جلد 8، شماره 3، ص‌ص 1667-1659

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیت**

http://jstc.iust.ac.ir

بررسی تجربی استحکام اتصال بین هسته و لایه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری‌های کششی و برشی در روش‌های مختلف ساخت سازه‌های کامپوزیتی دارای هسته

علیرضا لزریوسفی[1]، بیژن محمدی[2*]، احسان عنبرزاده[3]

1- دانشجوی دکترا، مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* ایران، تهران، صندوق پستی: 1968936916، bijan_mohammadi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/08/27

پذیرش: 1400/11/27

کلیدواژگان

چندلایه‌های هسته‌دار ، هسته‌های لانه زنبوری، روش‌های ساخت، اتصال بین هسته و لایه‌ها

چکیده

هسته‌های لانه‌زنبوری در سازه‌های کامپوزیتی دارای هسته، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مسائل مهم به کارگیری هسته‌ها به خصوص لانه زنبوری‌ها، اطمینان از اتصال مناسب بین لایه‌های دو سمت سازه به هسته می‌باشد؛ چراکه عدم اتصال مناسب، منجر به جدایی لایه از هسته خواهد شد. هدف از این پژوهش، بررسی و پیشنهاد مناسب‌ترین روش برای ساخت قطعه کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری تحت استانداردهای ASTM C273 و ASTM C297 می‌باشد. از نتایج این پژوهش، دریافت شد که مناسب‌ترین راه برای ساخت یک قطعه کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری، روش ساخت دومرحله‌ای می‌باشد. چراکه در روش دومرحله‌ای با استفاده از دستگاه وکیوم، بعد از ایجاد خلأ در قطعه، رزین تا دیواره‌های هسته بالا می‌آید و اتصال بین هسته و لایه‌ها به‌خوبی برقرار می‌شود. ناحیه اتصال هسته با لایه‌ها در روش دومرحله‌ای دو برابر بیشتر از روش تک‌مرحله‌ای و روش ساخت دستی می‌باشد. به طوری که از تعداد 30 نمونه‌ای که برای هر یک از سه روش ساخت مذکور استفاده گردید، در روش دومرحله‌ای این جدایش در خود هسته لانه‌زنبوری در 28 نمونه از 30 نمونه رخ داد که نشان دهنده‌ی مناسب بودن این روش (جدایش مورد قبول با بیش از 90 درصد) می‌باشد. اما در روش تک مرحله‌ای و روش دستی به ترتیب 18 عدد از 30 نمونه و همچنین 9 عدد از 30 نمونه هسته دچار شکست در ناحیه هسته تحت آزمون کشش و برش شد.لازم به ذکر است که مفهوم روش دومرحله ای ، یک مرحله ای و روش دومرحله ای بدون وکیوم در متن مقاله توضیح داده شده است

Experimental study of bond strength between core and composite layers under tensile and shear loads in different methods of fabricating nucleate composite structures

Alireza Lazar Yousefi, Bijan Mohammadi*, Ehsan Anbarzadeh

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 19689-36916, Iran, Tehran, bijan_mohammadi@iust.ac.ir

Keywords

Nucleate sandwich panels, Honeycomb cores, Manufacturing methods, Connection between core and layers

Abstract

Honeycombs cores are widely used in nucleate composite structures. One of the important issues in using cores, especially honeycombs, is to ensure proper connection between the layers on both sides of the structure to the core; Because improper connection will lead to separating the layer from the core. The purpose of this study is to investigate and propose the most suitable method for making composite parts with honeycomb core under ASTM C273 and ASTM C297 standards. As a result, it was concluded that the most appropriate way to make a composite piece with honeycomb core is a two-step fabrication method. This is because in the two-stage method, using a vacuum device, after creating a vacuum in the part, the resin rises to the walls of the core and the connection between the core and the layers is established well. The area of connection of the core with the layers in the two-stage method is twice as large as the single-stage method and the manual construction method. So that out of 30 samples that were used for each of the three mentioned construction methods, in the two-stage method, this separation occurred in the honeycomb core itself in 28 samples out of 30 samples, which indicates the suitability of this method. (Separation is acceptable with more than 90%). However, in the one-step method and the manual method, 18 out of 30 samples and also 9 out of 30 core samples failed in the core area under the tensile and shear test, respectively.

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

Lazar Yousefi, A., Mohammadi, B., Anbarzadeh, E., “Experimental study of bond strength between core and composite layers under tensile and shear loads in different methods of fabricating nucleate composite structures”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1659-1667, 2022. https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.542940.1758

1-مقدمه

امروزه، استفاده از کامپوزیت‌ها[1] به طرز خیره کننده‌ای رو به افزایش است، چراکه بشر به وسعت کاربرد این سازه‌ها پی برده و لزوم استفاده از آن را درک نموده است. کامپوزیت‌ها از قرن‌ها پیش مورد استفاده قرار گرفته‌اند به طوری که تاریخ مشخصی به عنوان شروع استفاده از کامپوزیت ثبت نشده است [1]. در مصر باستان، آجرهای ساخته شده از گل و کاه برای محاصره و تقویت سازه‌های چوبی مانند قلعه‌ها و آثار تاریخی کشف شده است که به نوعی سازه کامپوزیتی محسوب می‌شوند [2]. در بخش‌هایی از آسیا، اروپا، آفریقا و قاره آمریکا، افراد بومی ساختارهایی از چوب (تخته یا نوارهای چوبی) و سرمه‌ای (ترکیبی از گل یا خاک، کاه، شن، آهک، یونجه و سایر مواد) می‌ساختند [3]. برخی از اولین اطلاعات ثبت شده بیانگر استفاده مصریان از تخته چندلا، خمیر کاغذ و استفاده از کاه، جهت بالا بردن مقاومت آجرهای گلی و همچنین ساخت کمان‌های تقویت شده از چوب، استخوان و چسب طبیعی می‌باشد که با پوست به هم پیچیده شده بود. در نتیجه این کمان‌ها بسیار قوی‌تر و دقیق‌تر از کمان-های چوبی ساده بودند [4]. در پنج هزار سال قبل از میلاد در خاورمیانه، اولین ماده کامپوزیت که در آن از پلیمر استفاده شده بود، برای قیر اندود کردن قایق‌ها استفاده شد. اسکیموها از خزه‌ها برای مقاوم کردن بلوک‌های یخی استفاده می‌کردند که آن را نیز نمونه‌ای از کامپوزیت می‌توان به حساب آورد [5]. تمدن بشر به طور چشم گیری تحت تاثیر فناوری مواد قرار گرفته و در حقیقت، بیشترین دوره توسعه فناوری با تغییر در کاربرد مواد همراه بوده است [6]. امروزه در کاربردهای مهندسی، اغلب به تلفیق خواص مواد، جهت ایجاد ماده ای با خصوصیات مورد نظر نیاز است و این در حالی است که مهم‌ترین مزیت مواد کامپوزیتی، کنترل خواص آن می‌باشد [7]. کامپوزیت‌ها متشکل از چند ماده هستند که خواص آن‌ها در مجموع از هر کدام از مواد سازنده اولیه بهتر می‌باشد، زیرا کارایی یکدیگر را بهبود می‌بخشند. عموماً کامپوزیت را برای به دست آوردن خواص مهندسی بهتر، از جمله سفتی بالاتر، استحکام بیشتر، وزن کمتر، مقاومت در برابر حرارت، رطوبت و خوردگی که در مواد همگن همچون فلزات، نمی‌توان همگی این خواص را در کنار یکدیگر داشت، در طراحی‌ها استفاده می‌کنند [8]. ابتدا این مواد را به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی و زنگ‌زدگی، وزن سبک برای بدنه و قاب هواپیماها در نظر گرفتند. رفته‌رفته با آشنایی و شناخت بیشتر محققان و مهندسان این صنعت نسبت به این سازه‌ها، استفاده از کامپوزیت‌ها کاربرد گسترده‌تری در صنایع هوایی پیدا کردند [9]. ورق کامپوزیت دارای ابعاد متنوع می‌باشد. این نوع ورق کامپوزیت هزینه‌های زیرسازی و اتصالات را کاهش می‌دهد و به دلیل وزن سبکی که داراست حمل و نقل و نصب آن ساده است [10]. هسته کامپوزیتی عضو مرکزی یک قطعه کامپوزیتی بوده و مابین دو صفحه یا دو ورقه نازک قرار گرفته و یک سازه سبک و سخت ایجاد می‌کند. این نوع هسته ساختاری به شکل طبیعی لانه زنبوری[2] بوده و از نسبت استحکام به وزن بالایی برخوردار است [11]. واژه‌ی لانه زنبوری یا هانی کامب نوعی سازه‌ی لانه زنبوری است که با ورق‌های مختلف با قطرهای متفاوت ساخته می‌شود. طبیعتاً هر چه خانه‌های شش ضلعی آن ریزتر باشد، سطح بیشتری برای انتقال و تقسیم فشارهای عمودی وجود دارد که نتیجتاً مقاومت آن بالاتر می‌برد [12]. سازه‌های کامپوزیت که به این شکل ساخته می‌شوند به سازه‌های ساندویچی[3] معروف می‌باشند. این نوع سازه‌ها در مقابل نیروی فشاری و تحت خمش مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند [13]. استحکام چندلایه هسته‌دار به اندازه‌ی قطعه، مواد مورد استفاده، تعداد و تراکم سلول‌های لانه زنبوری در درون آن بستگی دارد [14]. این کامپوزیت‌ها به طور گسترده‌ای در بسیاری از صنایع استفاده می‌شود. این نوع سازه‌ها از یک هسته میانی که ضعیف و حجیم است و یک پوسته قوی و نازک در دو طرف هسته تشکیل شده‌اند. هسته ضعیف میانی از جنس فوم، چوب، هسته لانه‌زنبوری نومکس یا... می‌باشد و پوسته‌های واقع در دو طرف هسته از جنس الیاف شیشه، کربن می‌باشد [15]. این چندلایه‌های هسته‌دار مقاومت بسیار بالاتری در برابر خمش دارند و علاوه بر آن بسیار سبک هستند. به همین دلیل محبوبیت زیادی در بین صنایع هوایی دارند. قطعات بال، دم، ملخ‌ها و پره‌های چرخان در هواپیما عمدتاً از این نوع سازه‌ها ساخته شده‌اند. هسته کامپوزیت لانه زنبوری را می‌توان از فلز آلومینیوم، الیاف کولار، الیاف کربن، الیاف شیشه، کاغذ، نومکس یا استیل ساخته شود [16]. مواد لایه‌ی مغزی (هسته) به طور معمول موادی با استحکام کم می‌باشند، اما ضخامت بیشتر آن برای چندلایه‌های هسته‌دار سفتی خمشی بالا و چگالی کم را فراهم می‌کند. هسته‌های لانه زنبوری، ساختارهایی از ورق-های به هم چسبیده هستند که اکثراً اشکالی شش وجهی مشابه کندوی زنبور عسل دارند. داشتن فضای خالی بسیار زیاد در ساختارشان مصرف ماده را کاهش داده و باعث کاهش وزن و چگالی نهایی قطعه می‌شود [17]. سازه‌های کامپوزیتی دارای هسته لانه زنبوری، از رویه‌های کامپوزیتی و یک ساختار مشبک که هر دو از جنس کامپوزیت می‌باشند، تشکیل شده‌اند، با این تفاوت که چندلایه هسته‌دار ساخته شده، بجای یک هسته سبک، یک ساختار مشبک را در مرکز خود دارند. به دلیل مشبک بودن هسته، مزیت توزیع بار و همچنین تحمل به خسارت را دارا بوده و به علت هسته‌دار بودن، دارای مقاومت خمشی بالا می‌باشد. همچنین به علت جنس کامپوزیتی کل سازه، از خواص چندگانه کامپوزیت‌ها نیز برخوردار هستند [18]. سازه‌های کامپوزیتی هسته‌دار در صنعت با هسته‌های متفاوتی ساخته می‌شوند، در صنایع کم اهمیت‌تر، از هسته های فومی، چوبی و غیره در این سازه‌ها به کار می‌رود و در صنایع مهم به خصوص صنایع هوایی به دلیل اهمیت بیشتر و ضریب اطمینان بالاتر، از هسته-های آلومینیومی لانه زنبوری یا هسته‌های لانه زنبوری از جنس آرامید یا به عبارتی دیگر هسته‌های لانه زنبوری نومکس استفاده می‌شود [19]. این نوع هسته‌ها به دلیل ساختار لانه زنبوری شکل خود، سطح تماس کمی با لایه‌های نگه دارنده ایجاد می‌کنند و مانند هسته‌های فومی و چوبی با کل سطح لایه در تماس نیستند [20]. به همین دلیل روش ساخت چندلایه‌های هسته‌دار شکل به منظور اتصال هرچه بهتر هسته به لایه‌های مجاور اهمیت پیدا می‌کند. در صنعت علاوه بر هسته‌های متفاوت، از روش‌های ساخت متفاوتی نیز برای ساخت این نوع سازه‌ها استفاده می‌شود [21]. این مواد در عین ظرافت، از مقاومت فشاری و برشی و سفتی برشی بالایی برخوردارند و می‌توانند جلوی نفوذ امواج و تشعشعات را بگیرند [22]. این مواد عموماً به عنوان هسته در چندلایه‌های هسته‌دار بین دو ورقه مستحکم قرار می‌گیرند و قطعات سبک با مقاومت مکانیکی بالا تولید می‌کنند [23]. از انواع ورق کامپوزیت لانه زنبوری که تولید می‌شوند، می‌توان به ورق کامپوزیت طرح سنگ، ورق کامپوزیت طرح چوب و ورق کامپوزیت آینه‌ای اشاره کرد. به صورت کلی از ویژگی‌ها و مزایای ورق کامپوزیت لانه زنبوری می‌توان به وزن سبک، مقامت بالا، تراکم زیاد، دارای قابلیت عایق، ضد حریق اشاره کرد [24]. لانه‌زنبوری‌ها، بسته به جنسشان می-توانند خواص متفاوتی از قبیل مقاومت در برابر حرارت و آتش، مقاومت شیمیایی و غیره نیز داشته باشند. از بارزترین مزایای ورق کامپوزیت لانه زنبوری ، قابلیت ضد حریق آن می‌باشد که به دلیل حذف هسته پلی‌اتیلنی، در

[1] Composites
[2] Honey comb
[3] Sandwich Panels

آتش‌سوزی، به هیچ وجه آتش نگرفته و مشتعل نمی‌شود در صورتی که ورق‌های کامپوزیت معمولی در برابر حرارت و آتش تغییر شکل می‌دهند [25]. ورق کامپوزیت هسته لانه زنبوری، به دلیل قابلیت ضد حریق بودن آن بهترین گزینه برای استفاده در پمپ‌های بنزین و برج‌ها می‌باشد [26]. از دیگر ویژگی‌های ورق کامپوزیت هسته لانه زنبوری، قابلیت عایق گرما و سرما می‌باشد که باعث جلوگیری از هدر رفت هوای گرم محیط ساختمان در زمستان و هوای سرد در تابستان خواهد شد و کاهش هزینه‌های ساختمان را موجب شده و باعث کاهش مصرف انرژی به میزان نود درصد خواهد شد [27]. از دیگر مشخصه‌های ورق کامپوزیت لانه زنبوری می‌توان به قابلیت آکوستیک یا عایق صوتی آن اشاره کرد که از وارد و خارج شدن صوت به محیط مورد نظر جلوگیری می‌کند؛ این ویژگی در ساخت سالن‌های سمینار و کنفرانس، سینما و تئاتر و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد [28]. وزن سبک این ورق‌ها باعث کاهش هزینه‌های نصب و نگهداری می‌شود، همچنین باعث کاهش وزن ساختمان شده که در نتیجه در زمان وقوع زلزله ایمن بوده و خسارت پایین‌تری نسبت به دیگر متریال‌ها به ساختمان وارد می‌شود [29]. این نوع ورق‌ها در حد فولاد مقاوم هستند و در برابر خورندگی، باران‌های اسیدی، اشعه فرابنفش نور خورشید، باد و غیره از مقاومت بالایی برخوردار می‌باشند [30]. تنوع رنگ در ورق کامپوزیت لانه زنبوری بسیار بالا بوده و نیازی به هزینه‌های رنگ‌آمیزی نمی‌باشد؛ زیرا خود ورق دارای رنگ مقاوم در برابر ضربه و خط و خش می‌باشد [31]. این نوع ورق به دلیل قابلیت انعطاف پذیری و خم شوندگی به راحتی به شکل مورد نظر، شکل داده می‌شود. ورق کامپوزیت قابلیت نصب بر روی سازه‌هایی از جنس چوب، بتن و اسکلت‌های فلزی را دارا می‌باشد که با شرایط زیست محیطی سازگار بوده و به راحتی بازیافت می‌شود و از این روی دوست‌دار محیط زیست می‌باشد [32]. کاربرد لانه‌زنبوری در صنایع هوایی، دریایی، نظامی، خودرو سازی، حمل و نقل، تجهیزات مخابراتی و ورزشی است. مواد کامپوزیت هسته لانه زنبوری، علیرغم تمام مزایایی که نسبت به مواد سنتی دارند، استفاده از این مواد در مقیاس‌های بزرگ همیشه از نگرانی‌های محققین این حوزه بوده است [33]. این مواد ساختار فیزیکی و رفتار مکانیکی به مراتب پیچیده‌تری نسبت به مواد سنتی از خود نشان می‌دهند؛ که این عوامل به‌کارگیری آن‌ها را با محدودیت‌ها و مشکلاتی روبرو می‌سازد [34]. به عنوان مثال، یکی از رایج‌ترین اتفاقاتی که در اتصالات هواپیما مانند اتصال پرچ به پوسته یا تیرک‌های مقاومتی رخ می‌دهد، شکست و جدایش لایه‌ها از یکدیگر است. این اتفاق در اثر بارگذاری‌های مختلف در شرایط مختلف عملیاتی هواپیماها رخ می‌دهد [35]. ترک ابتدا از نواحی آزاد شروع به رشد کرده و رفته‌رفته به محل اتصالات می‌رسد و با رسیدن به محل اتصالات و افزایش بارهای اعمالی، باعث شکست در ناحیه اتصالات می‌شوند [36]. با این وجود در بسیاری از موارد، با در نظر گرفتن ضرایب اطمینان بالا، سعی در جبران این کمبودها می‌شود، از طرفی استفاده از ضریب اطمینان بالا در زمان طراحی، خود باعث افزایش وزن نهایی سازه شده و از مزیت نسبی مواد کامپوزیتی می‌کاهد [37]. لذا بررسی و شناخت دقیق‌تر خواص این مواد، می‌تواند امکان استفاده مناسب‌تر از آن‌ها را افزایش دهد. ناهمگنی ذاتی کامپوزیت‌ها، طراحی سازه‌هایی با سفتی و استحکام بهینه در مکان‌ها و جهت‌های خاص با توجه به شرایط خاص را، تسهیل می‌کند [38]. بنابراین، هنگام طراحی سازه‌ی کامپوزیتی، متغیرهای طراحی اضافی مربوط به پیکربندی کامپوزیت مانند (لایه چینی)[1] باید در نظر گرفته شوند [39]. با این وجود، ناهمگنی کامپوزیت‌ها صرف‌نظر از ماهیت اجزا، منبع اصلی ضعف آن‌ها است. بنا به گفته‌ی اکثر محققان فعال در زمینه تحلیل مواد کامپوزیت، جدایی بین‌لایه‌ای[2] به‌عنوان یکی از انواع تخریب سه‌بعدی اتفاق افتاده در مواد کامپوزیت لایه‌ای، مهم‌ترین مد تخریب در این نوع مواد است. جدایی بین‌لایه‌ای در حقیقت ترکی است که بین دولایه‌ی مجاور از مواد کامپوزیتی شکل می‌گیرد [40]. این دولایه می‌تواند دارای خواص مکانیکی و جهت الیاف گوناگون باشد. علت تعیین جدایی بین‌لایه‌ای به عنوان مهم‌ترین مد تخریب این است که سفتی و استحکام را در سازه‌های کامپوزیتی، به شدت کاهش می‌دهد [41]. به عبارت دیگر ایجاد جدایی بین‌لایه‌ای عملاً قطعه را تخریب نمی‌کند و در ظاهر قطعه تخریبی مشاهده نمی‌شود ولی قطعه را به چنان درجه‌ای نزول می‌دهد که دیگر توانایی تحمل بارگذاری را نداشته و در بارگذاری‌های بسیار کمتر از حد طراحی، مقاومت خود را ازدست‌داده و تخریب می‌شود [42]. در چندلایه‌های کامپوزیتی به دلیل وجود لایه چینی‌های مختلف، عوامل مختلفی رخ می‌دهد که برخی باعث خرابی در این سازه‌های می‌شوند. به دلیل تفاوت میان زاویه قرارگیری الیاف، تفاوت میان ضرایب پوآسن لایه‌ها به وجود می‌آید که این تفاوت باعث به وجود آمدن تنش‌های بین لایه‌ای می‌شود [43]. می‌توان گفت که رشد ترک در یک ماده همگن زمانی رخ می‌دهد که ترک مورد نظر عمود بر جهت بارگذاری ایجادشده باشد؛ اما در سازه‌های لایه‌ای، راستای رشد ترک، پیوسته توسط ماده تقویت‌شده تعیین می‌شود. لذا بررسی و شناخت دقیق‌تر خواص این مواد، می‌تواند امکان استفاده مناسب‌تر از آن‌ها را افزایش دهد [44]. اصولاً هسته‌ها به منظور افزایش گشتاور دوم سطح و افزایش ظرفیت خمشی چندلایه‌ها به کار می‌روند. از مسائل مهم در به کارگیری هسته‌ها به خصوص لانه زنبوری‌ها، اطمینان از اتصال مناسب بین لایه‌های دو سمت هسته با آن است؛ چراکه عدم اتصال مناسب، منجر به جدایی لایه از هسته شده و با کمانش موضعی رویه، عملاً فلسفه وجود هسته زیر سوال خواهد رفت. از این‌رو آگاهی از خواص مکانیکی و استحکامی اتصالات بین لایه و هسته ضروری است [45]. این اتصال هنگامی مناسب خواهد بود که ظرفیت استحکامی اتصال بیش از خود هسته باشد و به عبارت دیگر ناحیه جدایش در سازه از هسته شروع شود. نحوه ساندویچ کردن لانه‌زنبوری بین لایه‌ها می‌تواند متفاوت باشد. مورایس[3] [46] در سال 2002 استفاده از یک چسب مجزا برای چسباندن هسته به لایه را توصیه نمود. گراو[4] و همکاران [47] در سال 2006 معتقد به استفاده از یک لایه واسط ظریف بین هسته و لایه‌های اصلی بودند. حلیمی و همکارانش در سال 2011 [48] امکان ساخت قطعات چندلایه‌های هسته‌دار با هسته‌ای از جنس فوم PVC و رویه‌هایی از جنس شیشه/اپوکسی را با استفاده از تکنیک انتقال رزین به کمک خلأ مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها برای بررسی و بهینه‌سازی ساخت چندلایه‌های هسته‌دار با استفاده از روش متغیرهای: استفاده از الیاف با نفوذپذیری بالا، ایجاد الگوهای مختلف تکرار سوراخ بر روی هسته و ایجاد انواع مختلف شیار بر سطح پایینی هسته فومی را مورد مطالعه قرار دادند. تأثیر سوراخ و شیارهای ایجاد شده در هسته بر نحوه جریان رزین، زمان تولید، وزن نهایی قطعه، خواص مکانیکی و استحکام چسبندگی رویه به هسته، بررسی شد. ساسیندران[5] و همکاران [49] در سال 2020 چسباندن هسته به صورت مجزا روی سطوح را پیشنهاد دادند و رائو و همکاران[6] [50] در سال 2016، چسباندن هسته بر روی لایه‌های آغشته به رزین و خیس

[1] Stacking sequence
[2] Delamination
[3] Morais
[4] Grau
[5] Saseendran
[6] Rao

را ترجیح دادند. هدف از این پژوهش، یافتن بهترین راه برای چسباندن هسته به لایه‌های کامپوزیتی است. در همین راستا، پس از بررسی چسبندگی لایه‌های الیاف به هسته لانه زنبوری با استفاده از استانداردهای ASTM C273 و ASTM C297 به میزان اتصال هسته با لایه برای سه روش متداول ساخت چندلایه‌های هسته‌دار در صنایع ایران شامل: روش دستی، روش یک مرحله‌ای و روش دو مرحله‌ای پرداخته خواهد شد.

2-روش تحقیق

اتصال بین هسته و لایه از دو دیدگاه کشش و برش می‌تواند حائز اهمیت باشد. آزمون‌های به کار رفته در این پژوهش، برگرفته از استاندارد ASTM C273 و ASTM C297 به منظور استخراج خواص کششی و برشی خود هسته می‌باشد؛ با این‌حال این آزمون‌ها را می‌توان هم‌زمان جهت ارزیابی اتصالات واصل هسته و لایه‌ها نیز به کار گرفت. بدین منظور دو آزمون یکی به صورت کششی به منظور یافتن خواص استحکامی هسته لانه‌زنبوری در راستای ضخامت و همچنین بررسی اتصال بین هسته و چندلایه در حالت کشش و دیگری به صورت برشی با هدف محاسبه و بررسی استحکام برشی و چسبندگی بین هسته و چندلایه براساس استانداردهای مربوط به هر بخش تعریف و انجام شده است و همان‌گونه که اشاره شد، فراتر از محاسبه کمی مقادیر استحکامی چندلایه کامپوزیتی، مقایسه و بررسی کیفی استحکام اتصال لایه‌ها و هسته مدنظر بوده است. به این ترتیب که با انجام آزمون، درصورتی‌که هسته کامپوزیتی زودتر از چسب اتصال دچار واماندگی شود، می‌توان نتیجه گرفت که استحکام چسبندگی بین لایه و هسته بالاتر از استحکام هسته بوده است. لازم به ذکر است که برای هر آزمون، تعداد 30 نمونه به صورت 6 پارت 5 تایی همراه گیره نگهدارنده ساخته و آزموده شده است. لازم به ذکر است که نمونه های 5 تایی 6 مرتبه ساخته شدند تا تاثیر خطاهایی نظیر خطای انسانی، شرایط محیطی، شرایط پخت و... به حداقل برسد. الزامات هر آزمون از موارد متعددی تشکیل شده است از جمله آن می‌توان به: 1) مشخصات نمونه ساخته شده برای آزمون 2) نحوه اتصال نمونه در دستگاه 3) نوع و میزان باردهی یا به عبارتی سرعت باردهی به نمونه 4) شرایط محیطی در هنگام آزمون اشاره کرد. در این پژوهش، آزمون کششی در راستای ضخامت برای یک چندلایه هسته‌دار با توجه به استاندارد C297 تنظیم شده است. مطابق با آن، میکرومتر استفاده شده برای ثبت میزان تغییر شکل نمونه از دقت حداقل 1 درصد در طول، عرض و ضخامت نمونه برخوردار می‌باشد. با توجه به ابعاد نمونه، دقت به میزان ± 0.25 میلی‌متر است. لودسل مورد استفاده در آزمون دقت 1 درصد در اندازه‌گیری نیروی اعمالی به نمونه را داراست. گیره نگهدارنده اعمال بار، دارای استحکام لازم به منظور ایجاد اتصال مناسب با سطوح چندلایه را دارد، لذا بلوکی با ضخامت 40 تا 50 میلی‌متر است. تغییرات دمایی در هنگام انجام آزمون از 30 درجه سانتی‌گراد فراتر نرفت و همچنین درصد رطوبت محیط در بازه 3 درصدی قرار داشت. سطح دارای اتصال با گیره نگهدارنده، حداقل $625\ mm^2$ و سرعت باردهی به نمونه حداکثر تا 2 میلی‌متر بر دقیقه بود. جدول 1، مشخصات نمونه آزمون کشش و شکل 1، نمونه آزمون کشش برای صفحه کامپوزیتی با هسته لانه زنبوری را نشان می‌دهد. دو لایه کربن بافته شده با گرماژ 200 گرم، نوع بافت توییل در دو سمت هسته مورد استفاده قرار گرفته است؛ لازم به ذکر است که زاویه الیاف صفر و نود درجه می‌باشد.

همچنین در این پژوهش، آزمون برشی برای یک چندلایه‌های هسته‌دار با توجه به استاندارد C273 تنظیم شده توسط ASTM انجام شد. در جدول 2 مشخصات قطعه آزمون برشی و شکل 2، نمونه آزمون برش برای صفحه کامپوزیتی با هسته لانه زنبوری را نشان می‌دهد. ضخامت نمونه ساخته شده از 50 میلی‌متر کمتر بود و نمونه چندلایه ساخته شده توسط دو صفحه فولادی مطابق شکل 2 مهار شده و با زاویه مناسب به گونه‌ای در دستگاه متصل شد که راستای اعمال بار از خط میانی چندلایه عبور کند. تغییرات دمایی در هنگام انجام آزمون در محدوده 23 ± 3 درجه سانتی‌گراد و همچنین درصد رطوبت نسبی محیط در بازه 50 ± 5 درصد قرار داشت. سرعت باردهی به نمونه حداکثر تا 2 میلی‌متر بر دقیقه بود و ثبت داده‌ها در طول انجام آزمون به طور پیوسته برقرار و ترجیحاً در نزدیک زمان به شکست نمونه بار حداکثر، نیروی شکست و نرخ باردهی ثبت شد. همچنین تنها مود شکست قابل قبول برای نمونه جداشدگی چندلایه از محل هسته لانه‌زنبوری، آزمون بار برشی خواهد بود و نمونه‌هایی که جداشدگی بین لایه و هسته و یا واماندگی چسب رخداده مردود است.

جدول 1 شرایط نمونه برای آزمون کششی

Table 1 Sample conditions for tensile testing

نوع مقطع	مستطیلی
جنس هسته	لانه‌زنبوری نومکس
مشخصات هسته	سایز 5 میلی‌متر، چگالی 48 کیلوگرم بر مترمکعب
جنس لایه‌ها	پارچه کربن
ضخامت هسته	5 میلی‌متر
ضخامت لایه‌ها	1 میلی‌متر
نوع چسب و رزین	اپوکسی / Araldite LY5052
عرض چندلایه	50 میلی‌متر
طول چندلایه	50 میلی‌متر
نرخ باردهی	2 میلی‌متر بر دقیقه

Fig. 1 Sample test of composite plate tension with honeycomb core

شکل 1 نمونه آزمون کشش برای صفحه کامپوزیتی با هسته لانه زنبوری

جدول 2 شرایط نمونه برای آزمون برشی

Table 2 Sample conditions for shear test

نوع مقطع	مستطیلی
جنس هسته	لانه‌زنبوری نومکس
مشخصات هسته	سایز 5 میلی‌متر، چگالی 48 کیلوگرم بر مترمکعب
جنس لایه‌ها	پارچه کربن
ضخامت هسته	5 میلی‌متر
ضخامت لایه‌ها	1 میلی‌متر
نوع چسب و رزین	اپوکسی / Araldite LY5052
عرض چندلایه	50 میلی‌متر
طول چندلایه	120 میلی‌متر
نرخ باردهی	2 میلی‌متر بر دقیقه

Fig. 2 Sample test of cutting a composite plate with a honeycomb core
شکل 2 نمونه آزمون برش برای صفحه کامپوزیتی با هسته لانه زنبوری

جدول 3 خصوصیت‌های روش‌های مختلف ساخت چندلایه هسته‌دار
Table 3 Characteristics of different methods of making sandwich panels

روش ساخت نمونه	فراوانی مودهای شکست در ناحیه جدایش		زمان ساخت نمونه (ساعت)	جدایش مورد پذیرش (درصد)
	آزمون کششی	آزمون برشی		
دومرحله‌ای با کیسه خلأ	هسته	هسته	12	بالای 90
یک‌مرحله‌ای با کیسه خلأ	هسته	هسته	6	نزدیک 50
ساخت‌دستی	سطح مشترک هسته و لایه	سطح مشترک هسته و لایه	5	زیر 50

در این پژوهش سه نمونه از متداول ترین روش‌های ساخت چندلایه‌های هسته دار در صنایع کشور بررسی شد و مطابق با نتایج به دست آمده از این پژوهش در جدول 3، دریافته شد که بهترین راه برای ساخت یک قطعه کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری، بین سه روش آزمون شده، روش ساخت دومرحله‌ای است.

در روش دومرحله‌ای، ابتدا لایه‌های کربن یا الیاف شیشه (در این پژوهش از الیاف کربن استفاده شده است) به رزین آغشته شده و بعد از لایه چینی تعداد لایه مدنظر، هسته کامپوزیتی روی لایه‌ها قرار می‌گیرد و پس از آن، کل قطعه با کمک دستگاه ایجاد خلأ، خالی از هوا شده و به آن فشار وارد می‌شود تا تحت پرس، هسته به خوبی با لایه‌ها اتصال ایجاد کند. با استفاده از دستگاه خلأ، رزین‌ها تا دیواره‌های هسته بالا می‌آیند و اتصال مناسبی را ایجاد می‌کنند. در مرحله دوم که 24 ساعت پس از شروع ساخت مرحله اول آغاز می‌شود، لایه‌های مربوط به سمت دیگر هسته جانمایی شده و به رزین آغشته می‌شوند. پس از اتمام لایه‌چینی، مجدد به قطعه با کمک کیسه خلأ، فشار وارد می‌شود تا دو سمت هسته به خوبی به آن بچسبند. شکل‌های 3 و 4 ناحیه جدایش در آزمون‌های کشش و برش نمونه ساخته شده از این روش را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است در صنایع مهمی مانند صنایع هوافضا پارامتر وزن بسیار مهم می‌باشد. در این صنایع خیلی مطلوب نمی‌باشد که تمامی سطوح یا شبکه‌های هسته پر از رزین شوند، زیرا هم وزن سازه بالا می‌رود و هم هسته شکننده خواهد شد. در نتیجه باید ساخت دو مرحله‌ای به گونه‌ای انجام گیرد که رزین‌ها تمام سطح شبکه‌ها را نپوشاند و این امر زمانی میسر می‌شود که سازنده ویسکوزیته رزین را به خوبی بشناسد و زمان مناسبی را برای وکیوم قطعه انتخاب نماید.

روش ساخت دیگری که آزمایش گردید، روش ساخت یک مرحله‌ای بود، به این ترتیب که ابتدا لایه‌گذاری انجام می‌شود و لایه‌ها یک به یک به رزین آغشته می‌گردند و سپس هسته روی لایه‌ها قرار می‌گیرد و پس از آن، مجدداً روی هسته لایه‌گذاری انجام می‌گیرد. نهایتاً قطعه با کمک دستگاه ایجاد خلأ، وکیوم می‌شود. روش سوم (ساخت دستی) نیز به مانند روش دوم، در آن ابتدا لایه چینی صورت می‌گیرد و لایه‌ها به رزین آغشته می‌گردند و سپس هسته روی لایه‌ها قرار می‌گیرد.

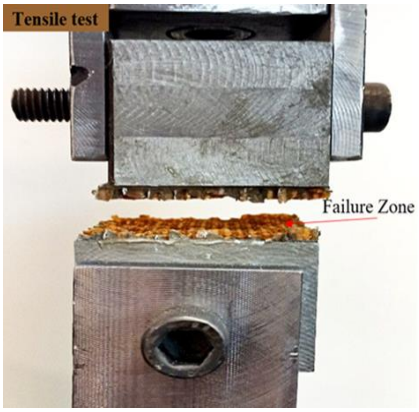

Fig. 3 Sample test of cutting a composite plate with a honeycomb core
شکل 3 ناحیه جدایش در آزمون کششی نمونه کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری

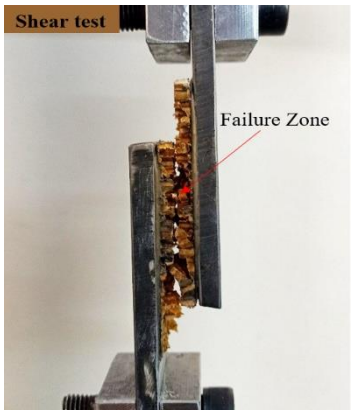

Fig. 4 Sample test of cutting a composite plate with a honeycomb core
شکل 4 ناحیه جدایش در آزمون برشی نمونه کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری

نهایتاً در این روش، روی هسته لایه‌گذاری انجام گرفته و ساخت نمونه به اتمام می‌رسد، با این تفاوت که در ساخت، از دستگاه ایجاد خلأ استفاده نمی‌شود. می‌توان گفت که روش ساخت دومرحله‌ای، روش مطمئن‌تری نسبت به سایر روش‌های آزمون شده است، ولی نسبت به روش‌های دیگر، زمان بیشتری را صرف خود می‌کند. همچنین هزینه ساخت به مراتب بالاتری دارد.

3- نتایج

همانطور که پیش‌تر گفته شد، روش ساخت چندلایه‌های هسته‌دار دو مرحله‌ای، ضریب اطمینان بالاتری نسبت به سایر روش‌های آزمون شده دارد. زیرا در مرحله‌ی اول ساخت در این روش، پس از قرارگیری هسته روی لایه‌های آغشته به رزین و وکیوم کردن آن، رزین طی چندین ساعت، فرصت این را دارد که به واسطه تحت خلأ قرار گرفتن قطعه به سمت دیواره‌های هسته حرکت کرده و

اتصال را به خوبی مستحکم سازد. همین شرایط برای مرحله بعدی ساخت نیز حاکم می‌باشد و نهایتاً دیواره‌های دو سمت هسته با رزین پوشانده می‌شود و به خوبی این اتصال، صورت می‌گیرد. تصاویر بزرگ‌شده‌ی یک ناحیه از نمونه ساخته‌شده به روش دومرحله‌ای با استفاده از دستگاه وکیوم در شکل 5، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بعد از ایجاد خلأ در قطعه، رزین تا دیواره‌های هسته بالا می‌آید و اتصال بین هسته و لایه‌ها به‌خوبی برقرار می‌شود.

در روش ساخت چندلایه‌های هسته‌دار یک مرحله‌ای، به واسطه اینکه بلافاصله پس از لایه چینی، هسته روی لایه‌ها قرار می‌گیرد و سپس روی هسته مجدداً لایه‌گذاری می‌شود، پس از وکیوم قطعه، رزین نمی‌تواند به خوبی روش قبل آزادانه بین دیواره‌های هسته حرکت کند و بیشتر رزین اضافی به وسیله‌ی لایه‌ای به نام بلیدر جذب می‌شود. نهایتاً طی این روش، سازه موجود از سازه ساخته شده با روش دو مرحله‌ای سبک‌تر می‌شود، ولی اتصال بین هسته و لایه‌ها، اتصال سست‌تری می‌باشد. در روش ساخت دستی نیز به دلیل اینکه برای چسباندن بهتر لایه‌ها به هسته از دستگاه وکیوم استفاده نمی‌شود، نه سازه مورد نظر به سبکی سازه ساخته شده به روش دومرحله‌ای و یک مرحله‌ای می‌باشد و نه اتصال بین لایه و هسته به خوبی دو روش مذکور برقرار می‌شود. در نتیجه ساخت چندلایه‌های هسته‌دار با این روش برای صنایع مهم به خصوص صنایع هوایی توصیه نمی‌شود. شکل 6 و شکل 7 به ترتیب تصاویر بزرگنمایی نمونه‌های ساخته‌شده از روش یک مرحله‌ای و روش ساخت دستی را نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی دو تصویر 5 و 6 می‌توان دریافت که اتصال هسته با لایه‌ها در شکل 5 بسیار بیشتر از شکل 6 است و این نشان‌دهنده‌ی ضریب اطمینان بیشتر روش ساخت دومرحله‌ای نسبت به روش تک‌مرحله‌ای می‌باشد.

Fig. 5 Area images of a composite structure with a honeycomb core made in a Two-step method (Magnification ×200)

شکل 5 تصاویر ناحیه‌ای از سازه کامپوزیتی دارای هسته لانه‌زنبوری ساخته‌شده با روش دومرحله‌ای (بزرگنمایی 200 بار)

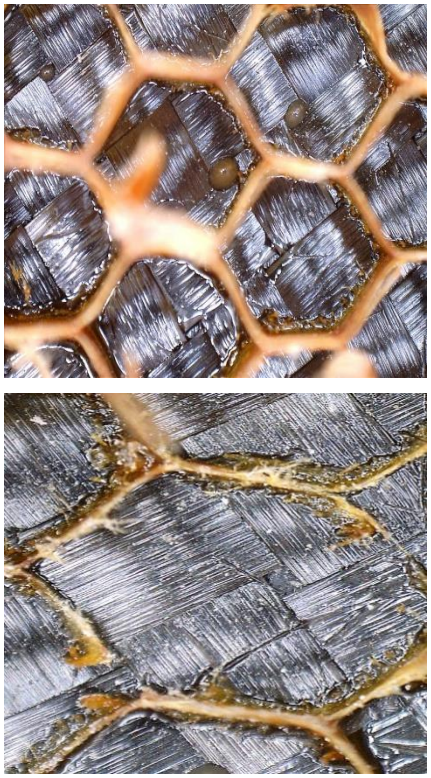

Fig. 6 Area images of a composite structure with a honeycomb core made in a single-step method (Magnification ×200)

شکل 6 تصاویر ناحیه‌ای از سازه کامپوزیتی دارای هسته لانه‌زنبوری ساخته‌شده با روش تک‌مرحله‌ای (بزرگنمایی 200 بار)

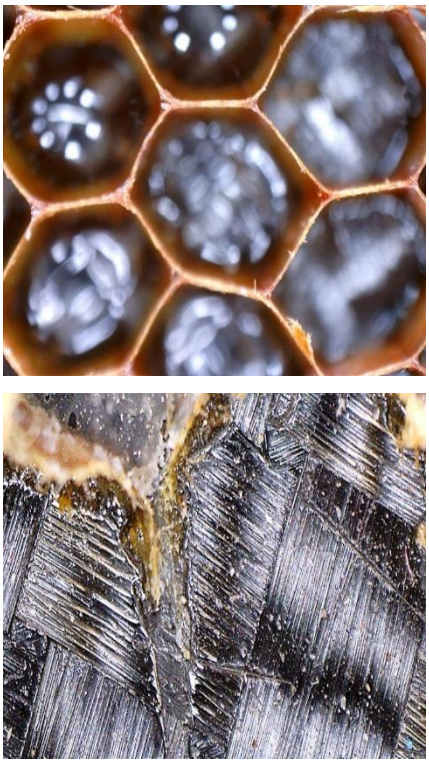

Fig. 7 Area images of a composite structure with a honeycomb core made in a Hand-Layup method (Magnification ×200)

شکل 7 تصاویر ناحیه‌ای از سازه کامپوزیتی دارای هسته لانه‌زنبوری ساخته‌شده با روش دستی بدون استفاده از وکیوم (بزرگنمایی 200 بار)

با توجه به شکل 7 مشخص است که هسته از لایه‌ها جداشده و در واقع اتصال بین هسته و لایه‌ها در چندلایه‌های هسته‌دار نتوانسته است به‌خوبی بار اعمالی را تحمل کند و واماندگی در آن رخ‌داده است. نمودار آزمودن کششی و برشی نمونه‌های ساخته شده به سه روش نام‌برده شده به ترتیب در شکل 8 و شکل 9 آمده است. ناحیه جدایش در دو روش اول که از دستگاه وکیوم استفاده شد از هسته بوده است. ولی درروش ساخت دستی و بدون استفاده از دستگاه مکش، جدایش از فصل مشترک هسته و لایه رخ‌داده است.

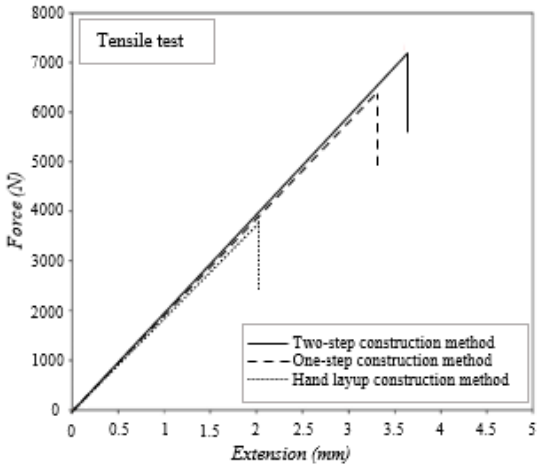

Fig. 8 Shear test diagram in composite samples with honeycomb core

شکل 8 نمودار آزمون کشش در نمونه‌های کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری

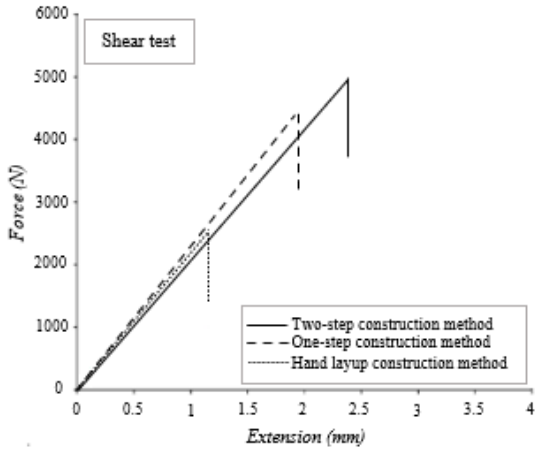

Fig. 9 Shear test diagram in composite samples with honeycomb core

شکل 9 نمودار آزمون برشی در نمونه‌های کامپوزیتی با هسته لانه‌زنبوری

با بررسی نمودارهای می‌توان میانگین استحکام کششی هسته لانه‌زنبوری را حدود 2.7 مگاپاسکال و همچنین استحکام برشی آن حدود 0.75 مگاپاسکال محاسبه کرد. درنتیجه می‌توان دریافت که ناحیه فصل مشترک بین لایه‌ها و هسته بیشتر از این مقدار بوده است.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پس از بررسی چسبندگی لایه‌های الیاف به هسته لانه زنبوری با استفاده از استانداردهای ASTM C273 و ASTM C297 به سه روش متداول ساخت چندلایه‌های هسته‌دار در صنایع ایران شامل: روش دستی، روش یک مرحله‌ای، روش دو مرحله‌ای، دریافت شد که اگر نمونه از خود هسته لانه زنبوری دچار جدایش یا شکستگی شود، نشان دهنده‌ی آن است که اتصال بین لایه‌ها و هسته لانه‌زنبوری مناسب بوده است. اما اگر جدایش بین لایه و هسته لانه‌زنبوری رخ ندهد، نشان دهنده‌ی آن است که اتصال بین هسته و لایه‌ها به خوبی برقرار نشده است. در این پژوهش از تعداد 30 نمونه‌ای که برای هر یک از سه روش ساخت مذکور استفاده گردید، در روش دومرحله این جدایش در خود هسته لانه‌زنبوری در 28 نمونه از 30 نمونه رخ داد که نشان دهنده‌ی مناسب بودن این روش (با بیش از 90 درصد جدایش مورد قبول) می‌باشد. اما در روش تک مرحله‌ای و روش دستی به ترتیب 18 عدد از 30 نمونه و همچنین 9 عدد از 30 نمونه هسته دچار شکست در آزمون کشش و برش شد. در نتیجه روش دو مرحله‌ای با استفاده از دستگاه وکیوم، روش مناسب‌تری برای ساخت این نوع سازه‌های پیش‌بینی می‌شود به دلیل اینکه بعد از ایجاد خلأ در قطعه، رزین فرصت این را دارد تا از دیواره‌های هسته بالا رود و اتصال بین هسته و لایه‌ها به‌خوبی برقرار می‌شود و این فرآیند در دو سمت هسته رخ می‌دهد. پس از آن روش ساخت یک مرحله‌ای ضریب اطمینان بهتری نسبت به روش ساخت دستی دارد و نتیجتاً می‌توان گفت که با استخراج و مشاهده نتایج پژوهش حاضر از 28 نمونه جدایش مربوط به خود هسته لانه‌زنبوری از 30 نمونه، مناسب‌ترین روش برای ساخت هسته‌های لانه زنبوری ساندویچ چندلایه‌های کامپوزیتی، روش دومرحله‌ای می‌باشد و روش ساخت دستی بدون استفاده از دستگاه وکیوم برای استفاده در صنایع مهم پیشنهاد نمی‌شود.

5-مراجع

[1] Taheri-Behrooz, F., Kiani, A., "Simulation of thermo-mechanical behavior of glass-epoxy composites containing shape memory alloy under static loading", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 2, pp. 111-122, 2016.

[2] Mohammadi, B., Asl Kamkar, S., Farrokhabadi, A., "Matrix cracking and induced delamination in symmetrically laminated composites subjected to static loading by using multi scale damage mechanics", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 9-24, 2017.

[3] Shokrieh, M. M., Ghajar, M., Salamattalab, M., Madoliat, R., "Progressive damage modeling of laminated composites by considering simultaneous effects of interlaminar and intralaminar damage mechanisms", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 2, pp. 1-8, 2015.

[4] He, L., Cheng, Y. S., Liu, J., "Precise bending stress analysis of corrugated-core, honeycomb-core and X-core sandwich panels", Composite Structures, Vol. 94, No. 5, pp. 1656-1668, 2012.

[5] Mohammadi, B., Fazlali, B., "Fatigue life prediction of laminated composites under multiaxial fatigue loading condition by using developed continuum damage mechanics model", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 3, pp. 215-224, 2016.

[6] Taheri-Behrooz, F., Mahdavizade, M. J. S., Gholami, M. J., "Micromechanics of stress transfer through the interphase in pull out test of fiber through the resin", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 3, pp. 283-294, 2017.

[7] Raju, K. S., Smith, B. L., Tomblin, J. S., Liew, K. H., Guarddon, J. C., "Impact damage resistance and tolerance of honeycomb core sandwich panels", Journal of Composite Materials, 42, No. 4, pp. 385-412, 2008.

[8] Tabatabaee, M., Taheri-Behrooz, F., Razavi, S. M., Liaghat, G. H., "Electrical conductivity enhancement of Carbon/Epoxy composites using nanoparticles", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 605-614, 2019.

[9] Mohammadi, B., Kazemi, A., Ghasemi, R., "Damage analysis of holed composite laminates using continuum damage mechanics", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 3, pp. 22-34, 2015.

[10] Chen, Z., Yan, N., "Investigation of elastic moduli of Kraft paper honeycomb core sandwich panels. Composites Part B: Engineering", Vol. 43, No. 5, pp. 2107-2114, 2012.

[11] Mohammadi, B., Fazlali, B., Madoliat, R., "Fatigue life prediction of symmetric cross ply laminated composite using a developed

[29] Murthy, O., Munirudrappa, N., Srikanth, L., Rao, R. M. V. G. K., "Strength and stiffness optimization studies on honeycomb core sandwich panels", Journal of reinforced plastics and composites, Vol. 25, No. 6, pp. 663-671, 2006.

[30] Giglio, M., Gilioli, A., Manes, A., "Numerical investigation of a three point bending test on sandwich panels with aluminum skins and Nomex™ honeycomb core", Computational Materials Science, Vol. 56, No. 1, pp. 69-78, 2012.

[31] Nayak, S. K., Singh, A. K., Belegundu, A. D., Yen, C. F., "Process for design optimization of honeycomb core sandwich panels for blast load mitigation", Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 47, No. 5, pp. 749-763, 2013.

[32] Najafi, M., Darvizeh, A., Ansari, R., "Evaluation of impact strength of composites and fiber metal laminates hybridized with nanoclay after exposure to high temperature thermal shock. Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 3, pp. 263-274, 2017.

[33] Karagiozova, D., Nurick, G. N., Langdon, G. S., "Behaviour of sandwich panels subject to intense air blasts–Part 2: Numerical simulation", Composite structures, Vol. 91, No. 4, pp. 442-450, 2009.

[34] Shokrieh, M. M., Zeinedini, A., "Analytical prediction of mode I strain energy release rate at crack growth initiation of polymeric nanocomposites", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 1, pp. 1-10, 2016.

[35] Tanimoto, Y., Nishiwaki, T., Shiomi, T., Maekawa, Z., "A numerical modeling for eigenvibration analysis of honeycomb sandwich panels", Composite Interfaces, Vol. 8, No. 6, pp. 393-402, 2001.

[36] Foo, C. C., Seah, L. K., Chai, G. B., "Low-velocity impact failure of aluminium honeycomb sandwich panels", Composite structures, Vol. 85, No. 1, pp. 20-28, 2008.

[37] Mohieddin Ghomshei, M. M., Shahi, R., "Stress analysis of single-lap bonded joints in composite tubes under torsion and hygrothermal effects using DQM", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 375-385, 2018.

[38] Towsyfyan, H., Biguri, A., Boardman, R., Blumensath, T., "Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures", Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 33, No. 3, pp. 771-791, 2020.

[39] Davar, A., Azarafza, R., Faraji Shoaa, J., "Experimental and numerical analysis of low-velocity impact on composite sandwich panels with grid stiffened core", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 615-626, 2020.

[40] Rahmani, M., Farrokhabadi, A., "Evaluation the energy release rate of induced delamination due to matrix cracking in symmetric composite laminate", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 1, pp. 53-68, 2019.

[41] Sun, G., Chen, D., Huo, X., Zheng, G., Li, Q., "Experimental and numerical studies on indentation and perforation characteristics of honeycomb sandwich panels", Composite Structures, Vol. 184, No. 1, pp. 110-124, 2018.

[42] Li, H., Fan, M., Yue, Y., Hu, G., He, Q., Yu, M., "Motion control of capsule-like underwater robot utilizing the swing properties of ionic polymer metal composite actuators", Journal of Bionic Engineering, Vol. 17, 2. 1, pp. 281-289, 2020.

[43] Rajkumar, S., Arulmurugan, B., Manikandan, M., Karthick, R., Kaviprasath, S., "Analysis of physical and mechanical properties of A3003 aluminum honeycomb core sandwich panels", In Applied Mechanics and Materials, Vol. 867, No. 1, pp. 245-253, 2017.

[44] Davalos, J. F., Qiao, P., Xu, X. F., Robinson, J., Barth, K. E., "Modeling and characterization of fiber-reinforced plastic honeycomb sandwich panels for highway bridge applications", Composite structures, Vol. 52, No. 3, pp. 441-452, 2001.

[45] Pirmohammad, N., Liaghat, G. H., Pol, M. H., Sabouri, H., "Analytical, experimental and numerical investigation of sandwich panels made of honeycomb core subjected projectile impact", Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 153-164, 2014.

[46] De Morais, A. B., De Moura, M. F., Marques, A. T., & De Castro, P. T., "Mode-I interlaminar fracture of carbon/epoxy cross-ply composites", Composites Science and Technology, Vol. 62, No. 5, pp. 679-686, 2002.

continuum damage mechanics-based model", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 1, pp. 13-22, 2015.

[12] Ebadi, S., Shahbazi, K., Anbarzadeh, E., "Investigation of Aluminum and Composite Aircraft Wings Under the Influence of Aerodynamic Forces and their Effects on Environmental Impacts", Journal of Environmental Friendly Materials, Vol. 5, No. 1, pp. 13-21, 2021.

[13] Starace, F., Orlando, S. D., Guida, M., Marulo, F., "Experimental study of a virtual allowables approach for the design of composite aircraft structures", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 235, No. 14, pp. 2529-2541, 2021.

[14] Salehi Kolahi, M. R., Moeinkhah, H., "A theoretical model for analysis of ionic polymer metal composite sensors in fluid environments", Journal of Computational Applied Mechanics, Vol. 51, No. 1, pp. 21-29, 2020.

[15] Du, Y., Yan, N., Kortschot, M. T., "Light-weight honeycomb core sandwich panels containing biofiber-reinforced thermoset polymer composite skins: Fabrication and evaluation", Composites Part B: Engineering, Vol. 43, No. 7, pp. 2875-2882, 2012.

[16] Gafarova, V. A., Kuzeev, I. R., "Destruction of Epoxy-Based Composite Materials under the Influence of Impact Load", In Materials Science Forum, Vol. 992, pp. 331-335, 2020.

[17] Sun, G., Huo, X., Wang, H., Hazell, P. J., Li, Q., "On the structural parameters of honeycomb-core sandwich panels against low-velocity impact", Composites Part B: Engineering, Vol. 216, 108881, 2021.

[18] Theobald, M. D., Langdon, G. S., Nurick, G. N., Pillay, S., Heyns, A., Merrett, R. P., "Large inelastic response of unbonded metallic foam and honeycomb core sandwich panels to blast loading", Composite structures, Vol. 92, No. 10, pp. 2465-2475, 2010.

[19] Shojaee, T., Mohammadi, B., Madoliat, R., "Experimental and numerical investigation of effects of stiffener in buckling resistance of square laminated composites with circular hole" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 1, pp. 43-52, 2019.

[20] Amirashjaee, K., Fakhreddini-Najafabadi, S., Taheri-Behrooz, F., "Numerical and experimental study of carbon/epoxy composite laminate response to low velocity impact", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 1, pp. 1461-1472, 2021.

[21] Esmaili, A., Taheri-Behrooz, F., "Comparison of numerical and analytical cohesive zone length models in the delamination of composite laminates", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1235-1242, 2021.

[22] Delshad Gholami, M., Rahmatabadi, D., Shojaee, T., Hashemi, R., & Mohammadi, B., "Evaluation of mechanical properties and fracture toughness of aluminum-magnesium-aluminum composite produced by cold roll bonding process", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 1, pp. 1317-1326, 2021.

[23] Shahbakhsh, S., Khosravi, H., Tohidlou, E., "Improvement in interlaminar shear strength and flexural properties of carbon fiber/epoxy composite using surface-modified carbonate calcium", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 3, pp. 343-350, 2019.

[24] Abedi, M., Aliabadi, A., Mosavei, S. E., Sarfaraz, R., "Dimensional characteristic of glass/epoxy composite plate with edge notch under wet freeze-thaw cycles", Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 10, No. 3, pp. 219-231, 2020.

[25] Feli, S., Pour, M. N., "An analytical model for composite sandwich panels with honeycomb core subjected to high-velocity impact", Composites Part B: Engineering, Vol. 43 No. 5, pp. 2439-2447, 2012.

[26] Bashiri Goodarzi, H., Yarmohammad Tooski, M., "An experimental study of the effects of carbon nanotube and graphene addition on the impact strength of Epoxy/Basalt fiber composite", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 3, pp. 411-418, 2019.

[27] Kyner, A., Dharmasena, K., Williams, K., Deshpande, V., Wadley, H., "Response of square honeycomb core sandwich panels to granular matter impact. International Journal of Impact Engineering", Vol. 117, No. 1, pp. 13-31, 2018.

[28] Elhami, M., Habibi, S., "A Study on morphology of Poly (vinyl alcohol)-organoclay nanocomposite nanofibers", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 325-330, 2018.

[47] Grau, D. L., Qiu, X. S., Sankar, B. V., "Relation between interfacial fracture toughness and mode-mixity in honeycomb core sandwich composites", Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol. 8, No. 3, pp. 187-203, 2006.

[48] Halimi F., Golzar, M., Beheshti, M. H., "Effect of distribution media on mold filling and quality of the final part in a vacuum assisted resin transfer molding, M.Sc thesis", Department of Mechanical engineering, Tarbiat Modares University, Vol. 1, No. 4, pp.51-57, 2011.

[49] Saseendran, V., Berggreen, C., "Mixed-mode fracture evaluation of aerospace grade honeycomb core sandwich specimens using the Double Cantilever Beam–Uneven Bending Moment test method", Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol. 22, No. 4, pp. 991-1018, 2020.

[50] Rao, K. K., Rao, K. J., Sarwade, A. G., & Chandra, M. S., "Strength analysis on honeycomb sandwich panels of different materials", International Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 2, No. 3, pp. 365-374, 2012.