90/0 ساخته شده و با ترتیب مختلف لایه‌چینی، مورد آزمون قرار گرفتند. ابتدا آزمون ضربه و سپس آزمون خمش سه نقطه‌ای برای تعیین خواص باقیمانده انجام شد. نتایج نشان داد قرار گرفتن لایه GFRP در سطح خارجی منجر به بهبود قابل توجه عملکرد خمشی پس از ضربه، به ویژه در دمای پایین، شده و شکست ترد رویه کربنی را کاهش می‌دهد. تحلیل مکانیزم شکست نشان داد که در دمای محیط، مود غالب شکست، فرورفتگی<sup>3</sup> بوده، در حالی که در دمای پایین، تنوع بیشتری از مکانیزم‌ها شامل برش هسته، شکست رویه و جدایش رویه-هسته مشاهده شد. داده‌ها همچنین نشان دادند که توالی لایه‌چینی، خواص فشاری رویه و میزان آسیب اولیه ناشی از ضربه

<sup>3</sup> Indentation<sup>1</sup> GFRP<sup>2</sup> Multi-walled carbon nanotubes (MWCNT)

فوقانی رویه و استفاده از هسته SAN بهترین بهبود را در مقاومت ضربه‌ای، فشاری و خمشی سازه‌های ساندویچی ارائه داد. مینگ و همکاران [9] در پژوهشی به بررسی رفتار خمشی پانل‌های ساندویچی منحنی با رویه‌های GFRP و هسته فوم پلی‌یورتان پرداختند. در این تحقیق، یازده نمونه منحنی و یک نمونه تخت ساخته و تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای قرار گرفتند. نتایج نشان داد که سختی پانل‌های منحنی نسبت به پانل تخت به طور قابل توجهی بیشتر است؛ به‌طور خاص، در زاویه انحنا 30 درجه سختی تا 25٪ بیشتر از نمونه تخت بود. افزایش چگالی و ضخامت فوم نیز منجر به افزایش استحکام و سختی شد. چهار مکانیزم شکست اصلی شناسایی گردید که شامل کمانش رویه، برش هسته، جدایش رویه هسته و شکست موضعی فشاری بود. همچنین آنالیز اجزای محدود انجام و با نتایج تجربی تطابق خوبی نشان داد. در مجموع، استفاده از هسته با چگالی بالاتر و زوایای انحنا 30 و 45 درجه بیشترین ظرفیت باربری و سختی را برای پانل‌های منحنی فراهم کرد. نجفی و همکاران [10] در پژوهشی یک پانل ساندویچی نوین با هسته هیبریدی چندلایه (ترکیب چوب‌پنبه آگلومره و فوم PU) و تقویت‌شده با ساختار مشبک دیواره‌نازک معرفی و ارزیابی کردند. این سازه برای افزایش دوام محیطی و خواص مکانیکی پانل‌های دریایی طراحی شد و با دو نمونه مرسوم PU خالص مقایسه گردید. آزمون‌های انجام‌شده شامل غوطه‌وری در آب، خمش سه‌نقطه‌ای، فشار تخت و لبه‌ای و ضربه سرعت‌بالا بود. نتایج نشان داد که جذب آب در نمونه هیبریدی بیش از 50٪ کمتر از PU خالص است. در آزمون خمش، بار بیشینه از 759 N در نمونه معمولی به 4596 N در نمونه هیبریدی رسیدند که نشان دهنده افزایش 506 درصدی تحمل بار می‌باشد و همچنین سختی اولیه نیز 816٪ بهبود یافت. در فشار تخت، ظرفیت باربری نمونه اصلاح‌شده حدود 2080٪ و سختی فشاری 1233٪ بیشتر از نمونه PU بود. در فشار لبه‌ای، بار فشاری حداکثر و سختی به ترتیب 47٪ و 8٪ افزایش نشان داد. شبیه‌سازی عددی المان محدود همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت و نشان داد این طراحی می‌تواند عملکرد مکانیکی و دوام محیطی پانل‌های دریایی را به شکل چشمگیری بهبود دهد. پاتکار و کاله [11] در یک مقاله مروری جامع به بررسی خواص مکانیکی سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که استحکام و جذب انرژی این سازه‌ها به خواص رویه، نوع هسته و کیفیت اتصال رویه-هسته وابسته است. در این بررسی، انواع رویه‌های پلاستیک تقویت شده با الیاف کربن و الیاف شیشه، فلزی، چوبی و ... و هسته‌ها (فومی، لانه‌زنبوری، منشوری و آگزتیک) بررسی شدند. همچنین نقش نانوقیپرها مانند نانورس، نانولوله‌های کربنی<sup>2</sup> و نانوسیلیکا در بهبود استحکام کششی، برشی و جذب انرژی معرفی شد؛ برای مثال افزودن 5٪ وزنی گرافن اکسید موجب افزایش چشمگیر مقاومت کششی و برشی بین‌لایه‌ای گردید. نتایج نشان دادند که استفاده از هسته‌های آگزتیک به دلیل دارا بودن ضریب پواسون منفی، قابلیت جذب انرژی و مقاومت خمشی بهتری نسبت به ساختارهای لانه‌زنبوری معمولی دارد. همچنین اثر دما نیز مورد بررسی قرار گرفت، افزایش دما از 20 تا 80 درجه سانتی‌گراد باعث کاهش مدول برشی فوم‌های PET و PU به ترتیب تا 24٪ و 66٪ گردید. نویسندگان در جمع‌بندی تأکید کردند که تمرکز تحقیقات آینده باید بر رفع معایب عمده مانند جدایش لایه‌ها و بهبود استحکام عرضی با استفاده از هسته‌های آگزتیک و پرکننده‌های نانوساختار باشد. ژانو و همکاران [12] در یک مقاله مروری به بررسی پیشرفت‌های پژوهشی در سازه‌های ساندویچی تقویت‌شده با الیاف کربن

تأثیر زیادی بر استحکام خمشی باقیمانده دارد. پیش‌بینی‌های تحلیلی با نتایج آزمایش همخوانی داشته و نشان داد که افزایش ضخامت یا سختی رویه باعث تغییر مکانیزم شکست از فرورفتگی به برش هسته می‌شود. این یافته‌ها بر اهمیت طراحی بهینه ترکیب و ترتیب لایه‌ها در سازه‌های ساندویچی هیبریدی برای عملکرد قابل‌اعتماد در شرایط سخت دمایی، به‌ویژه در کاربردهای دریایی و قطبی، تأکید می‌کند. حسینی و همکاران [6] در این پژوهش به بررسی تجربی عملکرد خمشی پانل‌های ساندویچی با هسته‌های آگزتیک ساخته‌شده از پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) پرداختند. هسته‌ها با هندسه‌ها و ضخامت دیواره‌های مختلف به روش پرینت سه‌بعدی تولید شدند و آزمون خمش چهارنقطه‌ای انجام شد. نتایج نشان داد که نمونه‌های دارای هسته آگزتیک عملکرد بهتری نسبت به هسته طبیعی دارند. به‌طور کمی مشخص شد که افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها منجر به افزایش قابل‌توجه مقاومت خمشی و ظرفیت جذب انرژی گردید. در برخی نمونه‌ها، افزایش ضخامت باعث رشد بیش از 30٪ در استحکام فشاری و حدود 13٪ در قابلیت جذب انرژی نسبت به نمونه‌های نازک‌تر شد. همچنین مکانیزم‌های شکست عمدتاً شامل شکست فشاری رویه و کمانش دیواره‌های هسته بودند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که طراحی هندسه و ضخامت بهینه در هسته‌های آگزتیک زیست‌تخریب‌پذیر می‌تواند علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، موجب بهبود نسبت استحکام به وزن و افزایش ظرفیت جذب انرژی پانل‌های ساندویچی گردد. ماندگاریان و همکاران [7] در تحقیقی به بررسی رفتار ضربه کم‌سرعت پانل‌های ساندویچی با هسته فوم PET صددرصد بازیافتی (حاصل از بطری‌های پلاستیکی مصرف‌شده) پرداختند. برای تقویت رویه‌ها، از لایه‌های مش استیل ضدزنگ استفاده شد و نمونه‌ها با روش قالب‌گیری فشاری دومرحله‌ای تولید شدند تا چسبندگی بهینه بین لایه‌ها و هسته ایجاد شود. آزمون‌های ضربه روی نمونه‌هایی با ضخامت‌های مختلف هسته PET و توالی‌های لایه‌های متفاوت نشان داد که تقویت سطح ضربه‌خورده به طور قابل توجهی آستانه سوراخ‌شدگی را افزایش می‌دهد. تصاویر مقاطع پس از ضربه بیانگر آن بود که هیبریدسازی مسیر گسترش آسیب را تغییر داده و موجب بهبود ظرفیت جذب انرژی می‌شود. این نتایج نشان دادند که استفاده از فوم PET بازیافتی همراه با تقویت هیبریدی می‌تواند رویکردی پایدار و کارآمد برای تولید سازه‌های سبک با مقاومت ضربه‌ای بالاتر در کاربردهایی نظیر ساختمان‌های پیش‌ساخته، انبارهای سرد و کامیون‌های باری باشد. کای و همکاران [8] به بررسی خواص مکانیکی سازه‌های ساندویچی با رویه ترکیبی الیاف کربن/شیشه و هسته‌های فوم PVC و SAN پرداختند. برای این منظور 12 نوع نمونه با لایه‌چینی‌های مختلف ساخته و تحت آزمون‌های ضربه کم‌سرعت، فشار لبه‌ای<sup>1</sup> و خمش سه‌نقطه‌ای کوتاه طبق استاندارد ASTM مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمون ضربه نشان داد که ترکیب بهینه الیاف کربن و شیشه در رویه می‌تواند آسیب‌های ناشی از ضربه را کاهش دهد. نتایج نشان دادند که نمونه‌های با هسته SAN مقاومت بهتری نسبت به PVC نشان داده و سطح آسیب داخلی کمتری داشتند. در آزمون فشار کناری، سه مکانیزم شکست شامل برش هسته، جدایش رویه هسته و خردشدگی انتهایی مشاهده شد و مقاومت فشاری در نمونه‌های SAN حدود 10٪ بیشتر از PVC بود. در آزمون خمش سه‌نقطه‌ای نیز دو نوع خرابی شامل برش هسته و جدایش رویه-هسته گزارش شده است. نمونه‌های SAN تا 24٪ از نمونه‌های PCV استحکام برشی نهایی بالاتری داشتند و رفتار شکست تدریجی‌تری نسبت به PVC از خود نشان دادند. به طور کلی، قرارگیری لایه‌های کربن در بخش

<sup>2</sup> CNT<sup>1</sup> Edge Compression

خمشی، شکل پذیری و ظرفیت جذب انرژی دست یابد و گزینه‌ای مقرون به صرفه با قابلیت تولید انبوه برای کاربردهای سبک وزن ارائه دهد.

## 2- آماده سازی و ساخت نمونه‌ها

پنل‌های ساندویچی به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن، در حوزه‌هایی همچون صنایع هوافضا، سازه‌های دریایی و صنایع خودروسازی کاربرد گسترده‌ای دارند. دستیابی به ساختارهایی سبک، مقاوم و اقتصادی مستلزم انتخاب روش ساخت و ترکیب مواد مناسب است. در این پژوهش، به منظور تولید پنل‌های ساندویچی با هسته هیبریدی و رویه‌های بهینه شده، از ترکیب رزین اپوکسی، الیاف شیشه، نانولوله‌های کربنی، فوم‌های XPS (پلی استایرن اکستروژده شده) و پلی‌پورتان استفاده شده است. همچنین برای تقویت مکانیکی هسته، میلگردهای کامپوزیتی GFRP به کار گرفته شدند. روش انتخابی ساخت، پرس سرد می باشد که به دلیل یکنواختی توزیع رزین، کاهش تخلخل و استحکام بالاتر نسبت به روش‌های دیگر انتخاب شده است. در مرحله نخست، رزین اپوکسی با نسبت وزنی 100 به 10 با استون رقیق شده تا زمینه‌ای مناسب برای پخش یکنواخت نانولوله‌های کربنی فراهم گردد. مشخصات نانولوله‌های کربنی مورد استفاده در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1 مشخصات نانولوله‌های کربنی

Table 1 Specification of Carbon Nanotubes

مشخصات نانولوله کربنی	مقادیر آزمایشگاهی
چگالی	$2.1 \frac{gr}{cm^3}$
سطح ویژه	$110 \frac{gr}{m^2}$
درصد خلوص	بالای 95٪
قطر داخلی	5-10 نانومتر
قطر خارجی	20-30 نانومتر
طول	10-30 میکرون
هدایت الکتریکی	بالای $100 \frac{s}{cm}$

مخلوط رزین و نانولوله کربنی به مدت 20 دقیقه با همزن مکانیکی با دور بالا (2000 rpm) مخلوط شده و سپس به مدت 40 دقیقه در معرض امواج آلتراسونیک قرار گرفت تا از تجمعات و آگلومره شدن<sup>2</sup> احتمالی جلوگیری شود. به منظور کنترل دما، این فرآیند در حمام یخ انجام شد. در نهایت، برای حذف حباب‌های هوا، مخلوط به مدت 10 دقیقه در خلا با فشار 0.1 bar هواگیری شد. جهت ساخت رویه‌های کامپوزیتی، از قالب فلزی با ابعاد 200×200×1.7 میلی‌متر استفاده شده است. در شکل 1 تصویر الیاف شیشه در حال پوشش داده شدن با رزین آغشته به نانولوله‌های کربنی قابل مشاهده است.

جهت سهولت در جداسازی نمونه‌ها از قالب، سطح قالب با واکس جداکننده پوشش داده شده است. الیاف شیشه‌ای تک جهته نوع E-glass با چگالی  $2550 \text{ kg/m}^3$  و مدول الاستیسیته 80 GPa به عنوان تقویت‌کننده استفاده شده‌اند. رزین اپوکسی LR2025 به همراه هاردنر HE1515 به نسبت 10 به 1 مخلوط و روی لایه‌های الیاف ریخته شد و برای پخش یکنواخت رزین و جلوگیری از تشکیل حباب، از قلم‌مو و غلتک دستی استفاده شد. سه لایه الیاف آغشته روی هم قرار گرفتند تا ضخامت نهایی حدود 1.5 میلی‌متر حاصل شود. پس از بستن قالب، نمونه‌ها تحت فشار 200 بار توسط دستگاه پرس سرد قرار گرفت و پس از 24 ساعت عمل‌آوری در دمای محیط، صفحات کامپوزیتی

پرداختند. آن‌ها سه نوع اصلی هسته شامل شبکه‌ای<sup>1</sup>، خریایی و فومی را بررسی کردند و نشان دادند که ظرفیت باربری و جذب انرژی سازه‌های هسته شبکه‌ای و فومی با افزایش چقرمگی الیاف کوتاه و Z-pin بهبود یافته است. نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داد که کمناش تدریجی هسته تحت بار فشاری می‌تواند ظرفیت جذب انرژی را افزایش دهد و شکست سازه‌های خریایی به استحکام گره‌ها وابسته است. همچنین مشکل اصلی اکثر این سازه‌ها، جدایش بین لایه‌ها و جدایش رویه هسته است که با روش‌های مختلف مانند افزایش چقرمگی با الیاف آرامید تا حدودی کاهش یافته، اما به‌طور کامل رفع نشده است. مرور پژوهش‌ها نشان داده است که افزودن نانولوله‌های کربنی در ماتریس پلیمر، حتی در مقادیر بسیار کم (در حد 0.1-0.5 درصد وزنی)، می‌تواند با بهبود پراکندگی و افزایش چسبندگی بین‌سطحی، سختی، استحکام و مقاومت شکست کامپوزیت را به‌طور محسوسی ارتقا دهد به‌گونه‌ای که گجنتی و همکاران [13] افزایش هم‌زمان مدول الاستیسیته و چقرمگی شکست را تنها با 0.1 درصد وزنی CNT گزارش کردند و نقش مکانیزم‌هایی چون پل‌زنی و انحراف ترک را در انتقال تنش اثبات نمودند. از سوی دیگر، مطالعات روی پنل‌های ساندویچی کامپوزیتی نشان داده‌اند که کارایی جذب انرژی و مقاومت در برابر نفوذ به‌شدت تحت تأثیر چیدمان و خواص هسته است، به‌طور مشخص، تاو و همکاران [14] نشان دادند افزایش ضخامت و چگالی هسته‌های پلیمری ساختارمند می‌تواند راندمان جذب انرژی را بهبود دهد، درحالی‌که آرایش چندلایه هسته الزاماً مزیت قابل توجهی ایجاد نمی‌کند. این یافته‌ها تأیید می‌کند که ترکیب تقویت نانومقیاس رویه با طراحی هوشمندانه هسته می‌تواند در بهبود رفتار مکانیکی ساندویچ‌ها نقش کلیدی ایفا کند؛ در نتیجه، پژوهش حاضر با بهره‌گیری هم‌زمان از CNT در رویه و چیدمان هیبریدی PU/XPS در هسته، گامی در پر کردن این شکاف پژوهشی و ارائه سازه‌ای سبک، انعطاف‌پذیر و دارای عملکرد خمشی و جذب انرژی ارتقایافته برمی‌دارد.

بررسی پژوهش‌های مطرح‌شده تأکید می‌کند که هسته‌های هیبریدی به‌ویژه با به‌کارگیری ساختارهای شبکه‌ای یا تقویت‌کننده‌های کامپوزیتی و رویه‌های تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی، موجب ارتقاء چشمگیر خواص مکانیکی پانل ساندویچی می‌شوند. اگرچه بسیاری از تحقیقات روی مواد پیچیده یا فناوری‌های ساخت پیشرفته تمرکز دارند، هنوز جای خالی پژوهش‌هایی که با استفاده از مواد نسبتاً اقتصادی مانند فوم XPS و PU و نانولوله‌های کربنی در ترکیب با میلگردهای GFRP، سازه‌ای سبک، ساده و ارزان با خواص بهینه تولید کنند، احساس می‌شود.

هدف تحقیق حاضر، ارائه روشی برای ساخت پنل ساندویچی با رویه رزین اپوکسی/الیاف شیشه تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی و هسته ترکیبی از فوم PU و XPS تقویت‌شده با میلگردهای کامپوزیتی GFRP است، به‌گونه‌ای که با حفظ سادگی تولید، عملکرد مکانیکی بالا (به‌ویژه در خمش و ضربه) تأمین شود. با وجود مطالعات ارزشمند بر روی ساختارهای ساندویچی با هسته‌های هیبریدی و رویه‌های تقویت‌شده با نانومواد، اغلب پژوهش‌ها تنها به یک محور تقویت متمرکز بوده‌اند و بررسی هم‌کنشی چند راهبرد مختلف تقویت، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. تاکنون مطالعه‌ی جامعی که تقویت نانومقیاس رویه با CNT، قرارگیری تقویت‌کننده درون‌هسته از جنس GFRP و تنظیم چینش لایه‌ای PU/XPS را به‌طور یکپارچه و با مسیر ساخت ساده و مقیاس‌پذیر ارزیابی کرده باشد، گزارش نشده است. از این رو، هدف این پژوهش توسعه و ارزیابی سازه‌ای است که بتواند به‌صورت هم‌زمان به بهبود مقاومت

<sup>2</sup> agglomeration

<sup>1</sup> grid

در طراحی هسته‌های هیبریدی، چیدمان فوم‌ها به دو صورت در راستای محورهای Y و Z در نظر گرفته شد تا اثر جهت‌گیری لایه‌ها بر رفتار خمشی بررسی شود. در آرایش محور Y، لایه‌های متوالی فوم XPS و PU به گونه‌ای قرار گرفتند که تغییر جنس لایه‌ها در راستای عرض تیر (محور جانبی) قرار گیرد، در نتیجه بارگذاری و تغییر شکل بیشتر تحت تأثیر توزیع تنش در راستای جانبی و نحوه انتقال نیرو میان لایه‌های متوالی قرار داشت. در مقابل، در آرایش محور Z، تغییر جنس فوم‌ها در امتداد ضخامت تیر سازمان‌دهی شد، به طوری که از سطح رویه تا مرکز هسته، ترکیب PU و XPS تغییر می‌کرد. به منظور ارزیابی نقش ویژگی‌های هسته بر پاسخ مکانیکی سازه، مشخصه‌های مکانیکی فوم‌های استفاده شده، اندازه‌گیری شد و در جدول 2 آورده شده است.

جدول 2 خواص مکانیکی فوم‌های مورد استفاده

Table 2 Mechanical properties of the foams used

فوم XPS	فوم پلی یورتان	خواص مکانیکی
35	50	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
0.3	0.09	مقاومت فشاری (MPa)
0.6	0.12	مقاومت کششی (MPa)
12	2.8	مدول الاستیسیته (MPa)
8	2.3	مدول برشی (MPa)

اتصال قطعات فومی توسط چسب پلی‌وینیل استات (PVA) انجام شده است. پس از خشک شدن، جهت اضافه شدن تقویت کننده‌های GFRP به سازه، سوراخ‌هایی با قطر 4 میلی‌متر در فوم‌ها ایجاد شد و میلگردهای کامپوزیتی در آن‌ها جایگذاری شدند. این میلگردها با قطر 5 میلی‌متر و طول‌های 20 و 45 میلی‌متر از الیاف شیشه و رزین پلی‌استر ساخته شده است و دارای مقاومت کششی 1300 MPa و مدول الاستیسیته 40.8 GPa می‌باشد. پیش از جایگذاری، سطح میلگردها به چسب PVA آغشته شد تا چسبندگی و استحکام اتصال به بیشترین حالت ممکن برسد. در شکل 4 تصویر مربوط به برش تقویت کننده‌های GFRP جهت قرارگیری در سازه قابل مشاهده است.



Fig. 4 Cutting GFRP reinforcing rods

شکل 4 برش میله‌های تقویت کننده GFRP

در مرحله نهایی، سازه‌ها به هم متصل شدند. رویه‌های برش خورده در دو سمت هسته قرار داده شده و اتصال توسط چسب PVA برقرار گردید. اگرچه چسب‌های ساختاری قوی‌تری مانند اپوکسی وجود دارند، در این پژوهش برای حفظ سادگی فرایند ساخت و اطمینان از تکرارپذیری اتصال هسته-رویه از

تولید شدند و سپس صفحات به ابعاد  $150 \times 45$  میلی‌متر برش خوردند. شکل 2 آماده‌سازی رویه‌های کامپوزیتی جهت اتصال به هسته را نشان می‌دهد. هسته‌های هیبریدی از فوم‌های پلی‌استایرن اکستروود شده (XPS) و پلی‌یورتان (PU) با چیدمان‌های مختلف شامل ساده، چیدمان طولی و چیدمان لایه‌ای تشکیل شده‌اند که در شکل 3 نمونه‌ها با هر دو چیدمان لایه از نمای بالا قابل مشاهده هستند.

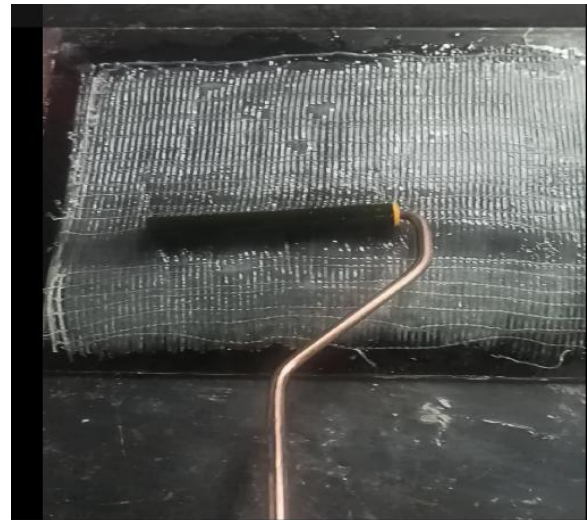


Fig. 1 composite face-sheet preparation

شکل 1 آماده‌سازی رویه کامپوزیتی



Fig. 2 Preparation of the core for composite fabrication

شکل 2 آماده‌سازی هسته جهت ساخت کامپوزیت



Fig. 3 Top view after face-core bonding

شکل 3 نمای بالای سازه‌ها پس از اتصال رویه و هسته به یکدیگر

### 3- آزمون‌ها و نتایج

در این پژوهش، برای ارزیابی رفتار خمشی پنل‌های ساندویچی با هسته‌های فومی مختلف و رویه‌های پلیمری (با و بدون CNT)، آزمون خمش سه‌نقطه انجام شد. آزمون‌ها مطابق استاندارد ASTM C393/C393M برای سازه‌های ساندویچی، با تکیه‌گاه‌های ساده و بار متمرکز در وسط دهانه اجرا گردید. سرعت بارگذاری و نسبت دهانه به ضخامت مطابق الزامات استاندارد انتخاب شد که در این پژوهش سرعت بارگذاری 2 میلی‌متر بر دقیقه و طول دهانه<sup>1</sup> برابر 110 میلی‌متر انتخاب شد.

در شکل 6، پاسخ نیرو-جابجایی نمونه‌های مختلف با هسته‌های فومی متفاوت و رویه‌های پلیمری با و بدون CNT ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانولوله کربنی به رویه‌ها تأثیر قابل توجهی بر افزایش مقاومت خمشی و ظرفیت تحمل بار دارد. به‌طور مشخص، نمونه‌های X-EC-S-0 و P-EC-S-0 که دارای رویه CNT دار هستند، بار بیشینه بالاتری نسبت به نمونه مشابه بدون CNT خود X-E-S-0 و P-E-S-0 نشان می‌دهند. این امر ناشی از بهبود مدول الاستیسیته و چسبندگی بین فاز پلیمری و الیاف در حضور CNT است که منجر به افزایش توانایی انتقال بار و تأخیر در بروز آسیب می‌شود.

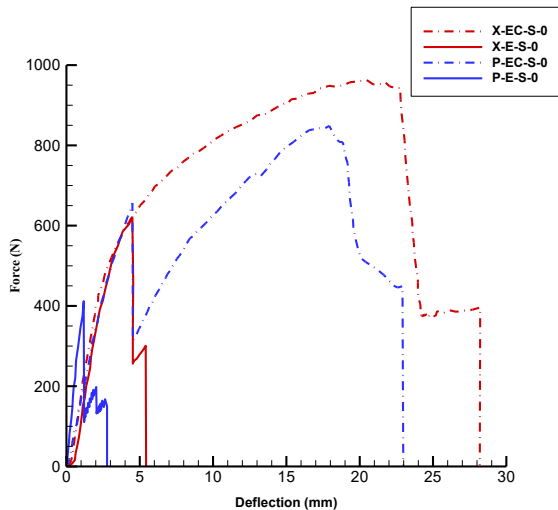


Fig. 6 Comparison of the Flexural Behavior of X- and P-Core Specimens With and Without Carbon Nanotubes

شکل 6 نمودار مقایسه رفتار خمشی نمونه‌های با هسته ساده X و P با و بدون نانولوله کربنی

مقایسه‌ی بین دو نوع هسته نیز نشان می‌دهد که نمونه‌های با هسته XPS نسبت به نمونه‌های با هسته PU، سختی اولیه بالاتر و جابه‌جایی کمتری در ناحیه خطی از خود نشان می‌دهند. این ویژگی ناشی از مدول بالاتر XPS و مقاومت بیشتر آن در برابر تغییر شکل‌های برشی است. در مقابل، نمونه‌های با هسته PU به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر هسته، جابه‌جایی نهایی بزرگ‌تری را تا نقطه شکست تحمل کرده‌اند که بیانگر شکل‌پذیری بهتر این گروه است. علاوه بر این، رفتار پس از اوج بار نیز تفاوت‌های قابل توجهی دارد. نمونه‌های حاوی CNT به‌ویژه نمونه X-EC-S-0، افت مقاومت کمتری پس از بار بیشینه داشته و یک رفتار پایدارتری ایجاد کرده‌اند، در حالی‌که در نمونه‌های بدون CNT شکست ناگهانی‌تر و افت سریع‌تری مشاهده می‌شود. نقش CNT در بهبود

چسب PVA استفاده شد. بررسی مشاهدات پس از شکست نشان داد که نواحی گسیختگی غالباً در خود فوم یا در فصل مشترک ماتریس و الیاف رویه رخ داده‌اند. این موضوع تأیید می‌کند که استحکام ایجادشده توسط چسب PVA برای این سازه سبک‌وزن کافی بوده و نتایج خمشی به‌طور مستقیم تحت تأثیر محدودیت‌های چسب قرار نگرفته است. شکل 5 نمونه نهایی قبل از تست را نشان می‌دهد.



Fig. 5 Cutting GFRP reinforcing rods

شکل 5 برش میله‌های تقویت کننده GFRP

ابعاد نهایی نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM C393M-16 برابر 150×45×20 میلی‌متر تعیین شد. در مجموع 12 نمونه با ترکیب‌های مختلف هسته و دو سطح متفاوت از درصد وزنی نانولوله‌های کربنی (0 و 0.3 درصد) ساخته شدند. این نمونه‌ها شامل گروه‌هایی با هسته ساده، طولی و لایه‌ای بودند که تست خمش سه‌نقطه روی تمامی نمونه‌ها صورت گرفت. در جدول 3 مشخصات و کدگذاری نمونه‌ها قابل مشاهده است. نوع و ترتیب فوم هسته از روی کد نمونه مشخص شده است. کدهایی که با X شروع می‌شوند نشان‌دهنده هسته‌ی XPS و کدهایی که با P آغاز می‌شوند بیانگر هسته‌ی PU هستند. در کدهای ترکیبی مانند XPX یا PXP، هسته به‌صورت هیبریدی و متشکل از لایه‌های متناوب XPS و PU است. حروف Y و Z در انتهای کد بیانگر جهت آرایش هسته (محور Y یا محور Z) هستند. همچنین وجود عبارت EC در کد نمونه نشان‌دهنده استفاده از نانولوله‌های کربنی به همراه کامپوزیت ساخته شده با الیاف E-Glass در رویه‌ها است و ستون GFRP بیانگر به‌کارگیری یا عدم استفاده از میلگردهای تقویت‌کننده است.

جدول 3 مشخصات نمونه‌های مورد آزمون

Table 3 Specifications of the tested specimens

کد نمونه	تقویت کننده GFRP	چینش هسته	جنس رویه
X-EC-S-0	ندارد	تکی / ساده	E-GLASS + CNTs
X-E-S-0	ندارد	تکی / ساده	E-GLASS
P-EC-S-0	ندارد	تکی / ساده	E-GLASS + CNTs
P-E-S-0	ندارد	تکی / ساده	E-GLASS
XPX-E-Z-0	ندارد	در جهت محور z	E-GLASS
XPX-E-Y-0	ندارد	در جهت محور y	E-GLASS
PXP-E-Z-0	ندارد	در جهت محور z	E-GLASS
PXP-E-Y-0	ندارد	در جهت محور y	E-GLASS
XPX-EC-Z-1	دارد	در جهت محور z	E-GLASS + CNTs
XPX-EC-Y-1	دارد	در جهت محور y	E-GLASS + CNTs
PXP-EC-Z-1	دارد	در جهت محور z	E-GLASS + CNTs
PXP-EC-Y-1	دارد	در جهت محور y	E-GLASS + CNTs

<sup>1</sup> Span length

به دلیل تغییر شکل پذیری بالاتر می‌تواند در کاربردهایی که جذب انرژی و تحمل جابه‌جایی زیاد اهمیت دارد، عملکرد مطلوب‌تری داشته باشد.

شکل 8 رفتار خمشی نمونه‌های با هسته هیبریدی سه‌لایه XPX و PXP را در دو حالت رویه اپوکسی ساده (E) و اپوکسی تقویت‌شده با CNT، (EC) نشان می‌دهد. نتایج نشان دهنده آن است که استفاده از CNT در رویه‌ها تأثیر بسیار چشمگیری بر افزایش مقاومت خمشی، ظرفیت باربری و پایداری پس از اوج دارد. در حالت رویه‌های ساده، مقادیر بار بیشینه در محدوده 200 تا 250 نیوتن قرار گرفته و نمونه‌ها پس از رسیدن به اوج، با افت مقاومت نسبتاً سریع و شکست ناگهانی مواجه شده‌اند. در مقابل، در حالت رویه‌های تقویت‌شده با CNT (EC)، بار بیشینه برای نمونه‌های XPX-EC-Z-1 و PXP-EC-Y-1 به ترتیب به بیش از 700 و 1000 نیوتن افزایش یافته است. علاوه بر افزایش چشمگیر بار بیشینه، رفتار پس از اوج نیز پایدارتر بوده و نمونه‌ها توانسته‌اند سطح وسیع‌تری از جابه‌جایی را تحت بار قابل توجه تحمل کنند. مقایسه‌ی بین دو چینش XPX (XPS-PU-XPS) و PXP (PU-XPS-PU) نشان می‌دهد که هر دو از تقویت رفتار مکانیکی توسط CNT بهره‌مند شده‌اند، اما نمونه‌های XPX-EC-Y-1 بیشترین افزایش مقاومت را نشان داده و ظرفیت باربری آن بیش از چهار برابر نمونه‌های بدون CNT بوده است. این امر می‌تواند به نقش PU در لایه‌های بیرونی و افزایش انعطاف‌پذیری سطحی مرتبط باشد که در کنار CNT باعث بهبود همزمان مقاومت و شکل‌پذیری شده است. حضور CNT علاوه بر افزایش مدول رویه‌ها، موجب بهبود چسبندگی در فصل مشترک رویه-هسته و تأخیر در آغاز و گسترش ترک‌ها شده است. به همین دلیل، نمونه‌های تقویت‌شده با CNT نه تنها بار بیشینه بالاتری را متحمل شدند، بلکه رفتار نرم‌تری پس از اوج نشان داده و افت ناگهانی کمتری داشته‌اند.

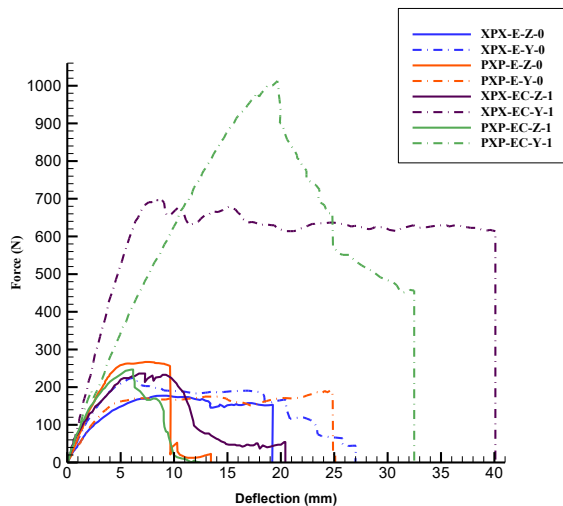


Fig. 8 Simultaneous effect of carbon nanotubes and hybrid core configuration on the flexural behavior

شکل 8 نمودار نیرو-جابه‌جایی اثر همزمان نانولوله کربنی و چیدمان هسته هیبریدی بر رفتار خمشی

به طور کلی، این نتایج بیانگر آن است که ترکیب رویه‌های CNT دار و هسته‌های هیبریدی می‌تواند عملکرد سازه‌های ساندویچی را به طور چشمگیری ارتقا دهد. در این میان، آرایش XPX به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر و جذب انرژی بالاتر در کنار مقاومت ارتقا یافته توسط CNT، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهایی است که نیازمند هر دو ویژگی مقاومت بالا و شکل‌پذیری هستند.

مکانیسم‌های شکست، میزان جابه‌جایی تا شکست و بار نهایی بسیار حائز اهمیت است.

استفاده همزمان از هسته XPS و تقویت CNT در رویه‌ها بهترین ترکیب از نظر سختی اولیه، بار بیشینه و پایداری پس از شکست را ایجاد کرده است، در حالی که هسته PU با وجود مقاومت کمتر، شکل‌پذیری بالاتری داشته و می‌تواند در کاربردهایی که جذب انرژی و جابه‌جایی بیشتر مورد نیاز است، عملکرد مناسبی ارائه دهد. در بررسی کمی می‌توان افزود که رویه‌هایی تقویت شده با CNT در هسته XPS باعث رشد 4 برابری بار بیشینه شد و در هسته PU این رشد حدود 2 برابر ثبت شد.

در شکل 7، رفتار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌های دارای هسته هیبریدی سه‌لایه با آرایش‌های مختلف نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود چینش لایه‌های هسته تأثیر قابل توجهی بر سختی اولیه، بار بیشینه و همچنین پایداری پس از اوج دارد. نمونه‌های با هسته XPX (XPS-PU-XPS) در هر دو سری Y و Z، به دلیل قرارگیری لایه‌های XPS در بالا و پایین هسته، سختی اولیه بالاتری (در حدود 10-15 درصد) نسبت به نمونه‌های XPX (PU-XPS-PU) نشان داده‌اند. این امر ناشی از سختی بیشتر XPS در برابر فشار و کشش در سطح بیرونی تیر ساندویچی است. در مقابل، نمونه‌های XPX اگرچه بار بیشینه کمتری تحمل کردند، اما به دلیل حضور PU در لایه‌های بیرونی جابه‌جایی نهایی بیشتری از خود نشان داده و شکل‌پذیری بهتری داشتند. همچنین مقایسه سری Y و Z برای هر چینش هسته نشان می‌دهد که تغییر هندسه بر مقادیر بار بیشینه و سختی مؤثر بوده است. در سری Z، مقادیر نیروی بیشینه نسبت به سری Y حدود 10 درصد بیشتر بوده، اگرچه شکست در این سری ناگهانی‌تر رخ داده است. این موضوع بیانگر آن است که افزایش ضخامت یا تغییر شرایط هندسی منجر به افزایش مقاومت نهایی می‌شود اما در عین حال کاهش تدریجی‌تری در شکل‌پذیری مشاهده شده است.

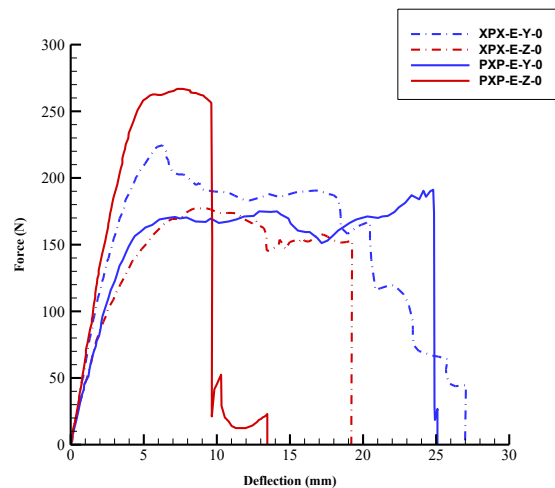


Fig. 7 Flexural behavior of hybrid XPX and PXP core specimens without reinforcement

شکل 7 رفتار خمشی نمونه‌های با هسته هیبریدی XPX و PXP بدون تقویت‌کننده

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب چینش هیبریدی هسته بر اساس نوع کاربرد اهمیت زیادی دارد. آرایش XPX برای افزایش سختی و مقاومت اولیه مناسب‌تر است، در حالی که چینش PXP با وجود مقاومت کمتر،

شکل های 9 و 10 منحنی های انرژی-جابجایی نمونه های هیبریدی XPX و PXP-EC-Y-1 و PXP-EC-Z-1 به بیش از 20 ژول رسید که معادل حدود پنج برابر افزایش نسبت به حالت بدون CNT است. نمونه های سری Z نیز با وجود انرژی جذب کمتر از سری Y، همچنان نسبت به حالت بدون CNT بهبود قابل توجهی نشان دادند.

نتایج نشان می دهد که تقویت کننده های CNT و GFRP نه تنها ظرفیت باربری را افزایش داده است، بلکه توانایی پنل ها در ذخیره و جذب انرژی را نیز به طور چشمگیری ارتقا داده است. همچنین چینش هیبریدی هسته ها نقش مکملی در این روند دارد به طوری که نمونه های سری Y با قابلیت جابه جایی بالاتر، بیشترین انرژی جذب شده را نشان داده اند. این موضوع اهمیت طراحی همزمان هسته و رویه را برای دستیابی به عملکرد بهینه در جذب انرژی نشان می دهد.

شکل 11 مقادیر جابه جایی الاستیک و جابه جایی در نقطه شکست نمونه های مختلف را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، حضور تقویت کننده ها در رویه ها نقش بسزایی در افزایش جابه جایی شکست داشته است. به ویژه نمونه های PXP-EC-Y-1 و XPX-EC-Y-1 بالاترین مقادیر جابه جایی شکست (به ترتیب حدود 50 و 46 میلی متر) را ثبت کرده اند که نشان دهنده ی شکل پذیری بسیار بالای آن هاست. نمونه های بدون CNT، نظیر P-E-S-0 و X-E-S-0، جابه جایی شکست به مراتب کمتری داشته اند. این موضوع تأیید می کند که CNT علاوه بر افزایش مقاومت، توانایی سازه را در تحمل تغییر شکل های بزرگ تر تا پیش از شکست بهبود داده است. مقایسه میان دو آرایش هیبریدی XPX و PXP نیز نشان می دهد که در حالت تقویت شده، هر دو آرایش افزایش قابل توجهی در جابه جایی شکست داشته اند، اما نمونه های با آرایش PXP در لایه های بیرونی به دلیل انعطاف پذیری بیشتر PU، ظرفیت جابه جایی بزرگ تری از خود نشان داده اند. در خصوص جابه جایی الاستیک، اختلاف بین نمونه ها کمتر بوده و عمدتاً در محدوده 5 تا 15 میلی متر قرار دارد. این نشان می دهد که تفاوت اصلی ناشی از اثر تقویت کننده های مثل CNT و میلگردهای GFRP و نوع هسته بیشتر در ناحیه ی پلاستیک و پس از نقطه تسلیم ظاهر می شود. به طور کلی، نتایج این شکل نشان می دهد که استفاده از CNT و انتخاب چینش مناسب هسته می تواند به طور همزمان مقاومت، شکل پذیری و توانایی جذب انرژی سازه های ساندویچی را ارتقا دهد.

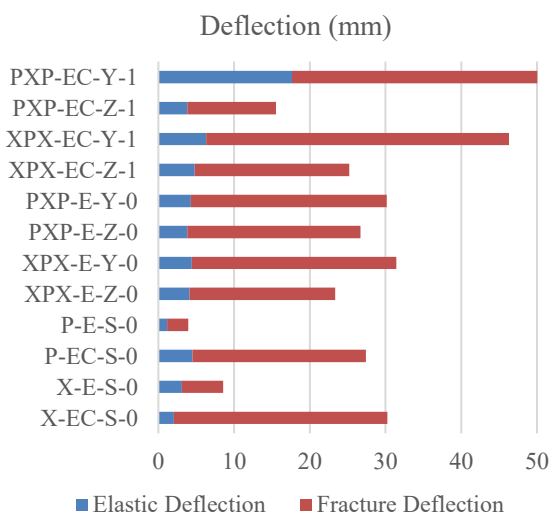


Fig. 11 Deflection diagram with hybrid core without CNT and GFRP reinforcement

شکل 11 نمودار جابه جایی با هسته هیبریدی و بدون تقویت کننده CNT و GFRP

شکل های 9 و 10 منحنی های انرژی-جابجایی نمونه های هیبریدی XPX و PXP را در دو حالت با تقویت کننده و بدون تقویت کننده را نشان می دهند. مقایسه این دو دسته نمودار بیانگر نقش تعیین کننده CNT و GFRP در ارتقای ظرفیت جذب انرژی پنل های ساندویچی است.

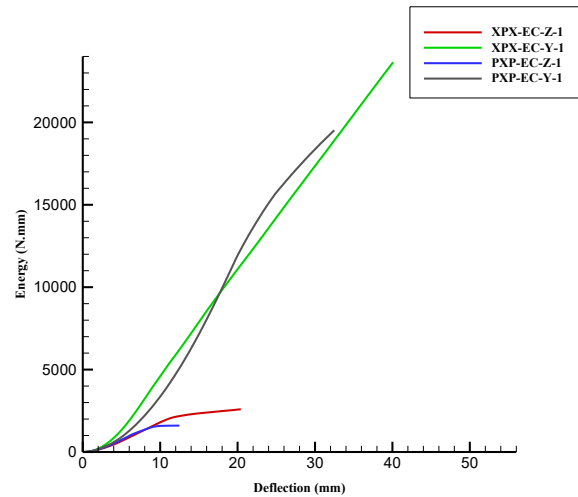


Fig. 9 Energy absorption diagram with hybrid core reinforced by CNTs and GFRP

شکل 9 نمودار جذب انرژی با هسته هیبریدی و تقویت کننده CNT و GFRP

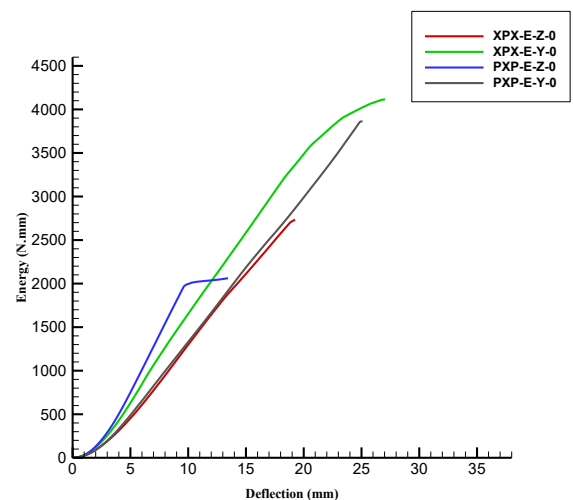


Fig. 10 Energy absorption diagram with hybrid core without CNT and GFRP reinforcement

شکل 10 نمودار جذب انرژی با هسته هیبریدی و بدون تقویت کننده CNT و GFRP

در حالت رویه های اپوکسی ساده (شکل 10)، بیشترین انرژی جذب شده مربوط به نمونه های XPX-E-Y-0 و PXP-E-Y-0 بوده که مقادیر آن ها در حدود 3.5 تا 4 ژول قرار گرفت. در مقابل، نمونه های (XPX-E-Z-0, PXP-E-Z-0) انرژی بیشتری در حدود 2 تا 2.5 ژول جذب کردند. این نتایج نشان می دهد که تغییر آرایش و شرایط هندسی (Y, Z) بر ظرفیت جذب انرژی تأثیرگذار است و نمونه های سری Y به دلیل تحمل جابه جایی بیشتر، توانسته اند انرژی بالاتری ذخیره کنند.

با افزودن CNT به رویه ها (شکل 9)، افزایش چشمگیری در انرژی جذب شده مشاهده شد. در این حالت، مقادیر انرژی جذب شده برای نمونه های

بر اساس آزمون خمش سه نقطه مطابق ASTM C393/C393M روی نمونه‌های با ابعاد استاندارد، پاسخ نیرو-جابجایی تمامی گروه‌ها استخراج و شاخص‌های کلیدی شامل سختی اولیه، نیروی اوج، پایداری پس‌ازاوج، جابجایی شکست، انرژی کل جذب شده و انرژی ویژه (SEA) محاسبه شد. ابتدا در مقایسه رویه‌های بدون CNT و CNT دار، مشاهده گردید که حضور CNT با بهبود مدول مؤثر رویه و افزایش چسبندگی فصل مشترک، ضمن افزایش معنادار شیب اولیه منحنی نیرو-جابجایی، نیروی اوج را بالا می‌برد و رفتار پس‌ازاوج را از افت ناگهانی به حالتی با قابلیت تحمل بار بصورت پایدار تبدیل می‌کند. این پایداری به افزایش سهم انرژی پلاستیک و تأخیر در شروع و گسترش ترک‌ها می‌انجامد. در برخی چینش‌های CNT دار، نیروی اوج از حدود 200 تا 250 نیوتن برای رویه اپوکسی ساده به بازه حدود 700 تا 1000 نیوتن رسید که منجر به افزایش 3 تا 4 برابری نیرو نسبت به نمونه‌های دیگر شد که با گزارش چودهاری و همکاران [1] سازگار است. اما در پژوهش چودهاری و همکاران، آن‌ها این افزایش را برای هسته‌های لانه‌زنبوری نشان دادند، در صورتیکه یافته‌های حاضر اثبات می‌کند این رویکرد برای هسته‌های فومی هیبریدی نیز به‌طور مؤثر قابل اجراء است و انرژی کل جذب شده از حدود 2 تا 4.5 ژول به بیش از 20 ژول افزایش یافت. مقادیر انرژی ویژه (SEA) به‌دست آمده برای ترکیب بهینه‌ی X-EC-S-0 با PXP-EC-Y-1 دامنه‌های گزارش شده برای سازه‌های پیچیده‌تر در پژوهش [10] مطابق است، این درحالی است که مسیر ساخت حاضر ساده‌تر، کم‌هزینه‌تر و مقیاس پذیرتر است. این هم‌ترازی نشان می‌دهد رویکردهای هیبریدی مبتنی بر PU/XPS همراه با تقویت CNT/GFRP می‌تواند کارایی انرژی را بدون پیچیده‌سازی فرآیند ساخت ارتقا دهند. همچنین جابجایی شکست تا حدود 50 میلی‌متر ثبت شد که حاکی از ارتقای هم‌زمان مقاومت و شکل‌پذیری است. این یافته‌ها بیانگر آن است که نانولوله‌های کربنی نه تنها سختی و ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد، بلکه مکانیزم‌های خرابی را نیز به سمت پاسخ نرم‌تر و قابل کنترل‌تر هدایت می‌کند. ثبت جابجایی شکست حدود 50 میلی‌متر در نمونه‌های حاوی CNT نشان می‌دهد که ترکیب تقویت شده رویه با آرایش هیبریدی هسته، پایداری پس از بیشترین بارگذاری و شکل‌پذیری سازه را به‌طور معناداری بهبود می‌دهد. این روند با پژوهش‌های پیشین [5] هم‌راستا بوده با این تفاوت که در این کار، افزایش شکل‌پذیری بدون افت سختی اولیه حاصل شده است. این جمع‌بندی مبنای طرح مسئله‌ی حاضر و انتخاب راهبردهای تقویت هم‌زمان را تشکیل می‌دهد.

#### 4- جمع بندی

در این پژوهش یک راهکار ساخت ساده و مقیاس پذیر برای تولید پنل‌های ساندویچی سبک ارائه شد که در آن رویه‌های اپوکسی/الیاف شیشه با کسر جرمی حدود 0.3 درصد نانولوله کربنی چنددیواره تقویت گردید و هسته پلیمری از فوم‌های XPS و PU، هم به‌صورت یکنواخت و هم به‌صورت هیبریدی با آرایش‌های XPS (XPS-PU-XPS) و XPU (PU-XPS-PU) ساخته شد.

بر اساس آزمون خمش سه نقطه مطابق ASTM C393/C393M روی نمونه‌های با ابعاد استاندارد، پاسخ نیرو-جابجایی تمامی گروه‌ها استخراج و شاخص‌های کلیدی شامل سختی اولیه، نیروی اوج، پایداری پس‌ازاوج، جابجایی شکست، انرژی کل جذب شده و انرژی ویژه (SEA) محاسبه شد. ابتدا در مقایسه رویه‌های بدون CNT و CNT دار، مشاهده گردید که حضور CNT با بهبود مدول مؤثر رویه و افزایش چسبندگی فصل مشترک، ضمن افزایش معنادار شیب اولیه منحنی نیرو-جابجایی، نیروی اوج را بالا می‌برد و رفتار پس‌ازاوج را از افت ناگهانی به حالتی با قابلیت تحمل بار بصورت پایدار تبدیل می‌کند. این پایداری

شکل 12 مقادیر انرژی جذب شده کل، انرژی الاستیک، انرژی پلاستیک و انرژی ویژه (SEA) نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که افزودن نانولوله‌های کربنی در رویه‌ها تأثیر چشمگیری در بهبود عملکرد انرژی داشته است. در تمامی گروه‌ها، نمونه‌های تقویت شده با CNT نسبت به نمونه مشابه بدون CNT انرژی بیشتری جذب کرده‌اند و این افزایش عمدتاً ناشی از سهم بالاتر انرژی پلاستیک است. در واقع، حضور CNT با بهبود مدول و افزایش چسبندگی بین لایه‌ها، باعث ایجاد یک سکوی باربری پایدار پس از بار بیشینه شده و امکان تحمل جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر را فراهم آورده است. مقایسه بین دو آرایش هیبریدی XPU (XPS-PU-XPS) و XPU (PU-XPS-PU) نیز نشان می‌دهد که XPU به دلیل حضور لایه‌های XPS در سطوح بیرونی، سختی بالاتر و انرژی ویژه بیشتری داشته، در حالی که XPU با قرارگیری PU در لایه‌های بیرونی، شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی کل بیشتری را فراهم کرده است. بنابراین، می‌توان گفت XPU بیشتر مناسب کاربردهایی است که نیاز به سبک‌سازی و افزایش SEA (انرژی ویژه) دارند، در حالی که XPU در مواردی که جذب انرژی و تغییر شکل بزرگ اهمیت دارد عملکرد مطلوب‌تری ارائه می‌دهد. اثر پارامترهای هندسی نیز بسیار برجسته است. در حالت بدون CNT، نمونه‌های سری Y نسبت به سری Z انرژی بیشتری جذب کرده‌اند، زیرا توانسته‌اند تغییر شکل بزرگ‌تری را تحمل کنند. این اختلاف در حضور CNT به مراتب بیشتر شده است، به‌طوری که نمونه‌های تقویت شده از سری Y مقادیر انرژی تا پنج برابر بیشتر از نمونه‌های بدون CNT را ثبت کرده‌اند. در مقابل، نمونه‌های سری Z با وجود بهبود ناشی از CNT همچنان رفتار تردتر و شکست زود هنگام‌تری داشته‌اند که نشان می‌دهد طراحی هندسی نقش تعیین‌کننده‌ای در بهره‌برداری کامل از مزایای CNT دارد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از CNT در رویه‌ها و آرایش هیبریدی مناسب در هسته می‌تواند هم انرژی کل و هم انرژی ویژه را به‌طور قابل توجهی ارتقا دهد. در این میان، ترکیب XPU-EC به‌ویژه در سری Y بهترین عملکرد را از نظر سبک‌سازی و SEA نشان داده است، در حالی که XPU-EC-Y بیشترین ظرفیت جذب انرژی کل را ارائه داده و می‌تواند در کاربردهایی که نیازمند تحمل ضربه و تغییر شکل بزرگ هستند به کار گرفته شود.

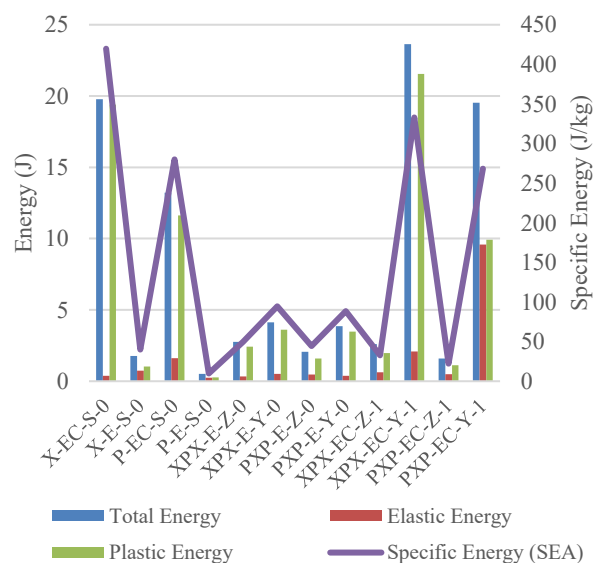


Fig. 12 Comparison of energy absorbed by different specimens

شکل 12 مقایسه انرژی جذب شده توسط نمونه‌های مختلف

می‌دهد. برای سازه‌های ضربه‌پذیر و انرژی‌بر که تغییرشکل مجاز بزرگ‌تری دارند، ترکیب رویه CNT دار با هسته PXP مناسب‌تر است. PU بیرونی امکان جابجایی شکست تا مقادیر حدود 45 تا 50 میلی‌متر و افزایش چشمگیر انرژی کل را فراهم می‌کند. هم‌افزایی رویه CNT دار، آرماتورگذاری هسته با میلگردهای GFRP و مهندسی چینش هیبریدی XPS/PU، چارچوبی فراهم می‌آورد که در آن مقاومت خمشی، SEA و شکل‌پذیری می‌توانند با مسیری ساخت ساده، کم‌هزینه و قابل‌تکرار به‌طور هم‌زمان ارتقا یابند.

## 5- مراجع

- [1] Chowdhary, S., Tafesse, B., Kebede, M. K., Arumugam, A. B., "Bending behavior of laminated honeycomb core sandwich GFRP composite plate hybrid with MWCNT fillers," in AIP Conference Proceedings, Vol. 2341, No. 1, p. 020048, 2021.
- [2] Ma, Q., Rejab, M. R. M., Siregar, J. P., Guan, Z., "A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels," Journal of Composite Materials, Vol. 55, No. 18, pp. 2513-2555, 2021.
- [3] Kamble, Z., "Advanced structural and multi-functional sandwich composites with prismatic and foam cores: A review," Polymer Composites, Vol. 45, No. 18, pp. 16355-16382, 2024.
- [4] Mack, J. P., Mirza, F., Banik, A., Khan, M. H., Tan, K. T., "Hybridization of face sheet in sandwich composites to mitigate low temperature and low velocity impact damage," Composite Structures, Vol. 338, p. 118101, 2024.
- [5] Mirza, F., Mack, J. P., Banik, A., Khan, M. H., Tan, K. T., "Post impact flexural behavior investigation of hybrid foam-core sandwich composites at extreme Arctic temperature," Composites Science and Technology, Vol. 258, p. 110897, 2024.
- [6] Hosseini, S. A., Shokrollahi, H., Mousavi, S. A., Sabouri, H., "Experimental investigation of bending behavior of sandwich structures with auxetic core made of biodegradable materials," In Persian, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 63-75, 2025.
- [7] Mandegarian, S., Hojjati, M., Moghaddar, H., "Recycled PET foam core sandwich panels with reinforced hybrid composite facesheets: A sustainable approach for enhanced impact resistance," Journal of Sandwich Structures and Materials, Vol. 27, No. 2, pp. 396-428, 2025.
- [8] Cai, Y., Wang, X., Ouyang, F., Chen, Q., Zhu, Z., Fan, K., Ding, F., "Study on the mechanical properties of a carbon-fiber/glass-fiber hybrid foam sandwich structure," Materials, Vol. 17, No. 9, 2023.
- [9] Meng, X., Zhang, D., Feng, P., Zhai, J. Q., Liu, T. Q., "Flexural behavior of singly curved GFRP sandwich panel with polyurethane foam core," Engineering Structures, Vol. 314, p. 118389, 2024.
- [10] Najafi, M., Eslami-Farsani, R., "Design and characterization of a multilayered hybrid cored-sandwich panel stiffened by thin-walled lattice structure," Thin-Walled Structures, Vol. 161, p. 107514, 2021.
- [11] Patekar, V., Kale, K., "State of the art review on mechanical properties of sandwich composite structures," Polymer Composites, Vol. 43, No. 9, pp. 5820-5830, 2022.
- [12] Zhao, T., Yang, J., Chen, J., Guan, S., "Review of carbon fiber-reinforced sandwich structures," Polymers and Polymer Composites, Vol. 30, p. 09673911221098729, 2022.
- [13] Gojny, F. H., Wichmann, M. H. G., Köpke, U., Fiedler, B., Schulte, K., "Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: Enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content," Composites Science and Technology, Vol. 64, No. 15, pp. 2363-2371, 2004.
- [14] Tao, Q., Ren, P., Shi, L., Zhao, Z., Tang, Y., Ye, R., Zhang, W., Cui, J., "Energy absorption and impact behavior of composite sandwich panels under high-velocity spherical projectile," International Journal of Impact Engineering, Vol. 162, p. 104143, 2022.

به افزایش سهم انرژی پلاستیک و تأخیر در شروع و گسترش ترک‌ها می‌انجامد. در برخی چینش‌های CNT دار، نیروی اوج از حدود 200 تا 250 نیوتن برای رویه اپوکسی ساده به بازه حدود 700 تا 1000 نیوتن رسید که منجر به افزایش 3 تا 4 برابری نیرو نسبت به نمونه‌های دیگر شد و انرژی کل جذب‌شده از حدود 2 تا 4.5 ژول به بیش از 20 ژول افزایش یافت که نشان می‌دهد رویکردهای هیبریدی مبتنی بر PU/XPS همراه با تقویت CNT/GFRP می‌توانند کارایی انرژی را بدون پیچیده‌سازی فرآیند ساخت ارتقا دهند. همچنین جابجایی شکست تا حدود 50 میلی‌متر ثبت شد که حاکی از ارتقای هم‌زمان مقاومت و شکل‌پذیری است. این یافته‌ها بیانگر آن است که نانولوله‌های کربنی نه تنها سختی و ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد، بلکه مکانیزم‌های خرابی را نیز به سمت پاسخ نرم‌تر و قابل‌کنترل‌تر هدایت می‌کند. ثبت جابجایی شکست حدود 50 میلی‌متر در نمونه‌های حاوی CNT نشان می‌دهد که ترکیب تقویت شده رویه با آرایش هیبریدی هسته، پایداری پس از بیشترین بارگذاری و شکل‌پذیری سازه را به‌طور معناداری بهبود می‌دهد. این جمع‌بندی مبنای طرح مسئله‌ی حاضر و انتخاب راهبردهای تقویت هم‌زمان را تشکیل می‌دهد.

در مقایسه هسته‌های یکنواخت، XPS به سبب سفتی برشی بالاتر، شیب اولیه بزرگ‌تری در ناحیه الاستیک ایجاد نمود و برای کاربردهایی که سختی اولیه و محدودیت تغییرشکل اهمیت نخست را دارند مزیت نشان داد که در مقابل، PU با قابلیت تغییرشکل‌های بزرگ‌تر، جابجایی نهایی و انرژی پلاستیک بیشتری را فراهم کرد و برای حالت‌های انرژی‌بر و ضربه‌پذیر مناسب‌تر بود. این دو رفتار متقابل در نمودارهای نیرو-جابجایی به وضوح قابل ملاحظه است. نمونه‌های XPS در ناحیه خطی سفت‌تر و با جابجایی کمتر به همان سطح نیرو می‌رسند، نمونه‌های PU تا پیش از شکست، ناحیه وسیع‌تری از تغییرشکل پایدار را تحمل می‌کردند.

قرارگیری لایه‌های سخت‌تر در بیرون نه تنها موجب توزیع تنش یکنواخت‌تر در رویه‌ها شد بلکه مقاومت به کمانش موضعی را نیز بهبود داد. در مقابل، چینش PXP که PU در بیرون قرار می‌گیرد، مسیر گسترش آسیب را به‌گونه‌ای هدایت کرد که جابجایی نهایی و انرژی کل جذب‌شده افزایش یابد؛ PU بیرونی با انعطاف‌پذیری بیشتر، از تمرکز تنش می‌کاهد و اجازه انباشت انرژی پلاستیک بیشتری را می‌دهد. از این‌رو در بسیاری از حالت‌ها، PXP برای کاربردهای جذب انرژی گزینه مناسب‌تری می‌باشد. در هر دو چینش، اضافه‌شدن CNT به رویه‌ها اثرات مثبت خود را حفظ کرد و در مواردی به‌ویژه در نمونه‌های PXP-EC افزایش ظرفیت بار و انرژی چشمگیرتر بود که می‌توان نتیجه گرفت رویه‌های دارای نانولوله کربنی پایدار تر و پوسته بیرونی از جنس PU رفتاری نرم‌تر خواهد داشت.

اثر پارامترهای هندسی از طریق دو سری Y و Z بررسی شد که راستای چینش لایه‌ها را نشان می‌دهد. در این دو سری بر نیروی اوج، روند آسیب و مقدار انرژی جذب‌شده اثراتی چشمگیری مشاهده شد. در چند ترکیب از سری Y، نیروی اوج بالاتر و جابجایی شکست بزرگ‌تری ثبت شد و به خصوص نمونه‌هایی که دارای CNT بودند، رشد چندبرابری جذب انرژی نسبت به نمونه مشابه بدون CNT ارائه دادند. نمونه‌هایی که PU بیرونی داشتند، سهم بیشتری از انرژی را در فاز پلاستیک ذخیره کردند و پاسخ پس‌ازاوج نرم‌تری نشان دادند، در حالی که نمونه‌های با XPS بیرونی SEA بالاتری را با افت پس از اوج کنترل‌شده ارائه کردند.

برای سازه‌هایی که پایداری خمشی، محدودیت ارتعاش و SEA بالاتر اولویت دارد، ترکیب رویه CNT دار با هسته XPX توصیه می‌شود. قرارگیری XPS در لایه بیرونی، سفتی مؤثر و کارایی جذب انرژی نسبت وزن را بهبود