



Experimental Study of Mechanical Properties on the Sandwich Panel with Auxetic Foam Core and Carbon Fiber

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Shahrjerdi A.*¹ PhD

How to cite this article

Shahrjerdi A. Experimental Study of Mechanical Properties on the Sandwich Panel with Auxetic Foam Core and Carbon Fiber. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(3):587-598.

ABSTRACT

In this research, an efficient method has been used in terms of cost and equipment for the production of sandwich panels with auxetic foam core and ordinary foam. Polyurethane foam has been used for making the auxetic foam. Then, on the foam specimen, a thermal analysis is performed to determine the specified thermal range for making the auxetic foam. Four layers of carbon fiber were used to make the sheet in the panel. After making cores and sheets, the sandwich panel was made up of two different cores. To achieve the mechanical properties of the samples, various experiments were carried out, including a three-point flexural test, edgewise compression test, Charpy impact test, flatwise compression test, and drop-weight impact test. The results obtained from the flatwise compression test showed that the compression modulus of the sandwich panel with auxetic foam core was 8.4 times the conventional sandwich panel modulus with a normal foam core. Its compressive strength was estimated to be about 20 times the sandwich panel strength with the ordinary foam core. The negative Poisson ratio of these materials causes this behavior, which increases their variation range. The results of the drop-weight impact test showed that the impact resistance of the sandwich panel with the auxetic foam core is increased by 12.62% compared to the sandwich panel with the conventional foam core, which is due to the high-energy absorption of these materials.

Keywords Sandwich Panel; Auxetic Foam; Carbon Fiber; Three-Point Flexural Test; Charpy Impact Test

CITATION LINKS

[1] Experimental and theoretical study of sandwich panels with steel facesheets and GFRP core [2] Mechanical characterization of skin—finite deformations [3] Models for the elastic deformation of honeycombs [4] The anisotropic behavior of Poisson's ratio, Young's modulus, and shear modulus in hexagonal materials [5] The mechanics of two-dimensional cellular materials [6] Foam structures with a negative Poisson's ratio [7] Auxetic polymers: A new range of materials [8] A novel process for the manufacture of auxetic foams and for their re-conversion to conventional form [9] McDonnell Douglas Corp, assignee. Method of fabricating metallic sandwich structure [10] Formulation of an adaptive sandwich beam [11] Thermographic investigation of sandwich structure made of composite material [12] Control of wave propagation in sandwich beams with auxetic core [13] Modeling of impacts on composite structures [14] The influence of core height and face plate thickness on the response of honeycomb sandwich panels subjected to blast loading [15] Collapse modes in aluminium honeycomb sandwich panels under bending and impact loading [16] Impact response of fiber metal laminate sandwich composite structure with polypropylene honeycomb core [17] Auxetic foam as a core material for sandwich panels [18] Experimental investigation of energy absorption in foam filled sandwich beams with expanded metal sheet as core under quasi-static bending [19] Experimental and numerical study of core and face-sheet thickness effects in sandwich panels with foam core and aluminum face-sheets subjected to blast loading [20] Experimental analysis sandwich panel by auxetic foam core [21] lavanpolymer.ir [22] ASTM C393/C393M-16, Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure [23] ASTM C364-99, Standard test method for edgewise compressive strength of sandwich constructions [24] ASTM D256-02, Standard test methods for determining the izod pendulum impact resistance of plastics [25] ASTM C365-03, Standard test method for flatwise compressive properties of sandwich cores [26] ASTM D7136 / D7136M-15, Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Malayer University, Malayer, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Malayer University, Malayer, Iran
Phone: -
Fax: -
shahrjerdi@malayeru.ac.ir

Article History

Received: November 3, 2018
Accepted: May 29, 2019
ePublished: March 01, 2020

مطالعه تجربی خواص مکانیکی روی پنل ساندویچی با رویه الیاف کربن و هسته فوم اکستیک

علی شهرجری* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

چکیده

در این تحقیق از روشی کارآمد از نظر هزینه و تجهیزات موجود برای ساخت نمونه‌های پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک و هسته فوم معمولی استفاده شده است. برای ساخت فوم اکستیک از فوم پلی‌اورتان استفاده شده است و همچنین روی نمونه فوم ساخته شده آنالیز حرارتی انجام شد تا محدوده حرارتی مجاز برای ساخت فوم اکستیک مشخص شود. در رویه پنل، چهار لایه الیاف کربن به کار برده شده که پس از ساخت هسته‌ها و رویه‌ها پنل ساندویچی با دو هسته از جنس متفاوت ساخته شد. آزمایش‌های مختلفی از جمله آزمایش خمش سه نقطه‌ای، آزمایش فشار لبه‌ای، آزمایش ضربه شاریپی، آزمایش فشار مسطح و ضربه افتان روی نمونه‌ها به منظور دستیابی به برخی خواص مکانیکی انجام شد و نتایج مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از آزمایش فشار مسطح نشان داد که مدول فشاری پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک $8/4$ برابر مدول پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی است. همچنین مقاومت فشاری آن به دلیل خاصیت اکستیک بودن هسته، در حدود ۲۰ برابر مقاومت پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی برآورد شد. این رفتار به دلیل ضریب پواسون منفی این مواد است که دامنه تغییر آنها را نسبت به مواد دیگر بالا می‌برد. همچنین نتایج حاصل از آزمایش ضربه افتان نشان داد که مقاومت به ضربه در پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک نسبت به پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی به میزان ۱۲/۲٪ افزایش پیدا می‌کند که دلیل آن قابلیت جذب انرژی بالای این گونه مواد است.

کلیدواژه‌ها: پنل ساندویچی، فوم اکستیک، الیاف کربن، آزمایش خمش سه نقطه‌ای، آزمایش ضربه شاریپی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۱۲

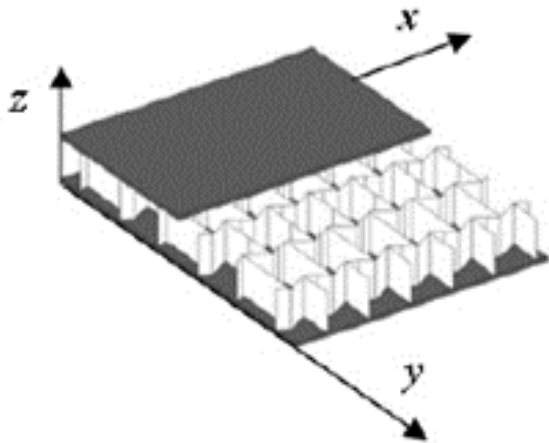
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۸

*نویسنده مسئول: shahrjardi@malayeru.ac.ir

۱- مقدمه

مواد مرکب محصولات هستند که از ترکیب دو یا چند ماده متفاوت نظیر الیاف و ماتریس‌های رزین به دست آمده‌اند. از این مواد برای رسیدن به ماده‌ای با خواص ساختاری جدید و متفاوت با مواد طبیعی، استفاده می‌شود. مواد مرکب به علت وزن سبک، ابتدا در صنایع هوایی مورد استفاده قرار گرفتند. این ویژگی در این صنعت از اهمیت فراوانی برخوردار است. امروزه با پیشرفت در زمینه تولید مواد مرکب، پنل‌های ساندویچی به عنوان یکی از سازه‌های سبک و مقاوم، طراحی و تولید می‌شوند. پنل‌های ساندویچی، سبک و مقاوم هستند و از رویه‌های نازکی مانند آلومینیوم یا مواد مرکب الیافی تشکیل شده‌اند. این مواد، هسته‌ای صلب و با جرم حجمی پایین دارند. یک ساختار ساندویچی از سه بخش تشکیل شده است که

شامل یک جفت صفحه سفت و نازک به عنوان رویه، یک هسته با ضخامت زیاد و وزن کم (که نیروها را از یک رویه به رویه دیگر منتقل می‌کند) و یک ماده چسبنده (که هسته و رویه‌ها را به هم متصل می‌کند) است. در شکل ۱ ساختار کلی پنل ساندویچی به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۱) شماتیک ساختار پنل ساندویچی^[1]

با توجه به ویژگی‌های پنل‌های ساندویچی صنعتی مانند سبک بودن، مقاومت در برابر زلزله، عایق بودن در برابر سرما، گرما، صوت و گرد و غبار، از آنها در مصارف گوناگونی مانند دیوار و سقف کارخانه‌ها و ساختمان‌های صنعتی، ساخت لوله‌های صنعتی، ساخت انواع سردخانه‌ها، کانکس‌های ثابت و متحرک، ساخت انبار و سیلو، ساخت کانتینرهای حمل و نقل و سقف آلاچیق‌ها استفاده می‌شود. در برخی از زمینه‌ها، نیاز به مواد جدید با خواص ویژه بالا، به شدت احساس می‌شود. یکی از این مواد، ماده‌ای است که دارای ضریب پواسون منفی است و در حال حاضر به عنوان اکستیک (Auxetic) شناخته می‌شود. این کلمه ریشه یونانی دارد و به معنی آن چیزی است که تبدیل به بزرگ‌تر می‌شود. مواد اکستیک دارای ضریب پواسون منفی هستند و این بدان معناست که این مواد در هنگام کشش، افزایش طول در راستای عمود بر امتداد کشش دارند. ضریب پواسون منفی یک خاصیت مهم است که تاثیر بسزایی بر خواص مکانیکی ماده از قبیل مقاومت به خوردگی (تاثیر بر صافی سطح)، متراکم‌سازی، مقاومت برشی و برخی جنبه‌های عملکرد دینامیکی ماده دارد. خواص مکانیکی غیرعادی فوم‌های اکستیک به ویژگی‌های تغییر شکل بازگشتی (ارتجاعی) نسبت داده می‌شود. ضریب پواسون منفی از لحاظ ترمودینامیکی امکان‌پذیر است؛ اما در مواد معمولی (به جز چند استثنا)، ضریب پواسون منفی دیده نمی‌شود. در مواد همسانگرد بر اساس تئوری‌های ترمودینامیکی، ثابت می‌شود که مقادیر ممکن برای ضریب پواسون بین -۱ و -۵/۵ است. پس از آنکه نمونه‌ای از فوم اکستیک ساخته شد، این مواد برای طیف گسترده‌ای از کاربردهای تجاری مورد استفاده قرار گرفتند^[2].

عیوب موجود در مواد مرکب پنل ساندویچی را با استفاده از ترموگرافی شناسایی کردند.

روزنه و/اسکارپا^[12] حرکت موج را در یک تیر ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری اکستیک مورد مطالعه قرار دادند. /بر/ته^[13] مروری کلی در مدل‌های ریاضی انجام داد که بتوانند ضربه را بین یک جسم خارجی و ساختار مواد مرکب تحلیل کند. چای و /لانگدن^[14] رفتار سلولی پنل ساندویچی با هسته اکستیک را در برابر نیروی ضربه‌ای، مورد بررسی قرار دادند. کروی و همکاران^[15] آزمایش ضربه با سرعت کم به‌منظور بررسی حالت‌های شکست و آسیب پنل ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری را انجام دادند. تان و آکیل^[16] نیز یک سری آزمایش‌های ضربه‌ای با سرعت کم، برای مطالعه سازه‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری (ساخته‌شده از ورقه‌های فلزی فیبری) اجرا کردند.

سال ۲۰۰۷ در دانشگاه استونی بروک، جمعی از دانشمندان با استفاده از روش فشرده‌سازی سلول‌ها و اعمال حرارت به میزان کم، موفق به ساخت نمونه فوم اکستیک شدند. چگالی نمونه فرآوری‌شده حدود ۰/۵ تا ۰/۲ کیلوگرم بر متر مکعب به‌دست آمد. نمونه از قسمت میانی و دو بخش کناری آن برش داده شد. به‌منظور نشان‌دادن رفتار ماکروسکوپی اکستیک، یک تست کشش ساده روی نمونه انجام شد. رفتار نمونه تحت اعمال بار کششی توسط یک دوربین سرعت بالا ضبط و الگوریتم نقطه به نقطه آن تجزیه و تحلیل شد. با توجه به نتایج حاصل از آن، تجزیه و تحلیل نسبت پواسون فوم اکستیک تقریباً بین ۰/۱۳ تا ۰/۲ به‌دست آمد^[17]. همچنین در این دانشگاه، دانشمندان موفق به ساخت پنل ساندویچی با هسته اکستیک شدند و روی نمونه‌ها تست ضربه انجام شد. از طرفی با استفاده از یک تفنگ بادی، آزمایش ضربه با سرعت کم نیز انجام شد. این تفنگ دارای گلوله فولادی به قطر ۴/۵ میلی‌متر بود که به‌منظور بررسی مقاومت به ضربه فوم اکستیک در مقایسه با فوم معمولی شلیک شد.

در تحقیق تقی‌پور و نوری^[18] به‌صورت تجربی، میزان جذب انرژی تیرهای ساندویچی با هسته مشبک پرشده از فوم تحت بارگذاری خمشی شبه‌استاتیک بررسی شده است. خندابی و همکاران^[19] مطالعه تجربی و عددی تغییر شکل صفحات چندلایه مرکب- فلز (FML) با ضخامت‌های یکسان تحت بارگذاری انفجاری را انجام دادند. محرمی^[20] نیز تحلیل تجربی پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک را بررسی نمود.

بسیاری از مواقع، ساختاری مورد نیاز است که در برابر مقادیر زیادی از انحراف خمشی- برشی مقاومت کند و در عین حال سفتی کافی داشته باشد. علاوه بر این، زمانی که چنین سازه‌هایی در زمینه‌های هوافضا و خودرو به‌عنوان سطوح بیرونی استفاده می‌شوند، حفاظت از ضربه کم‌انرژی از سمت اجسام کوچک و ضایعات نیز یک عامل مهم برای بررسی است. ساختارهای اکستیک خواص بهتر و دقیق‌تری در این کاربردها نسبت به ساختار سلولی منظم دارند.

رگ‌های خونی مصنوعی، نمونه‌ای از کاربرد مواد اکستیک در علم پزشکی هستند. اگر یک رگ خونی از مواد معمولی ساخته شود با ایجاد پالس جریان خونی، ضخامت دیواره کاهش می‌یابد که این امر می‌تواند منجر به پارگی رگ شود. در حالی که اگر این رگ خونی از مواد با نسبت پواسون منفی ساخته شود با ایجاد پالس جریان خونی، ضخامت دیواره افزایش می‌یابد. از این قابلیت در عمل جراحی قلب (آنژیوپلاستی) و روش‌های مربوطه استفاده می‌شود. به این صورت که عروق کرونر توسط انبساط میله توخالی و انعطاف‌پذیر ساخته‌شده از ماده اکستیک، باز می‌شود. از مواد با نسبت پواسون منفی به علت دارا بودن منحنی Synclastic (دارای دو انحنا در طرفین به‌صورت متقارن که دلیل استحکام آن است) در صنعت هوافضا استفاده می‌شود^[3].

شروع ساخت اکستیک به‌وسیله /لی^[4] انجام شد. او از کوره‌ای تحت دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برای آماده‌سازی نمونه‌ها استفاده کرد. برای هر نوع فوم، سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و متوسط دمای آنها اندازه‌گیری شد. اگرچه این روش چندان دقیق نبود، اما امکان تخمین دماهای نرم‌شدن (خمیری)، مایع‌شدن و تجزیه‌شدن را فراهم ساخت. دمای خمیری PECO در حدود ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد (در این دما سلول فرو می‌ریزد)، دمای مایع‌شدن ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد و دمای تجزیه ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است. به نظر می‌رسد که هیچ نقطه ذوب سریعی برای فوم‌های پلیمری وجود ندارد؛ بنابراین یک دمای کوره مناسب در حدود ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد ممکن است در نظر گرفته شود که شاید به این علت، /لی از دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده کرد.

ساختارهای سلولی با ضریب پواسون منفی در مقیاس بزرگ برای اولین بار در سال ۱۹۸۲ به شکل لاستیک سیلیکونی دوبعدی با آلومینیوم‌های لانه‌زنبوری که توسط دو چرخ‌دنده شکل داده شده بود، تولید شد^[5]. در سال ۱۹۸۷، لیکتر^[6] برای اولین بار فوم پلی‌اورتان با ضریب پواسون منفی را از ساختار دندان‌های ساخت. این فوم دارای ضریب پواسون ۰/۷- بود. این نوع جدید از مواد در سال ۱۹۹۱ توسط /اونس^[7]، اکستیک نام‌گذاری شد که برخلاف مواد معمولی (مانند لاستیک، شیشه، فلز) هنگام کشش طولی، در جهت عرضی توسعه پیدا می‌کنند.

تحقیقات منتشرشده، ثابت کرده است که فوم با سلول‌های محدب، دارای نقطه عملکرد بالاتر و مدول یانگ پایین‌تری در مقایسه با مواد معمولی با چگالی مشابه است. فوم‌هایی با سلول‌های محدب، چگالی خود را در اطراف مکانی که تحت تاثیر نیرو است، افزایش می‌دهد. این نکته قابل بیان است که رشد تراکم با افزایش مدول برشی همراه است^[8]. هایاس و همکاران^[9] ساختار ساندویچی به‌وسیله ورق‌های فلزی که توسط جوش‌های منقطع به هم متصل شده بودند را مورد مطالعه قرار دادند. ژانگ و سان^[10] در مورد استفاده از حالت ضخامت برشی در ساختارهای ساندویچی با مواد پیژوالکتریک، تحقیقاتی انجام دادند. داتوما و همکاران^[11] نیز



شکل ۲) فوم پلی‌اورتان در قالب

این وسیله امکان ایجاد بلوک‌های مستطیل‌شکل دقیق با سطح صاف را فراهم کرد. به دلیل اینکه فوم‌ها انعطاف‌پذیر هستند و مدول یانگ پایینی دارند، به راحتی داخل یک قالب مستطیلی، از سه بعد متراکم شدند. برای دستیابی به فوم با ابعاد بزرگ، نیاز شد تا تراکم‌سازی در ۴ مرحله انجام گیرد.

طی بررسی‌های تجربی، برای یک فوم معمولی که دارای ابعاد اولیه $30 \times 160 \times 240$ میلی‌متر است، چهار مرحله برای متراکم‌سازی آن لازم است. در مرحله اول ابعاد به $230 \times 150 \times 25$ میلی‌متر کاهش می‌یابد، سپس به $220 \times 140 \times 20$ میلی‌متر می‌رسد و در مرحله بعدی به $210 \times 130 \times 15$ میلی‌متر کاهش پیدا می‌کند و در نهایت به $200 \times 120 \times 10$ میلی‌متر کاهش می‌یابد. این روش یک نسبت متراکم‌سازی کلی ۴:۳ را به دست می‌دهد. برای هر یک از چهار مرحله، چهار قالب همراه درپوش با ابعاد متناظر ساخته شد.

کل مجموعه مونتاژ شد. سپس در کوره پیش‌گرم شد و در دمای 180°C درجه سانتی‌گراد و به مدت ۳۰ دقیقه به منظور تنظیم کردن پیکربندی جدید، قرار گرفت (شکل ۳). مدت زمان حرارت‌دهی بسیار بحرانی است، زیرا دمای انتقال فوم از دمای کوره حاصل نمی‌شود. سپس قالب از کوره خارج و در دمای اتاق سرد شد. بعد از سرد شدن بلوک در دمای اتاق، مجموعه مونتاژ از هم باز شدند و در نهایت فوم از قالب خارج شده و به آرامی در سه جهت متعام کشیده شد تا بر چسبندگی دنده‌های سلول غلبه شود. به این ترتیب با انجام عملیات حرارتی با مراحل مختلف متراکم‌سازی، فوم پلی‌اورتان معمولی به فوم اکستیک با نسبت پواسون منفی تبدیل شد.



شکل ۳) نمونه قرارداده شده در کوره

باید توجه داشت که دمای مورد استفاده برای ایجاد حرارت در روش متراکم‌سازی مرحله‌ای، در نمونه با ابعاد بزرگ‌تر در مقایسه با دمای مورد استفاده برای تبدیل نمونه کوچک‌تر، کمتر است که به این دلیل

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، تاکنون گزارشی مبنی بر ساخت نمونه‌های پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک و رویه چهار لایه کربن و مقایسه آن با پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی به منظور دستیابی به خواص مکانیکی نمونه‌ها، صورت نگرفته است. بنابراین آزمایش‌هایی از جمله آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای، آزمایش فشار لبه‌ای، آزمایش ضربه شاریپی، آزمایش فشار مسطح و ضربه سرعت پایین روی مواد انجام شد. با استفاده از مقادیر به دست آمده در هر یک از آزمایش‌ها، هر دو پنل مورد مقایسه قرار گرفتند. در فرآوری ساخت فوم اکستیک باید توجه داشت که مدت زمان حرارت‌دهی بحرانی و همچنین فرآیند ساخت چند مرحله‌ای بسیار حائز اهمیت است. نتایج به خوبی نشان داد که پنل با فوم اکستیک نسبت به پنل با فوم معمولی دارای خواص مکانیکی بهتری در شرایط مختلف کارکرد است.

روش بومی و ساده ساخت با در نظر گرفتن دمای بحرانی به دست آمده در خلال این آزمایش و همچنین استفاده از رویه کربنی و برخی تست‌های مکانیکی انجام‌شده را می‌توان از نوآوری‌های این مقاله برشمرد.

۲- ساخت نمونه پنل ساندویچی

پلی‌اورتان، فوم سیکی است که از ترکیب پلی‌یول و ایزوسیانات در شرایط خاص و در حضور کاتالیزور تولید می‌شود [15]. در این نوع فوم، بیشتر شکاف‌ها بسته شده و به همین دلیل بازده بسیار خوبی به عنوان عایق حرارتی دارد. این فوم در هر چگالی مورد نیاز قابل تولید است. برای رسیدن به مقاومت حرارتی و ظرفیت بارگذاری مطلوب، چگالی آن می‌بایست بین 40 تا 42 کیلوگرم بر متر مکعب باشد. حداکثر دمای عملکرد پلی‌اورتان 70 تا 80 درجه سانتی‌گراد است. این فوم تا دمای 100 تا 110 درجه نیز استحکام خود را از دست نمی‌دهد، ولی در دمای بالاتر از آن تجزیه می‌شود.

الیاف کربن یکی از پرکاربردترین الیاف‌ها در صنعت است و در تولید انواع مواد مرکب استفاده می‌شود. این الیاف ضریب ارتجاعی نسبتاً بالایی در مقایسه با الیاف شیشه و کولار دارد. ضریب انبساط گرمایی این نوع الیاف‌ها در دماهای متفاوت کم است که این مساله باعث پایداری اندازه الیاف‌های کربن در دماهای مختلف می‌شود.

برای ساخت رویه پنل ساندویچی از چهار لایه مواد مرکب تقویت‌شده با الیاف کربن 200 gm استفاده شده است. همچنین رزین اپوکسی و ماده سخت‌کننده مورد استفاده در ساخت پنل، طبق مرجع [21] استفاده شده است. به منظور ساخت فوم اکستیک در این مقاله از دستگاه کوره فن آزما گستر (Fan Azma Gostar) استفاده شده است.

با انجام بررسی‌های لازم، یک روش کارآمد برای ساخت فوم اکستیک شناسایی و نمونه‌ای از آن ساخته شد. برای تبدیل یک فوم پلی‌اورتان معمولی به فوم اکستیک، ابتدا تمامی فوم‌های پلی‌اورتان استفاده‌شده در این کار به وسیله یک گرمکن برقی مخصوص برش فوم، در ابعاد $30 \times 16 \times 24$ ، برش داده شدند (شکل ۲).



شکل ۴) مواد مرکب تقویت شده با الیاف کربن

۳- آزمایش‌های تجربی

آزمایش‌های مختلفی برای تغییر خواص مکانیکی مواد در مقالات مختلف ارایه شده است. در این تحقیق به منظور به دست آوردن خواص مکانیکی نمونه‌های پنل ساندویچی ساخته شده از تست فشار، خمش و فشار مسطح توسط دستگاه کشش HOUNSFEILD (H25KS) استفاده شده است. برای انجام آزمایش ضربه سرعت بالا روی نمونه‌های پنل ساندویچی از دستگاه ضربه شاریپی SIT200B با ظرفیت ۳۰۰ ژول ساخت شرکت سنتام استفاده شده است. آزمایش ضربه افتان نیز روی نمونه‌های پنل ساندویچی توسط دستگاه ضربه با سرعت پایین موجود در آزمایشگاه مرکز مواد مرکب، در دانشگاه علم و صنعت ایران انجام گرفته است. به طور کلی برای انجام هر یک از آزمایش‌های خمش، فشار لبه‌ای، ضربه شاریپی، فشار مسطح و ضربه افتان از ۳ نمونه استفاده شده است و در نهایت میانگین نتایج مورد بحث قرار گرفته است. اندازه نمونه‌ها طبق استانداردهای اشاره شده در هر کدام از آزمایش‌ها است. کدهایی به منظور شناسایی نوع نمونه‌ها و آزمایش‌ها به کار رفته است (جدول ۱). نمونه‌های استفاده شده به همراه کد آنها در جدول ۲ معرفی شده است. به عنوان مثال، کد زیرمعرف یک نمونه پنل ساندویچی با هسته فوم پلی‌اورتان و رویه‌ای متشکل از چهار لایه الیاف کربن به شماره ۰۱ است که تحت آزمایش خمش قرار گرفته است.

است که مدت زمان حرارت‌دهی قالب بزرگ‌تر، بسیار طولانی‌تر از روش تک مرحله‌ای است.

علاوه بر دمای حرارت‌دهی، زمان حرارت‌دهی (که تعیین می‌کند چه مدت زمانی فوم در دمای خمیری باقی بماند) فاکتور سودمند دیگری است که تاثیر مستقیم در نتایج ساخت می‌گذارد. تحت شرایط بارگذاری استاتیکی خارجی، یک تاثیر قابل ملاحظه از قرارگرفتن مداوم در معرض دمای بالا، ایجاد تغییر شکل دائمی در فوم منبسط شده، است. پس از حرارت‌دهی در مرحله خمیری شدن، تنش فوم به آرامی به صفر می‌رسد؛ بنابراین یک فوم معمولی با ساختار سلول بیرونی می‌تواند به یک فوم اکستیک با ساختار سلول داخلی تبدیل شود. این اتفاق، شبیه به ساختن فنر از یک مفتول آهنی است. آزمایش‌ها نشان دادند که اگر زمان حرارت‌دهی خیلی کم باشد، فوم نمی‌تواند کنترل شود؛ به عبارت دیگر بعد از اینکه فوم از قالب خارج می‌شود، چون تنش‌های داخلی به آرامی از بین نرفته‌اند، به سرعت منبسط می‌شود و اندازه قبلی خود را پیدا می‌کند. از سوی دیگر اگر زمان حرارت‌دهی زیاد شود، فوم ذوب خواهد شد به طوری که دندانه‌های سلول به یکدیگر می‌چسبند و با فوم ممکن است تجزیه شود. به منظور به حداکثر رساندن آرام‌سازی تنش و به حداقل رساندن چسبیده شدن و فروریختن ساختار، ایجاد زمان حرارت‌دهی صحیح بسیار مهم است.

پس از تهیه الیاف کربن با مشخصات ذکر شده در مباحث قبلی، ۴ لایه الیاف کربن ۲۰۰ گرمی توسط رزین اپوکسی روی هم قرار گرفت. به این صورت که در ابتدا یک لایه نازک از رزین روی لایه‌ای از الیاف قرار گرفت. سپس لایه دوم از الیاف روی آن قرار گرفت. این مراحل برای لایه‌های بعدی نیز به همین صورت تکرار شد. به مخلوط الیاف و رزین در دمای اتاق زمان داده شد تا خشک شود. در نهایت رویه متشکل از چهار لایه مواد مرکب تقویت شده با الیاف کربن برای ساخت پنل ساندویچی طبق شکل ۴ فراهم شد.

برای ساخت پنل ساندویچی، هسته و رویه توسط رزین اپوکسی به هم متصل شدند؛ به این صورت که ابتدا سطح بالای هسته و سطح پایین رویه به لایه نازک رزین آغشته شده و پس از خشک شدن آن، این عمل برای رویه پایینی نیز انجام گرفت.

جدول ۱) معرفی کد نمونه‌ها

علامت	تعریف
C	الیاف کربن (Carbon Wrap)
A	فوم اکستیک (Auxetic Foam)
C	فوم معمولی (Conventional Foam)
PU	پلی‌اورتان (Polyurethane)
B	آزمایش خمش (Bending Test)
EC	آزمایش فشار لبه‌ای (Edgewise Compression Test)
DSH	آزمایش ضربه شاریپی (Charpy Impact Test)
FC	آزمایش فشار مسطح (Flatwise Compression Test)
DW	آزمایش ضربه (Drop Weight Test)
01	شماره نمونه تحت آزمایش (Number)

ابعاد نمونه برحسب میلی‌متر			کد نمونه	نوع پنل ساندویچی	نوع آزمایش
طول	عرض	ضخامت			
۱۶۴	۳۱/۲	۱۱/۷	C-CPU-C-B-01	رویه الیاف کربن هسته فوم پلی‌اورتان	آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای
۱۶۴	۳۱	۱۱/۷	C-CPU-C-B-02		
۱۶۳	۳۱	۱۱/۷	C-CPU-C-B-03		
۱۶۳/۲	۳۰	۱۱/۷	C-APU-C-B-01	رویه الیاف کربن هسته فوم اکستیک	
۱۶۴	۳۱	۱۲	C-APU-C-B-02		
۱۶۴	۳۱	۱۲	C-APU-C-B-03		
۵۰/۲	۵۰/۸	۱۲	C-CPU-C-EC-01	رویه الیاف کربن هسته فوم پلی‌اورتان	آزمایش فشار لبه‌ای
۵۰/۳	۵۰/۸	۱۲	C-CPU-C- EC -02		
۵۰/۶	۵۰/۸	۱۲	C-CPU-C- EC -03		
۵۰/۸	۵۰/۸	۱۲	C-APU-C- EC -01	رویه الیاف کربن هسته فوم اکستیک	
۵۰/۶	۵۱/۰۳	۱۲	C-APU-C- EC -02		
۵۰/۶	۵۱/۰۳	۱۲	C-APU-C- EC -03		
۷۰/۳	۱۰/۷	۱۲	C-CPU-C-DSH-01	رویه الیاف کربن هسته فوم پلی‌اورتان	آزمایش ضربه شارپی
۷۰/۵	۱۰/۷	۱۲	C-CPU-C- DSH -02		
۷۰/۲	۱۰/۵	۱۲	C-CPU-C- DSH -03		
۷۰/۲	۱۰/۳	۱۲	C-APU-C- DSH -01	رویه الیاف کربن هسته فوم اکستیک	
۷۰	۱۰/۴	۱۲	C-APU-C- DSH -02		
۷۰/۴	۹/۸	۱۲	C-APU-C- DSH -03		
۳۰/۴۷	۳۰/۲۹	۱۲	C-CPU-C-FC- 01	رویه الیاف کربن هسته فوم پلی‌اورتان	آزمایش فشار مسطح
۳۰/۳۷	۳۰/۱۶	۱۲	C-CPU-C-FC- 02		
۳۰/۴۱	۳۰/۲۰	۱۲	C-CPU-C-FC- 03		
۳۰/۱۴	۳۰/۵	۱۲	C-APU-C-FC- 01	رویه الیاف کربن هسته فوم اکستیک	
۲۹/۹۵	۳۰/۲۴	۱۲	C-APU-C-FC- 02		
۳۰/۳۴	۳۰/۳۴	۱۲	C-APU-C-FC- 03		
۱۰۰/۳	۱۰۰/۷	۱۲	C-CPU-C-DW- 01	رویه الیاف کربن هسته فوم پلی‌اورتان	آزمایش ضربه افتان
۹۹/۲	۱۰۰/۵	۱۲	C-CPU-C-DW- 02		
۱۰۰	۱۰۰/۲	۱۲	C-CPU-C-DW- 03		
۹۹	۱۰۰/۴	۱۲	C-APU-C-DW- 01	رویه الیاف کربن هسته فوم اکستیک	
۱۰۰/۴	۱۰۰/۶	۱۲	C-APU-C-DW- 02		
۱۰۰	۱۰۰/۷	۱۲	C-APU-C-DW- 03		

۴- نتایج و بحث

آزمایش‌های مکانیکی که در این پژوهش انجام شده است با توجه به بررسی‌های انجام‌شده به پنج دسته زیر تقسیم می‌شود:

- ۱- آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای (Three-Point Flexural Test)؛
 - ۲- آزمایش فشار لبه‌ای (Edgewise Compression Test)؛
 - ۳- آزمایش ضربه شارپی (Charpy Impact Test)؛
 - ۴- آزمایش فشار مسطح (Flatwise Compression Test)؛
 - ۵- آزمایش ضربه افتان (Drop-Weight Impact Test)؛
- که در ادامه به شرح این آزمایش‌ها و نتایج آنها می‌پردازیم.

۴-۱- آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای روی پنل ساندویچی

این آزمایش به محاسبه مقادیر مدول الاستیسیته خمشی، تنش خمشی، کرنش خمشی و پاسخ تنش-کرنش خمشی ماده می‌پردازد. مطابق استاندارد ASTM C393 [22] نمونه‌های مستطیلی از فوم معمولی پلی‌اورتان و فوم اکستیک به‌عنوان هسته پنل ساندویچی با ابعاد ۱۶۴×۳۱×۱۲ میلی‌متر برش داده شد و برای آزمایش آماده

شدند. نمونه‌ها بین سه نقطه به‌منظور اعمال نیروی خمشی واقع شدند. فاصله بین دو تکیه‌گاه ۱۳۰ میلی‌متر تنظیم شد. اندازه قطر استوانه‌های تکیه‌گاهی برابر با ۱۲ میلی‌متر بود و سرعت پایین‌آمدن فک بالایی برابر با ۴ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شده است. منحنی تغییر شکل تحت تاثیر افزایش بار برای پنل ساندویچی در هر دو حالت فوم معمولی و فوم اکستیک در نمودار ۱ مشاهده می‌شود. زمانی که پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی تحت بار خمشی قرار گرفت، به دلیل نرم‌بودن و انعطاف‌پذیری بیش از حد هسته، در ابتدا نیرو به شکل بار گسترده در تمامی سطح نمونه به‌صورت یکنواخت پخش شد. با افزایش نیرو، مقاومت پنل ساندویچی در برابر بار اعمالی نیز افزایش یافت تا جایی که با واردکردن نیروی ۷۰ نیوتن روی سطح رویه بالایی، یک ترک کوچک ایجاد شد و رویه بالایی به علت مقاومت کم هسته در برابر نیروی اعمالی، به رویه سطح پایین چسبید. با افزایش نیرو، ترک‌های بسیار ریزی در رویه بالایی ایجاد شد، اما به دلیل مقاومت الیاف کربن، ترک‌ها افزایش

پارامترهای به کار گرفته	پنل ساندویچی با فوم معمولی	پنل ساندویچی با فوم اکستیک
τ تنش برشی هسته (MPa)	۰/۱۰۶	۰/۱۴۵
σ تنش خمشی رویه (MPa)	۶/۹۱	۹/۴۵
P بار نهایی (N)	۷۲/۵	۹۹/۱۶
b پهنای پنل ساندویچی (mm)	۳۱	۳۱
c ضخامت هسته (mm)	۱۰	۱۰
d ضخامت پنل ساندویچی (mm)	۱۲	۱۲
L فاصله بین دو تکیه‌گاه (mm)	۱۳۰	۱۳۰
t ضخامت رویه (mm)	۱	۱

بر اساس استاندارد به کار گرفته شده، تنش برشی هسته و تنش خمشی رویه از روابط ۱ و ۲ به دست می‌آیند:

$$\tau = \frac{P}{(d+c)b} \quad (۱)$$

$$\sigma = \frac{PL}{2t(d+c)b} \quad (۲)$$

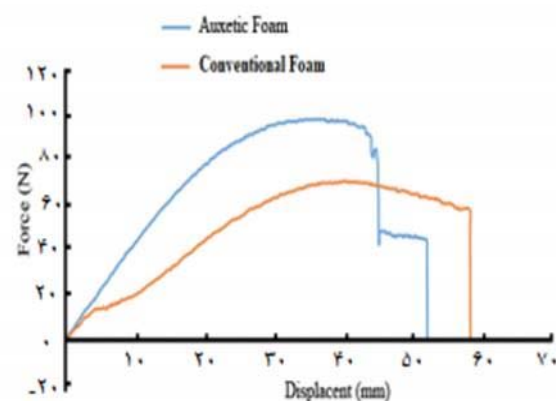
که τ تنش برشی هسته، σ تنش خمشی رویه، P بار نهایی، b پهنای پنل ساندویچی، c ضخامت هسته، d ضخامت پنل ساندویچی، L فاصله بین دو تکیه‌گاه و t ضخامت رویه هستند. نتایج این آزمایش نشان داد که تغییر شکل پنل با هسته فوم اکستیک نسبت به پنل با هسته فوم معمولی، به طور قابل توجهی کمتر است. به این دلیل که مواد اکستیک دارای ضریب پواسون منفی بوده و دارای دامنه تغییر شکل بالاتری نسبت به مواد دیگر هستند. همچنین با جایگذاری اعداد به دست آمده در روابط بالا، مشخص شد که تنش برشی هسته پنل ساندویچی با فوم اکستیک نسبت به پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی کمتر است. همچنین تنش خمشی رویه با هسته فوم اکستیک نسبت به پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی کاهش یافت. در شکل ۵-ا، تصویر پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی تحت بار خمش سه نقطه‌ای (چسبیدن رویه بالای به رویه پایینی) و در شکل ۵-ب، آزمایش خمش سه نقطه‌ای روی پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک (رویه بالای با اعمال نیرو دچار شکست کامل شد و رویه پایینی تحت کشش قرار گرفت) نشان داده شده است.



شکل (۵) آزمایش خمش سه نقطه‌ای روی پنل ساندویچی با هسته a: فوم معمولی و b: فوم اکستیک

پیدا نکرد و به همین دلیل بخش اعظم نیرو توسط پوسته پایینی تحمل شد. این شرایط تا زمانی که تعدادی ترک روی سطح پوسته پایینی ایجاد شود، ادامه داشت. در مقابل، هنگامی که پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک تحت بار خمشی قرار گرفت، در ابتدا رویه بالایی این نیرو را تحمل کرد و با نیروی حدود ۹۰ نیوتن اولین ترک در سطح پوسته بالایی ایجاد شد و با افزایش نیرو، تعداد ترک‌ها بر رویه بیشتر شد. سپس مقاومت آن کاهش پیدا کرد و نیرو به هسته و رویه پایینی انتقال یافت. به دلیل مقاومت بالای هسته، پنل در برابر نیروی وارده مقاومت کرد تا لحظه‌ای که مقاومت خود را از دست داد و ترک‌هایی در رویه پایینی ایجاد شد. بیشترین مقاومتی که پنل با فوم اکستیک تحمل کرد در مقابل نیروی ۹۹ نیوتن بود.

به این ترتیب استحکام پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک، به دلیل جنس هسته و مقاومت بالای آن در برابر نیروی اعمالی، نسبت به پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی افزایش یافت. در جدول ۳ نتایج مقایسه رفتار پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی و فوم اکستیک تحت اعمال بار خمشی سه نقطه‌ای آورده شده است و پارامترهای به کار گرفته شده، برای مقایسه در روابط تست خمش سه نقطه‌ای، در جدول ۴ ذکر شده است.



نمودار (۱) مقایسه نمودار نیرو-جابجایی پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی و فوم اکستیک تحت بار خمشی سه نقطه‌ای

جدول (۳) رفتار پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی و فوم اکستیک تحت اعمال بار خمشی سه نقطه‌ای

پارامترهای بررسی شده	پنل ساندویچی فوم معمولی	پنل ساندویچی فوم اکستیک
بیشترین بار اعمال شده (N)	۷۲/۵	۹۹/۱۶
مقدار جابجایی در رسیدن به بار نهایی (mm)	۴۲	۳۶
مقدار نیرو در اولین ترک ایجاد شده بر رویه بالایی (N)	۶۰	۸۶
مقدار نیرو در اولین ترک ایجاد شده بر رویه پایینی (N)	۷۰	۷۷
حداکثر جابجایی نمونه تحت اعمال نیرو (mm)	۵۷/۲	۵۱/۹۳

۴-۲- آزمایش فشار لبه‌ای روی پنل ساندویچی

هدف این آزمایش بررسی خواص مکانیکی و رفتار ساختاری تحت فشار و بررسی تغییر شکل ارتجاعی و پلاستیک در شرایط ساده است. در این آزمایش که به فشار داخل صفحه‌ای نیز معروف است، قطعه بین دو فک مخصوص قرار گرفته و لبه‌های پنل تحت فشار قرار می‌گیرند (شکل ۶). بر خلاف فشار مسطح، در این آزمایش، رفتار پوسته با توجه به جنس و ضخامت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این آزمایش طبق استاندارد ASTM C364-99 [23] انجام شده است. برای انجام این آزمایش نمونه‌های مربع‌شکلی از فوم معمولی پلی‌اورتان و فوم اکستیک به‌عنوان هسته پنل ساندویچی با ابعاد $10 \times 30 \times 30$ میلی‌متر برش داده شده و برای آزمایش آماده شدند. ابعاد قطعات مورد آزمایش با ذکر کد آنها در جدول ۲ آورده شده‌اند. نمونه‌ها توسط دستگاه HOUNSFIELD (H25KS) تحت آزمایش فشار لبه‌ای قرار گرفتند و میزان جابجایی اندازه‌گیری شد. منحنی تغییر شکل تحت تاثیر افزایش بار در نمودار ۲ مشاهده می‌شود. رفتار پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی و فوم اکستیک تحت اعمال بار فشار سطح در جدول ۵ مقایسه شده است.

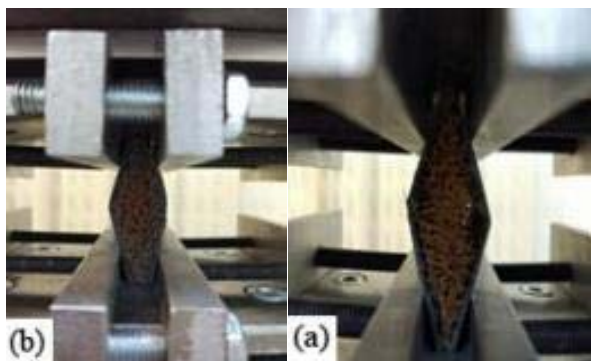


شکل ۶) آزمایش فشار لبه‌ای روی پنل ساندویچی

جدول ۵) مقایسه رفتار پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی و فوم اکستیک تحت آزمون بار فشار لبه‌ای

پارامترهای بررسی‌شده	پنل ساندویچی با فوم معمولی	پنل ساندویچی با فوم اکستیک
بیشترین میزان بار اعمال‌شده (N)	۶۴۸۳	۴۸۵۲
مقدار جابجایی در رسیدن به بار نهایی (mm)	۱	۱/۸
حداکثر جابجایی (mm)	۴/۸۳	۴/۹۳

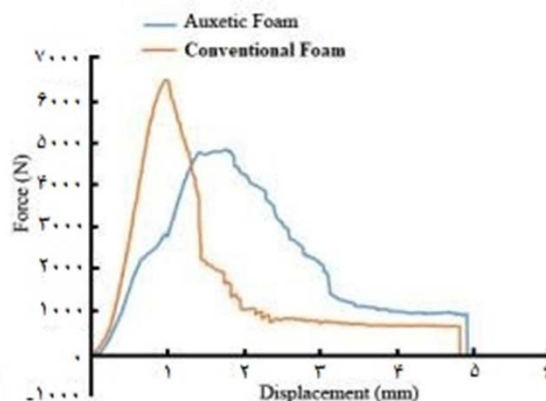
در شکل ۷- a، تصویر پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی تحت بار فشار لبه‌ای، نشان داده شده است. نمونه در هنگام اعمال نیرو، بشکه‌ای‌شکل شد که شکست از قسمت میانی رویه آغاز و با زاویه تیزی شروع به خم‌شدن و پاره‌شدن سلول‌های فوم از یکدیگر کرده است. شکل ۷- b نیز پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک تحت بار فشار لبه‌ای را نشان می‌دهد. نمونه در هنگام اعمال نیرو، بشکه‌ای‌شکل شد. شکست از قسمت میانی رویه آغاز و به علت خواص اکستیک خم‌شدن نمونه با زاویه تیز نبوده و به شکل انحنای شروع به خم‌شدن کرده است و در نتیجه پنل در این شرایط جابجایی بیشتری را داشته است. علت نتایج بالا این است که مواد اکستیک دارای ضریب پواسون منفی هستند که دامنه تغییر شکل بالاتر و در نتیجه مقاومت به شکست بیشتری دارند.



شکل ۷) پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی (a) و فوم اکستیک (b) تحت بار فشار لبه‌ای

۴-۳- آزمایش ضربه شارپی روی پنل ساندویچی

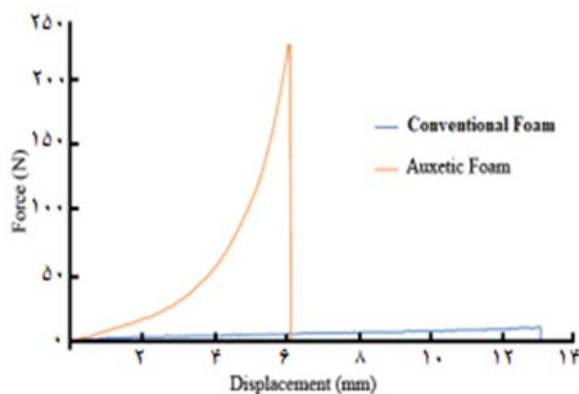
این آزمایش مربوط به بررسی میزان چقرمگی شکست دینامیکی و بازدهی ترمیم متعلق به نمونه است. آزمایشی که در آن تعداد هسته‌ها در افزایش استحکام سازه مؤثر است. این آزمایش توسط دستگاه ضربه شارپی SIT200B انجام شد. نمونه بین دو تکیه‌گاه مخصوص قرار گرفت. در این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D256-02 [24] نمونه‌های مستطیل‌شکل از فوم معمولی و فوم اکستیک با ابعاد $12 \times 11 \times 70$ میلی‌متر برش داده شد و به‌عنوان هسته پنل ساندویچی برای آزمایش آماده شدند. هندسه نمونه‌ها پس از انجام آزمایش در شکل ۸ مشاهده می‌شود.



نمودار ۲) مقایسه نمودار نیرو- جابجایی پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی و فوم اکستیک تحت آزمون بار فشار لبه‌ای

نمونه‌ها در دستگاه HOUNSFIELD (H25KS) تحت فشار قرار گرفتند. در این آزمایش می‌توان استحکام و مدول فشاری هسته را اندازه‌گیری کرد. طبق این استاندارد سرعت فک‌ها باید ۵/۰ میلی‌متر بر دقیقه باشد. منحنی تغییر شکل تحت تاثیر افزایش بار در نمودار ۳ مشاهده می‌شود.

پارامترهایی از این آزمایش مورد بررسی قرار گرفته و در جدول ۶ آورده شده است.



نمودار (۳) مقایسه نمودار نیرو - جابجایی پنل ساندویچی با فوم معمولی و فوم اکستیک تحت بار فشاری مسطح

جدول (۶) مقایسه رفتار پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی و فوم اکستیک تحت اعمال بار فشاری مسطح

پنل ساندویچی با فوم اکستیک	پنل ساندویچی با فوم معمولی	پارامترهای بررسی شده
۲۳۵	۱۰/۸۳	بیشترین میزان بار اعمال شده (N)
۶/۱۴	۱۳/۰۶	حداکثر جابجایی در رسیدن به بار نهایی (mm)
۸/۳۳	۱	شیب قسمت خطی اولیه منحنی بار (N/mm)

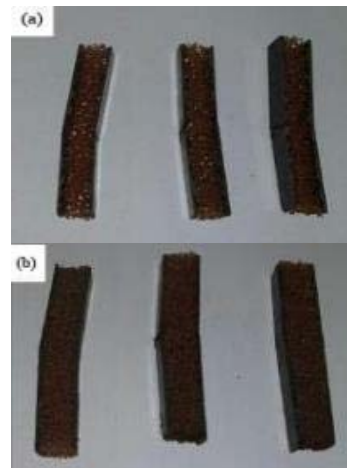
بر اساس استاندارد به کار گرفته شده، مقاومت و مدول فشاری از روابط ۳، ۴ و ۵ به دست می‌آیند:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (۳)$$

$$E = \frac{St}{A} \quad (۴)$$

$$S = \frac{\Delta P}{\Delta u} \quad (۵)$$

که σ مقاومت فشاری، P بار نهایی، A سطح مقطع، E مدول فشاری هسته، S شیب قسمت خطی اولیه منحنی بار، t ضخامت هسته، ΔP اختلاف نیروی اعمال شده در یک بازه زمانی معین و Δu اختلاف جابجایی طی شده در یک بازه زمانی معین هستند. مقادیر متغیرهای به کاررفته در روابط فوق برای تست فشار مسطح در جدول ۷ مشخص شده است.



شکل (۸) نمونه‌ها پس از آزمایش ضربه شارپی پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی (a) و فوم اکستیک (b)

ضربه توسط پاندول دستگاه به نمونه اعمال شد و میزان نیروی جذب شده، اندازه‌گیری شد. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، نمونه‌های پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی در هر دو رویه با شکست مواجه شدند. هنگام برخورد پاندول دستگاه به نمونه پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک، ابتدا رویه مقابل پاندول به صورت کامل دچار شکست شد، اما هسته نیروی وارده را جذب کرد و سپس نیروی وارد شده را به رویه انتهایی انتقال داد. در نهایت در رویه‌های این نوع پنل، خمش و کشیدگی ایجاد شد. از مقایسه نتایج به دست آمده از پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی و اکستیک تحت اعمال ضربه شارپی، پنل با هسته فوم اکستیک، جذب انرژی بیشتری (۲/۳ ژول) نسبت به پنل با هسته فوم معمولی (۱/۶ ژول) دارد. علت این امر را می‌توان در نسبت پواسون منفی و در نتیجه دارابودن دو انحنا در طرفین به صورت متقارن برای فوم اکستیک در هنگام اعمال نیرو دانست.

۴-۴- آزمایش فشار مسطح بر روی پنل ساندویچی

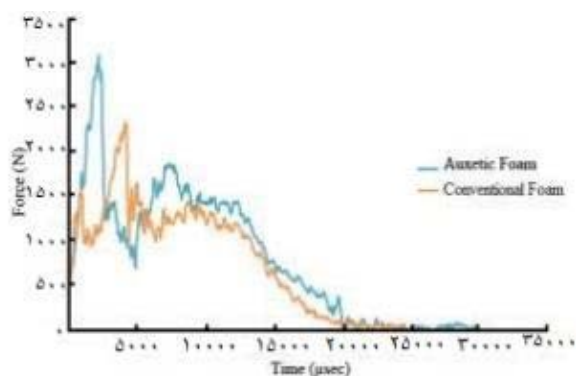
در این آزمایش از دو طرف به نمونه فشار وارد می‌شود و هدف آن اندازه‌گیری متغیرهایی نظیر کرنش و تنش و تغییر شکل نمونه در اثر نیروی فشاری است. به منظور انجام این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C365-03 [25]، نمونه‌های مربعی از فوم معمولی پلی‌اورتان و فوم اکستیک به عنوان هسته پنل ساندویچی با ابعاد ۳۰×۳۰×۱۲ میلی‌متر بریده شد و برای آزمایش آماده شد. تصویری از قطعه در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل (۹) آزمایش فشار مسطح روی پنل ساندویچی

پارامترهای به کاررفته	پنل ساندویچی با فوم معمولی	پنل ساندویچی با فوم اکستیک
σ مقاومت فشاری (MPa)	۰/۰۱۲	۰/۲۶۱
P بار نهایی (N)	۱۰/۸۳	۲۳۵
A سطح مقطع (mm^2)	۹۰۰	۹۰۰
E مدول فشاری هسته (MPa)	۰/۰۱۱	۰/۰۹۲
S شیب قسمت خطی اولیه منحنی بار (N/mm)	۱	۸/۳۳
t ضخامت هسته (mm)	۱۰	۱۰

عمق نفوذ در این پنل به مراتب بیشتر بوده است. در شکل ۱۱- b پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک در اصابت با ضربه افتان روی پنل، نشان داده شده است. در این پنل، لایه‌های الیاف کربن مجاور محل ضربه از هم گسیخته می‌شود، ولی به علت مقاومت بهتر هسته، تاثیر ضربه و عمق نفوذ آن روی این پنل نسبت به پنل با هسته فوم معمولی کمتر است.



نمودار ۴) مقایسه نمودار نیرو- زمان پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی و اکستیک تحت اعمال بار ضربه

جدول ۸) مقایسه رفتار پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی و اکستیک تحت اعمال بار ضربه

پارامترهای بررسی شده	پنل ساندویچی با هسته معمولی	پنل ساندویچی با هسته اکستیک
حداکثر میزان بار اعمال شده (N)	۲۰۶۰	۲۳۲۰
حداکثر زمان رسیدن به بار نهایی (μsec)	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰



شکل ۱۱) پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی (a) و اکستیک (b) تحت بار ضربه

۵- نتیجه‌گیری

فرآیند تولید فوم اکستیک شرح داده شد. با تهیه مواد اولیه از جمله فوم پلی‌اورتان، تجهیزات آزمایشگاهی و انجام عملیات حرارتی به همراه متراکم‌سازی، فومی از جنس اکستیک ساخته شد. آزمایش‌های مختلفی از جمله آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای، فشار لبه‌ای، آزمایش ضربه شارپی، آزمایش فشار مسطح و ضربه افتان

نتایج به دست آمده از آزمایش فشار مسطح نشان داد که مدول فشاری پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک ۸/۴ برابر مدول پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی است. همچنین مقاومت فشاری آن به دلیل خاصیت اکستیک بودن در حدود ۲۰ برابر مقاومت پنل ساندویچی با هسته از جنس معمولی به دست آمد.

۴-۵) آزمایش ضربه افتان بر روی پنل ساندویچی

به منظور انجام این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D7136/D7136M-15 [26] نمونه‌های مربعی از پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی و فوم اکستیک با ابعاد $100 \times 100 \times 12$ میلی‌متر آماده شدند. تصویری از آزمایش ضربه در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰) آزمایش ضربه روی پنل ساندویچی

با استفاده از دستگاه تست ضربه با مشخصاتی که در مباحث قبلی به آن اشاره شد، آزمایش ضربه روی نمونه‌های پنل ساندویچی انجام شد. این دستگاه دارای یک گلوله فولادی است که به منظور بررسی مقاومت به ضربه پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک در مقایسه با فوم معمولی از فاصله ۵۰ سانتی‌متر روی سطح نمونه‌ها رها شد. منحنی مقاومت به ضربه پنل ساندویچی برای هر دو حالت فوم معمولی و فوم اکستیک در نمودار ۴ مشاهده می‌شود.

همان طور که از نتایج مشخص است، پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک، مقاومت به ضربه بیشتری از خود نشان داده است. در جدول ۸ مقایسه رفتار پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی و اکستیک تحت اعمال بار ضربه افتان آورده شده است.

پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی بر اثر اصابت ضربه افتان روی پنل، لایه‌های الیاف کربن از هم گسیخته شده و محل اثر آن شبیه یک طرح خورشیدی شده است (شکل ۱۱- a). در این حالت هسته تاثیر قابل توجهی در مقاومت در برابر ضربه از خود نشان نداده و

منابع

- 1- Fang H, Shi H, Wang Y, Qi Y, Liu W. Experimental and theoretical study of sandwich panels with steel facesheets and GFRP core. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016;Article ID 7159205.
- 2- Veronda DR, Westmann RA. Mechanical characterization of skin—finite deformations. *Journal of Biomechanics*. 1970;3(1):111-122.
- 3- Masters IG, Evans KE. Models for the elastic deformation of honeycombs. *Composite structures*. 1996;35(4):403-422.
- 4- Li Y. The anisotropic behavior of Poisson's ratio, Young's modulus, and shear modulus in hexagonal materials. *Physica Status Solidi (A)*. 1976;38(1):171-175.
- 5- Gibson LJ, Ashby MF, Schajer GS, Robertson CI. The mechanics of two-dimensional cellular materials. *Proceedings of the Royal Society A, Mathematical and Physical Sciences*. 1982;382(1782):25-42.
- 6- Lakes R. Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*. 1987;235(4792):1038-1040.
- 7- Evans KE. Auxetic polymers: A new range of materials. *Endeavour*. 1991;15(4):170-174.
- 8- Grima JN, Attard D, Gatt R, Cassar RN. A novel process for the manufacture of auxetic foams and for their re-conversion to conventional form. *Advanced Engineering Materials*. 2009;11(7):533-535.
- 9- Hayase M, Ecklund RC, Walkington RJ, Hughes JB, Williams NR, inventors. McDonnell Douglas Corp, assignee. Method of fabricating metallic sandwich structure. United States Patent US 4304821. 1981 Dec 8.
- 10- Zhang XD, Sun CT. Formulation of an adaptive sandwich beam. *Smart Materials and Structures*. 1996;5:814.
- 11- Dattoma V, Marcuccio R, Pappalettere C, Smith GM. Thermographic investigation of sandwich structure made of composite material. *NDT & E International*. 2001;34(8):515-520.
- 12- Ruzzene M, Scarpa F. Control of wave propagation in sandwich beams with auxetic core. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2003;14(7):443-453.
- 13- Abrate S. Modeling of impacts on composite structures. *Composite Structures*. 2001;51(2):129-138.
- 14- Chi Y, Langdon GS, Nurick GN. The influence of core height and face plate thickness on the response of honeycomb sandwich panels subjected to blast loading. *Materials & Design*. 2010;31(4):1887-1899.
- 15- Crupi V, Epasto G, Guglielmino E. Collapse modes in aluminium honeycomb sandwich panels under bending and impact loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2012;43:6-15.
- 16- Tan CY, Akil HM. Impact response of fiber metal laminate sandwich composite structure with polypropylene honeycomb core. *Composites Part B: Engineering*. 2012;43(3):1433-1438.
- 17- Uzer G, Ding Y, Chiang F. Auxetic foam as a core material for sandwich panels. *Proceedings of the SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics 2007*, Unknown Publisher; 2007.
- 18- Taghipoor H, Damghani Noori M. Experimental investigation of energy absorption in foam filled sandwich beams with expanded metal sheet as core under quasi-static bending. *Modares Mechanical Engineering*.

روی پنل انجام شد و خواص مکانیکی این پنل ساندویچی مورد ارزیابی قرار گرفت. از نتایجی که پس از انجام این آزمایش‌ها از این مقاله استخراج شده است موارد زیر حائز اهمیت هستند:

- ساخت یک نمونه کوچک اکستیک نیازمند زمان حرارت‌دهی کوتاه و نیروی متراکم‌سازی کم بوده در حالی که برای ساخت بلوک‌های فوم بزرگ‌تر نیاز به زمان حرارت‌دهی بیشتر و نیروی متراکم‌سازی زیادتر است.

- فرآیند ساخت چندمرحله‌ای، فرآیند تبدیل را به مراحل متعددی تقسیم می‌کند که خطر چروکیدگی سطح را کاهش می‌دهد و بنابراین روشی است که کنترل بیشتری روی فرآیند دارد.

- با تغییر در نسبت تراکم حجمی، مقادیر مختلفی از نسبت پواسون را برای فوم‌ها می‌توان ایجاد کرد.

- آزمایش خمش سه نقطه‌ای نشان داد که تحمل بار پانل ساندویچی با هسته فوم اکستیک نسبت به پنل با هسته فوم معمولی ۳۶/۸٪ بیشتر است. همچنین تغییر شکل روی پنل اکستیک نسبت به پنل معمولی، به‌طور قابل توجهی کمتر بود. تنش برشی هسته و تنش خمشی رویه نیز در پنل با هسته فوم اکستیک، مقادیر بیشتری داشت.

- در آزمایش فشار لبه‌ای پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک نسبت به پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی، در برابر نیروی اعمالی مقاومت بیشتری از خود نشان داد و دیرتر دچار شکست شد. - آزمایش ضربه شارپی نشان داد که جذب انرژی پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک ۴۳/۷٪ نسبت به پنل با هسته فوم معمولی بیشتر است.

- آزمایش فشار مسطح نشان داد که مدول فشاری پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک ۸/۴ برابر مدول پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی است. همچنین مقاومت فشاری آن به دلیل خاصیت اکستیک‌بودن هسته در حدود ۲۰ برابر مقاومت پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی شد.

- نتایج حاصل از آزمایش ضربه افتان نشان داد که مقاومت به ضربه در پنل ساندویچی با هسته فوم اکستیک نسبت به پنل ساندویچی با هسته فوم معمولی به میزان ۱۲/۶۲٪ بالاتر بود.

در نهایت با توجه به اینکه پنل‌های ساندویچی اکستیک در آزمون‌های مکانیکی اشاره‌شده، عملکرد بهتر و قابل توجهی را از خود نشان دادند، می‌توان گفت که جایگزین مناسبی برای پنل‌های ساندویچی با هسته فوم معمولی هستند و برتری قابل توجهی در کاربردهای مختلف دارند که تحقق این موضوع، مورد انتظار این پروژه بود.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسنده بیان نشد.

تابیدیه اخلاقی: موردی توسط نویسنده بیان نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسنده بیان نشد.

سهم نویسندگان: تمام امور توسط علی شهرجردی (۱۰۰٪) انجام شده است.

- 23- ASTM International. ASTM C364-99, Standard test method for edgewise compressive strength of sandwich constructions. West Conshohocken: ASTM International; 1999.
- 24- ASTM International. ASTM D256-02, Standard test methods for determining the izod pendulum impact resistance of plastics. West Conshohocken: ASTM International; 2002.
- 25- ASTM International. ASTM C365-03, Standard test method for flatwise compressive properties of sandwich cores. West Conshohocken: ASTM International; 2003.
- 26- ASTM International. ASTM D7136 / D7136M-15, Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event. West Conshohocken: ASTM International; 2015.
- 2018;18(3):126-134. [Persian]
- 19- Khondabi R, Khodarahmi H, Hosseini R, Zia Shamami M. Experimental and numerical study of core and face-sheet thickness effects in sandwich panels with foam core and aluminum face-sheets subjected to blast loading. Journal of Solid and Fluid Mechanics. 2018;8(3):91-106. [Persian]
- 20- Moharami S. Experimental analysis sandwich panel by auxetic foam core [Dissertation]. Tehran: K. N. Toosi University of Technology; 2014.
- 21- lavanpolymer.ir [Internet]. Tehran: Lavanpolymer; Unknown year [Unknown cited]. Available from: <http://www.lavanpolymer.ir>. [Persian]
- 22- ASTM International. ASTM C393 / C393M-16, Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure. Volume 15.03. West Conshohocken: ASTM International; 2016.