



ساخت پنل ساندویچی با رویه کامپوزیتی الیاف شیشه/وینیل استر و هسته پلی وینیل-کلراید (PVC) مشبک به روش تزریق در خلأ (VIP) برای کاربردهای دریایی

طیبه اکبری¹، الهام شهابی قهفرخی^{2*}، سید حسین تقویان¹، مسلم نجفی²، سجاد مهدوی³

1- پژوهشگر، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت

3- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت

* تهران، صندوق پستی 1774-15875، shahabi@mut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

در تحقیق حاضر روشی بر اساس فرایند تزریق در خلأ برای ساخت پنل های ساندویچی مورد استفاده در صنایع دریایی پیشنهاد شده است. خواص مکانیکی محصول ساخته شده با این روش نسبت به روش ساخت سنتی تر یعنی روش اتصال چسبی بهبود قابل اعتنائی یافته و در عین حال از نقطه نظر اقتصادی نیز به کارگیری این روش مقرون به صرفه است. در این روش ساخت، رویه ها و اتصال آن ها به هسته در یک مرحله انجام می پذیرد که مزایایی همچون کاهش هزینه ساخت، افزایش سرعت تولید و ارتقای کیفیت اتصال رویه به هسته را در پی دارد. با توجه به کاربرد مدنظر یعنی کاربرد در صنایع دریایی، هسته از جنس فوم PVC (پلی وینیل-کلراید) شیاردار و رویه ها از جنس الیاف شیشه/وینیل استر انتخاب شده اند که موادی شناخته شده در صنایع دریایی هستند. خواص مکانیکی پنل ساندویچی ساخته شده با روش پیشنهادی در دو نوع بارگذاری خمشی و فشاری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که در محصول ساخته شده با روش پیشنهادی، استحکام خمشی 78%، استحکام فشاری 92% و جذب انرژی 101% نسبت به پنل ساندویچی ساخته شده با اتصال چسبی افزایش یافته است. عامل اصلی در بهبود خواص مکانیکی در این محصول، ایجاد شبکه ای از رزین در فضای خالی شیارهاست که ساختاری مشابه با هسته لانه زنبوری پر شده با فوم را به وجود آورده و باعث تقویت هسته، به ویژه در جهت ضخامت می شود

دریافت: 1402/02/05

پذیرش: 1402/04/20

کلیدواژه ها

پنل ساندویچی،

فرایند تزریق در خلأ،

فوم شیاردار،

کاربرد دریایی کامپوزیت ها

Fabrication of sandwich panels with glass/vinylester composite face-sheets and polyvinyl chloride (PVC) lattice core using vacuum infusion process for marine applications

Tayebeh Akbari¹, Elham Shahabi-Ghahfarokhi^{2*}, Seyed Hosein Taghavian¹, Moslem Najafi, Sajjad Mahdavi¹

1- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

* P.O.B. 1774-15875, Tehran, Iran, shahabi@mut.ac.ir

Keywords

Sandwich panel,
Vacuum infusion process,
Grooved foam,
Marine application of composites

Abstract

In this research, a method based on the vacuum infusion process is proposed for making sandwich panels used in the marine industry. The mechanical properties of the product made with this method have been significantly improved compared to the adhesive bonding method, and also from an economic point of view, it's cost-effective to use this method. In this method, the construction of face-sheets and their adhesion to the core is done in a single step, which results in some benefits such as reducing construction costs, increasing the production speed and improving the quality of the face-sheets adhesion to the core. According to the intended application, i.e. application in the marine industry, the core is made of grooved polyvinyl chloride (PVC) foam and the face-sheets are made of glass/vinyl ester, which are well-known materials in the marine industry. The mechanical properties of the sandwich panel made by the proposed method have been investigated in both bending and compression loading. The results indicate that in the product made with the proposed method, the bending strength has increased by 78%, the compressive strength has increased by 92%, and the energy absorption has increased by 101% compared to the sandwich panel made by adhesive bonding method. The main factor in improving the mechanical properties of this product is the creation of a network of resin in the empty space of the grooves, which creates a structure similar to the foam filled honeycomb cores and strengthens the core, especially in the thickness direction.

1- مقدمه

پنل‌های ساندویچی از لحاظ معماری مشابه تیرهای I-شکل هستند که برای تحمل بارگذاری خمشی طراحی شده‌اند. قاعده حاکم بر این طراحی آن است که رویه‌ها مستحکم‌تر انتخاب شده و با فاصله گرفتن از صفحه میانی همانند بال تیر، تنش‌های عمودی ناشی از خمش را تحمل می‌کنند. هسته معمولاً استحکام کمتری داشته و همانند جان تیر وظیفه نگه‌داشتن رویه‌ها و نیز انتقال تنش‌های برشی ناشی از خمش را به عهده دارد. این طراحی هدفمند باعث می‌شود پنل‌های ساندویچی در تحمل بارهای خمشی بازده وزنی بالایی داشته و برای مقاصد سبک‌سازی مورد توجه قرار گیرند.

خواص مکانیکی یک پنل ساندویچی به خواص مکانیکی اجزای سازنده یعنی رویه و هسته، فاصله دو رویه از یکدیگر و کیفیت اتصال بین رویه و هسته وابسته است. بسته به کاربرد، رویه می‌تواند از جنس فلز یا چندلایه‌های کامپوزیتی باشد. هسته نیز انواع مختلفی دارد که متداول‌ترین آن‌ها هسته‌های فومی و لانه‌زنبوری هستند. ساختارهای ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری نسبت به هسته فومی عملکرد بهتری دارند اما قیمت تمام‌شده آن‌ها بالاتر است. در جهت ارتقای عملکرد هسته، نوآوری‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به هسته‌های لانه‌زنبوری پر شده با فوم¹ [1-3]، هسته‌های مشبک² [4-6]، هسته‌های چین‌دار³ [7-9]، هسته‌های پین‌دار⁴ [10,11] و هسته‌های متخلخل⁵ [12,13] اشاره نمود. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که ساختار هسته تأثیر قابل توجهی بر خواص نهایی ساختار ساندویچی دارد. به‌عنوان مثال یان و همکاران [14] پنل ساندویچی با رویه آلومینیومی و هسته چین‌دار زیگزاگ آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیوم را مورد بررسی قرار داده و دریافتند ظرفیت تحمل بار و جذب انرژی نسبت به حالتی که هسته چین‌دار یا فوم آلومینیومی به‌تنهایی استفاده شوند به‌مراتب بیشتر است. ویو و همکاران [15] ظرفیت تحمل فشار خارج صفحه پنل ساندویچی با هسته مشبک پر شده با فوم را بررسی کرده و مشاهده کردند که بیشینه بار وارده نسبت به هسته فومی شانزده برابر بیشتر است. روش کار در این تحقیق به این صورت بوده است که بلوک‌های فوم ابتدا در پارچه از جنس الیاف شیشه با زاویه $\pm 45^\circ$ پیچیده شده‌اند. سپس بلوک‌ها بر روی لایه‌چینی مربوط به رویه زیرین پنل ساندویچی در کنار هم قرار گرفته و لایه‌چینی رویه بالایی پنل ساندویچی بر روی آن انجام شده و عملیات تزریق صورت گرفته است.

در سال‌های اخیر توسعه ساختارهای جدیدتری مانند هسته آگرتیک⁶ [16-18]، هسته سیال هوشمند مگنتورئولوژیکال [19] و هسته هیبرید [20] برای ارتقای عملکرد پنل‌های ساندویچی توجه محققان را به خود جلب کرده است. اما به‌کارگیری طرح‌های نوآورانه معمولاً با پیچیدگی بیشتر در ساخت هسته و افزایش قیمت تمام‌شده محصول همراه است که کاربرد آن را برای صنایع با فناوری متوسط محدود می‌کند. در بین انواع ایده‌های نوآورانه، ایده‌هایی در عمل کاربردی و عملیاتی خواهند شد که هزینه پیاده‌سازی آن از دید اقتصادی توجیه‌پذیر داشته باشد.

یک عامل تأثیرگذار بر قیمت تمام‌شده محصول، روش ساخت آن است. روش‌های مختلفی برای ساخت ساختارهای ساندویچی، بسته به جنس اجزای تشکیل‌دهنده و کاربرد مورد نظر وجود دارد. از جمله روش‌های ساخت رایج

می‌توان به لایه‌چینی خیس⁷، لایه‌چینی با پیش آغشته‌ها، قالب‌گیری مایع⁸ و اتصال چسبی⁹ اشاره نمود [21]. روش ساخت علاوه بر قیمت تمام‌شده بر خواص مکانیکی قطعه نیز به‌صورت مستقیم تأثیرگذار است. به‌عنوان مثال کیریازک و همکاران [22] اثر روش‌های مختلف ساخت را بر خواص مکانیکی پنل ساندویچی نظیر استحکام خمشی، استحکام فشاری و مقاومت در برابر ضربه مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که فشار اعمال‌شده در طی فرایند ساخت که می‌تواند توسط اتوکلاو و یا پرس ایجاد شود تأثیر بسزایی بر خواص مکانیکی قطعه دارد. یوسفی و همکاران اثر روش ساخت در کیفیت اتصال رویه به هسته را به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار داده و دریافتند روش ساخت بر کیفیت اتصال رویه به هسته تأثیرگذار است [23]. در بین انواع روش‌های موجود، روش تزریق در خلأ (VIP¹⁰) که در دسته روش‌های مبتنی بر قالب‌گیری مایع قرار دارد به خاطر اجرای ساده، پاکیزگی محیط کار و رسیدن به خواص مکانیکی مطلوب از محبوبیت بالایی برخوردار است. این روش برای ساخت پنل‌های ساندویچی با رویه از نوع چندلایه‌های کامپوزیتی و هسته‌های یکپارچه، مانند چوب بالسا و فوم قابل‌استفاده است. روش متداول در ساخت پنل ساندویچی با روش تزریق در خلأ آن است که فرایند تزریق دو مرتبه، یک بار برای ساخت و اتصال رویه بالایی به هسته و بار دیگر برای ساخت و اتصال رویه پایینی به هسته انجام شود. روش دیگر اما تزریق همزمان دو رویه بالایی و پایینی است. لازمه تزریق همزمان در رویه‌های بالایی و پایینی، وجود مجراهایی در ضخامت هسته برای عبور رزین و خیس شدن هر دو رویه است. حلیمی و همکاران [24] نشان دادند در فرایند ساخت به روش انتقال رزین به کمک خلأ یا VARTM¹¹، سوراخ‌دار کردن هسته علاوه بر فراهم آوردن مسیری برای انتقال رزین در بین دو رویه، با ایجاد ستون‌هایی از رزین خواص مکانیکی قطعه را نیز بهبود می‌بخشد. ایشان اثر شش نوع الگوی سوراخ‌دار کردن هسته را بر خواص مکانیکی و پارامترهای مربوط به ساخت بررسی کرده و نشان دادند که با استفاده از الگوی مناسب می‌توان زمان فرایند، بار نهایی و جذب انرژی را به ترتیب 40%، 38% و 100% بهبود بخشید.

در تحقیق حاضر پنل ساندویچی از طریق فرایند تزریق در خلأ و با ادغام دو فرایند تزریق برای رویه‌های بالایی و پایینی ساخته شده است. در این روش از فوم‌های پلی‌وینیل-کلراید (PVC¹²) شیاردار که در صنایع دریایی برای ساخت سازه شناورها رواج دارد استفاده شده است. وجود شیار باعث می‌شود تا مجراهایی برای انتقال رزین بین رویه‌های بالایی و پایینی فراهم گردد. با استفاده از روش تزریق در خلأ شیارهای موجود در فوم با رزین پر شده و شبکه‌ای از رزین در فضای خالی شیارها پدید می‌آید. به این ترتیب در پنل ساندویچی ساخته‌شده با تزریق همزمان هر دو رویه، مشبکی از رزین در ساختار هسته افزوده شده و باعث تقویت خواص مکانیکی پنل ساندویچی خواهد شد. از دیدگاه دیگر چنین ساختاری را می‌توان به‌عنوان مشبکی که فضای خالی موجود در آن با فوم پر شده است در نظر گرفت. با این دیدگاه چنین محصولی از حیث ساختار به لانه زنبوری‌های پر شده با فوم شباهت دارد که عملکرد مناسب آن‌ها به اثبات رسیده است. با این تفاوت که پر کردن حفره‌های هسته لانه‌زنبوری با فوم، هزینه اجرایی بالایی داشته اما در روش حاضر چنین ساختاری به‌طور طبیعی در حین فرایند ساخت شکل می‌گیرد. بنابراین استفاده

7 Wet hand layup

8 Liquid molding

9 Adhesive bonding

10 Vacuum infusion process

11 Vacuum-assisted resin transfer molding

12 Polyvinyl chloride

1 Foam filled honeycomb

2 Lattice

3 Corrugated

4 Pin-reinforced

5 Porous

6 Auxetic

جدول 1 خواص اصلی اجزای تشکیل دهنده پنل ساندویچی

Table 1 The main properties of sandwich panel components

واحد	کمیت
60 GPa	مدول الاستیک الیاف شیشه
30 GPa	مدول برشی الیاف شیشه
0.23	ضریب پواسون الیاف شیشه
3 GPa	مدول الاستیک فوم PVC
3.5 MPa	استحکام تسلیم فشاری فوم PVC
2500 MPa	مدول الاستیک وینیل استر
1.004 g/cm ³	چگالی وینیل استر
350 cps	گرانروی وینیل استر
30 min	زمان ژل شدن وینیل استر

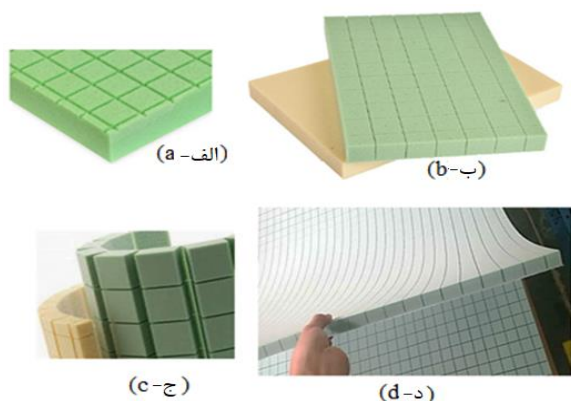


Fig. 1 Cross-grooved PVC foams, (a) shallow grooves, (b) through thickness grooves, (c) desired convex curvature in through thickness grooved foam and (d) finite concave curvature in through thickness grooved foam

شکل 1 فومهای PVC شیاردار، (الف) شیار کم عمق، (ب) شیار تمام عمق، (ج) انحنای محدب در فوم با شیار تمام عمق و (د) انحنای مقعر در فوم با شیار تمام عمق

در تحقیق حاضر فوم PVC با ضخامت 25 mm با شیارهای تمام عمق به ضخامت 1 mm استفاده شده است. فاصله شیارهای از یکدیگر 30 mm بوده و بنابراین بلوکهای ایجاد شده مکعبهایی با طول اضلاع 30×30×25mm هستند.

2-2- ساخت پنل ساندویچی به روش تزریق در خلأ

ساخت پنل ساندویچی به روش تزریق در خلأ روشی کارآمد و محبوب است زیرا با وجود آن که تجهیزات پیچیده و پرهزینه‌ای ندارد اما خواص مکانیکی مناسبی در اثر اعمال خلأ در حین فرایند به دست می‌آید. علاوه بر خواص مکانیکی مناسب، از دیگر مزایای روش تزریق در خلأ می‌توان کاهش بخار مواد شیمیایی در فضای کارگاهی به‌ویژه هنگام کار با رزین وینیل استر که بوی قوی دارد، پاکیزگی محیط کار به دلیل محبوس بودن رزین در درون کیسه خلأ و کمتر بودن هزینه‌ها نسبت به فرایندهای دو قالبی³ را برشمرد.

مراحل اجرای فرایند تزریق در خلأ در کار حاضر به این صورت بوده است که سطح قالبی شیشه‌ای سه مرتبه با واکس جداکننده پوشش داده شده و هر بار پانزده دقیقه زمان داده می‌شود تا واکس خشک شود. سپس بر روی قالب به ترتیب سه لایه تنفس و یک لایه جداکننده مطابق شکل ۲ قرار داده می‌شود. ترتیب قرارگیری اجزای تشکیل دهنده پنل ساندویچی بر روی لایه جداکننده در شکل ۳ نشان داده شده است.

از روش حاضر از یک سو بهبود خواص مکانیکی و از سوی دیگر کاهش هزینه ماشینکاری، کاهش هزینه اپراتور و سرعت عمل در ساخت را در پی خواهد داشت که از حیث کاربردی مزیت مهمی به شمار می‌رود.

2-مواد و روش ساخت

2-1- مواد مورد استفاده در ساخت پنل ساندویچی

انتخاب نوع ماده برای اجزای تشکیل دهنده پنل ساندویچی بر اساس کاربرد مورد نظر یعنی کاربردهای دریایی صورت گرفته است. بر این اساس رویه‌ها از جنس الیاف شیشه/وینیل استر و هسته از نوع فوم PVC انتخاب شده است. رویه‌ها متشکل از چهار لایه نمد شیشه سوزنی (CSM¹) هستند که به لحاظ اقتصادی برای ساخت سازه‌های دریایی مناسب هستند. زنجیره مولکولی در وینیل استر به گونه‌ای است که در برابر نفوذ آب مقاوم است. خاصیت ضد آب بودن همراه با پایداری شیمیایی بالا و استحکام کششی مناسب باعث شده است تا رزین وینیل استر در کاربردهای دریایی جایگاه ویژه‌ای داشته باشد [20]. این رزین نسبت به رزین‌های اپوکسی و پلی استر گرانروی کمتری داشته و از این حیث برای فرایند تزریق گزینه مناسبی است. در تحقیق حاضر رزین وینیل استر به دلیل کاربرد دریایی و مناسب بودن برای فرایند تزریق در خلأ انتخاب شده است.

فوم‌های PVC از جمله هسته‌های رایج در کاربردهای دریایی بوده و با چگالی‌های متنوع در دسترس هستند. این نوع فوم از خواص مکانیکی خوبی برخوردار بوده و جذب آب در آن به دلیل ساختار سلول بسته آن پایین است. این ویژگی‌ها باعث شده است تا فوم‌های PVC گزینه جذابی در ساخت سازه‌های ساندویچی دریایی باشند [20]. ساختار سلول بسته در این نوع فوم از یک سو مزیت پایین بودن جذب آب را در آن به همراه می‌آورد، اما از طرف دیگر باعث می‌شود تا جذب چسب‌های مایع نیز در آن پایین بوده و موجب ضعف اتصال چسبی رویه به هسته خواهد شد. در سازه شناورها که به‌طور طبیعی در معرض بارهای تکرار شونده ناشی از کوبش امواج² هستند جدایش رویه از هسته، مود شکست رایجی است که نقطه‌ضعفی برای این نوع هسته‌های فومی محسوب شده و می‌بایست به گونه‌ای مرتفع گردد. استفاده از روش تزریق در خلأ در پژوهش حاضر، راهکاری در جهت بهبود کیفیت اتصال رویه به هسته PVC و به تعویق انداختن جدایش پوسته از هسته است.

برخی خواص اصلی الیاف شیشه، فوم PVC و رزین وینیل استر در جدول 1 ذکر شده است. گرانروی و زمان ژل شدن رزین وینیل استر مربوط به دمای اتاق یعنی در حدود 20°C می‌باشد. الیاف و رزین مورد استفاده از شرکت PMP تهیه شده‌اند.

فوم‌های PVC را می‌توان به راحتی برش زده و مانند شکل 1 شیارهایی به ضخامت دلخواه در آن ایجاد نمود. شیارهای ایجاد شده ممکن است مطابق شکل 1-الف) (a) کم عمق و یا مطابق شکل 1-ب) (b) تمام عمق باشند. در ایجاد شیارهای تمام عمق برای آنکه بلوک‌ها از هم جدا نشوند معمولاً پارچه یا اصطلاحاً مش نازکی را پیش از برش زدن فوم، به سطح زیرین آن چسبانده و پس از آن برشکاری انجام می‌شود. مزیت فوم‌های دارای برش تمام عمق نسبت به فوم‌های دارای شیار کم عمق آن است که در فوم با شیار تمام عمق، ایجاد انحنای محدب تا حد دلخواه مطابق شکل 1-ج) (c) و ایجاد انحنای مقعر به صورت محدود (بسته به ضخامت شیار و تا تماس یافتن بلوک‌ها با یکدیگر) مطابق شکل 1-د) (d) امکان پذیر خواهد بود.

¹ Chopped Strand Mat

² Slamming

³ Two-sided mold processes

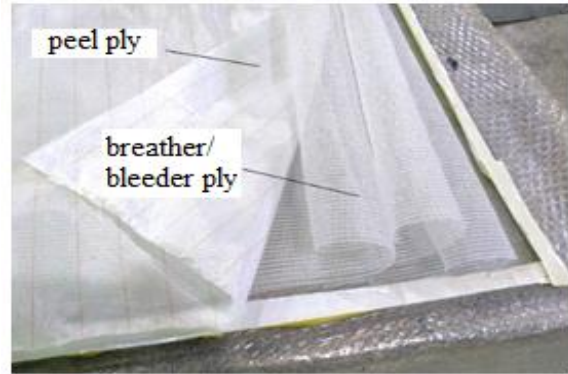
بر روی قطعه کشیدگی و در نتیجه نازک شدگی در آن ایجاد نشود. در این مرحله مطابق شکل 4 پیش‌فرم تحت خلأ قرار گرفته و هوای داخل کیسه تخلیه می‌شود. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود با اعمال خلأ، اضافه کیسه به‌صورت چین‌خوردگی جمع شده و مزاحمتی ایجاد نخواهد کرد. اعمال خلأ پیش از شروع تزریق با خارج کردن هوا از پیش‌فرم باعث می‌شود رویه‌ها تحت فشار اتمسفر فشرده‌تر شده و کسر حجمی الیاف در رویه‌ها بالاتر رود. همچنین فشار اتمسفر باعث می‌شود رویه‌های خشک، به‌خوبی ناهمواری‌های احتمالی موجود بر روی سطح هسته را پوشش داده و سطح تماس رویه با هسته افزایش یابد. افزایش سطح تماس از یک سو و به حداقل رسیدن احتمال تشکیل حباب در قطعه و به‌ویژه در محل اتصال هسته به پوسته از سوی دیگر باعث می‌شود تا اتصال پوسته و هسته با کیفیت مناسبی صورت پذیرد. به‌طور خاص در ساخت پنل‌های ساندویچی با هسته‌های فومی سلول‌بسته که زیرآیندهای مناسبی در اتصال‌های چسبی نیستند، بهبود اتصال رویه به هسته مزیتی حائز اهمیت به شمار می‌رود.

چالش اصلی در به‌کارگیری روش تزریق در خلأ، انتخاب بهینه محل ورود و خروج رزین و محاسبه مسیر جریان رزین بر اساس آن به‌گونه‌ای است که ترشوندگی در همه نقاط قطعه‌کار و در کوتاه‌ترین زمان ممکن (تا پیش از ژله‌ای شدن رزین) صورت پذیرد. اگر هسته پنل ساندویچی از نوع شیاردار باشد، هندسه شیارها نیز در روند انجام فرایند تزریق تأثیرگذار بوده و به متغیرهای طراحی افزوده می‌شود. در تحقیق حاضر ابعاد داخل صفحه نمونه پنل ساندویچی ساخته‌شده 433×371 mm بوده است. شکل 5 نحوه نفوذ رزین در پیش‌فرم و روند خیس شدن رویه بالایی پنل ساندویچی را در چند مقطع زمانی نشان می‌دهد. برای کوتاه‌تر کردن زمان تزریق، لوله‌های ماریچ⁴ ورودی و خروجی رزین به‌موازات دو ضلع طولی پنل تعبیه شده‌اند و به این ترتیب رزین در مسافت بین این دو در راستای عرض پنل مطابق شکل 5-الف (a) جریان می‌یابد. همان‌طور که در شکل 5-ب (b) دیده می‌شود ابتدا محل شیارها در اطراف هر بلوک خیس شده و مرکز بلوک با قدری تأخیر زمانی خیس می‌شوند. هر اندازه ابعاد بلوک‌ها بزرگ‌تر باشد ترشوندگی مرکز بلوک با تأخیر بیشتری صورت گرفته و به زمان موردنیاز برای تکمیل فرایند افزوده می‌شود.



شکل 4 تخلیه هوا از پیش‌فرم با اعمال خلأ

نکته قابل توجه دیگر، شیب‌دار بودن جبهه پیشروی رزین در مقطع پنل در مراحل میانی فرایند مطابق شکل 5-الف (a) و شکل 5-ب (b) است که



شکل 2 قرارگیری لایه جداکننده و لایه تنفس بر روی قالب شیشه‌ای



شکل 3 مراحل آماده‌سازی پیش‌فرم، (الف) لایه‌چینی لایه زیرین، (ب) قرار دادن هسته و (ج) لایه‌چینی لایه رویین

ابتدا چهار لایه نمد شیشه سوزنی با الیاف بریده (به‌عنوان رویه زیرین) مطابق شکل 3-الف (a) بر روی لایه جداکننده قرار داده می‌شود. فوم‌های شیاردار بر روی لایه‌های الیاف شیشه سوزنی مطابق شکل 3-ب (b) قرار داده شده و لایه‌چینی قبلی به‌صورت معکوس یعنی به‌ترتیب با چهار لایه الیاف شیشه سوزنی به‌عنوان رویه بالایی، سه لایه تنفس و یک لایه جداکننده مطابق شکل 3-ج (c) بر روی فوم تکرار می‌شود.

پس از آماده شدن پیش‌فرم¹، در اطراف آن و بر روی قالب نوار آب‌بند² چسبانده می‌شود. سپس کیسه خلأ³ روی قطعه به‌گونه‌ای قرار داده می‌شود که کاملاً کشیده نبوده بلکه تا حدودی آزاد باشد تا در اثر اعمال خلأ و نشست

³ Vacuum bag
⁴ Spiral pipes

¹ Preform
² Sealant tape



Fig. 6 Curing resin at $T=70^{\circ}\text{C}$ using electrical heater

شکل 6 پخت رزین در دمای 70°C با استفاده از گرماتاب برقی

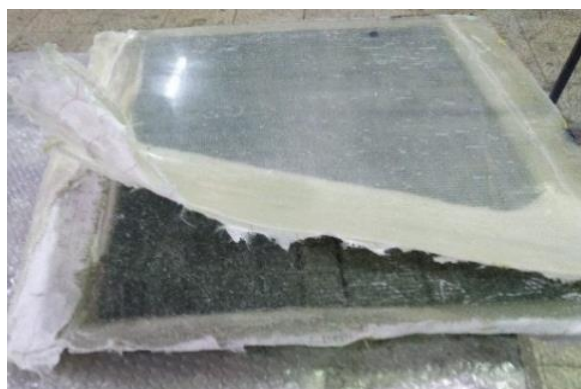


Fig. 7 Separating the peel-ply from the fabricated sandwich panel

شکل 7 جدا کردن لایه جداکننده از نمونه پنل ساندویچی ساخته شده

استفاده از روش تزریق در خلأ در ساخت پنل ساندویچی با هسته شیاردار باعث می‌شود شبکه‌ای از رزین در فضای خالی شیارها تشکیل شود که هندسه آن برای یک سلول واحد در شکل 8 به صورت شماتیک نمایش داده شده است. شبکه رزینی تشکیل شده، منشوری شکل بوده و از این حیث با هسته‌های لانه زنبوری تشابه دارد. اما تفاوت آن با هسته‌های لانه زنبوری رایج آن است که مقطع آن به جای شش ضلعی‌های کنار هم چیده شده، مربع‌های کنار هم چیده شده بوده و جنس آن تابع جنس رزین است.

محبوبیت و کاربرد وسیع هسته‌های لانه زنبوری در کاربردهای پیشرفته نشان از عملکرد مطلوب این ساختار هندسی در مقایسه با هسته‌های یکپارچه دارد. بنابراین پنل ساندویچی ساخته شده به روش تزریق در خلأ نیز با داشتن شبکه‌ای از رزین، نسبت به نمونه فاقد شبکه رزینی خواص مکانیکی بالاتری خواهد داشت. برای بررسی کمی تأثیر تشکیل شبکه رزینی بر خواص مکانیکی پنل ساندویچی ساخته شده به روش تزریق در خلأ، نمونه‌هایی فاقد شبکه رزینی به عنوان نمونه شاهد، با مواد اولیه مشابه ساخته شده است. دلیل استفاده از هسته با شیاردار تمام عمق در نمونه شاهد آن است که اولاً ساختار هندسی نمونه شاهد تا حد ممکن مشابه نمونه‌های اصلی باشد. ثانیاً با توجه به کاربرد مورد نظر یعنی سازه و بدنه شناورهای دریایی، ایجاد انحنای ملایمی در ساخت پنل ساندویچی امکان پذیر گردد. تهیه پنل ساندویچی شاهد با استفاده از روش اتصال چسبی و در دو مرحله انجام گرفته است. در مرحله نخست رویه‌های بالایی و پایینی با روش تزریق در خلأ ساخته و به ابعاد مورد نیاز مطابق شکل 9 برشکاری می‌شوند.

به خوبی نشان می‌دهد رزین در رویه زیرین با سرعت بیشتری نسبت به رویه بالایی در حرکت است. اختلاف جبهه پیشروی رزین در رویه بالایی و پایینی دو دلیل عمده دارد. اولاً آن که گرانش زمین به ترشوندگی لایه زیرین کمک می‌کند و ثانیاً آن که لوله‌های مارپیچ تزریق و جمع‌آوری رزین، بر روی قالب و هم‌تراز با رویه پایینی قرار گرفته‌اند که باعث می‌شود مسیر عبور رزین در لایه زیرین کوتاه‌تر بوده و افت فشار کمتری در آن اتفاق افتد. پس از رسیدن جبهه رزین در رویه پایینی به انتهای خط تزریق مطابق شکل 5- (ج-ج) اختلاف جبهه پیشروی رزین در رویه بالایی و پایینی به تدریج کاهش یافته و در نهایت به صفر می‌رسد. فرایند تزریق با خیس شدن کامل رویه بالایی به اتمام می‌رسد. بحرانی‌ترین نقاط از نظر ترشوندگی مرکز بلوک‌هایی است که در دورترین نقطه از محل تزریق رزین قرار دارند. در صورتی که زمان لازم برای نفوذ رزین به نقاط نامبرده بیشتر از زمان ژله‌ای شدن رزین باشد این نقاط خشک مانده و لازم است در جهت رفع این اشکال، متغیرهای مؤثر در انجام فرایند بازبینی شود. از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر نحوه ترشوندگی می‌توان به گرانش روی رزین، تعداد لایه‌های تنفس، ضخامت شیارها، ابعاد بلوک و دما اشاره نمود. با تنظیم این پارامترها، فرایند می‌بایست به گونه‌ای طراحی شود که زمان لازم برای رسیدن رزین به تمام نقاط قطعه کار کوتاه‌تر از زمان ژله‌ای شدن رزین باشد.

پس از اتمام فرایند تزریق، نوبت به پخت رزین می‌رسد. گرما باعث می‌شود تا فرایند پخت با سرعت بیشتری صورت گیرد. در تحقیق حاضر فرایند پخت مطابق شکل 6 در فضای آزاد و با استفاده از گرماتاب به مدت 90 دقیقه و در دمای تقریبی 70°C انجام شده است. پس از اطمینان از تکمیل فرایند پخت، با جدا کردن لایه جداکننده مطابق شکل 7 فرایند ساخت پنل ساندویچی به پایان می‌رسد.

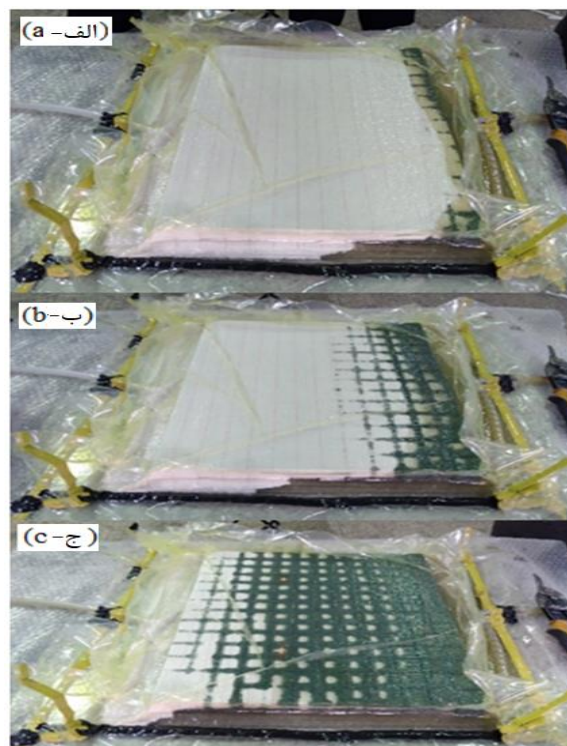


Fig. 5 Penetration of resin into the preform over time in (a) $t=3$ min, (b) $t=14$ min and (c) $t=32$ min

شکل 5 نفوذ رزین در پیش فرم با گذشت زمان در (الف) دقیقه سوم تزریق، (ب) دقیقه چهاردهم تزریق و (ج) دقیقه سی و دوم تزریق

جدول 2 ابعاد نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای

Table 2 Dimensions of three point bending sample

mm	ابعاد نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای
210	طول نمونه
90	عرض نمونه
1	ضخامت رویه‌ها
20	ضخامت هسته
1	ضخامت شیارهای هسته

برشکاری پنل ساخته شده مطابق ابعاد گفته شده با دو روش آب افشان¹ و اره دیسکی رومیزی مطابق شکل 10 آزموده شد. ابتدا برشکاری آب افشان به کار گرفته شد اما کیفیت قابل قبولی حاصل نگردید. شکل 10-(الف) سطح برش خورده با روش آب افشان را نشان می دهد که فوم را در برخی نقاط قلوه کن کرده و سطحی ناهموار را در ناحیه هسته نتیجه داده است. پس از آن برشکاری با استفاده از اره رومیزی انجام شد که مطابق شکل 10-(ب) کیفیت مطلوبی داشته و برشکاری کلیه نمونه های آزمایش در ادامه کار با استفاده از این روش صورت گرفته است.

با بررسی دقیق مقاطع برش خورده مطابق شکل 11، دو نوع عیب در ساخت پنل ساندویچی با هسته مشبک به روش تزریق در خلأ قابل مشاهده است. اولاً، در برخی نقاط حباب هایی در شبکه رزینی وجود دارد که نمونه آن در شکل 11-(الف) قابل مشاهده است. حباب ها بیشتر در نزدیکی لایه بالایی یعنی لایه ای که با کیسه خلأ در تماس بوده و با تأخیر بیشتری نسبت به لایه پایینی خیس می شود تشکیل می گردند. عیب دیگر عدم یکنواختی ضخامت ستون ها در شبکه رزینی است که علت آن نگه داشته شدن بلوک های فومی، تنها از طریق یک وجه با استفاده از مش یا پارچه است. در شکل 11-(ب) نمونه ای از تغییر ضخامت در شبکه قابل مشاهده است. وجود عیوب در ساختار قطعه باعث می شود تا نمونه های آزمایشی ساخته شده با این روش دقیقاً مشابه یکدیگر نبوده و در نتایج آزمایش ها به لحاظ آماری پراکندگی به وجود آید.

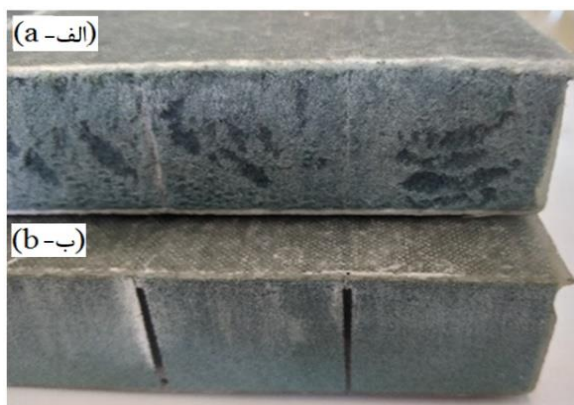


Fig. 10 Quality of cut surfaces using (a) water-jet and (b) table saw

شکل 10 کیفیت سطوح برش خورده با استفاده از (الف) آب افشان و (ب) اره رومیزی

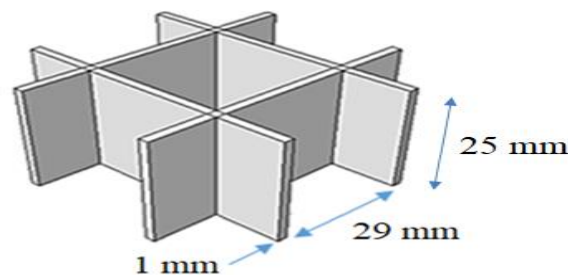


Fig. 8 The resin lattice solidified in the grooves

شکل 8 شبکه رزینی تشکیل شده در فضای شیارها

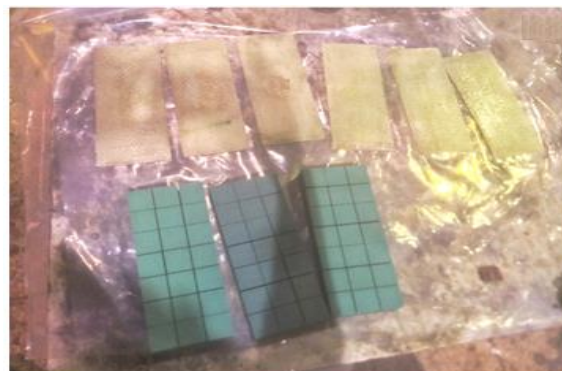


Fig. 9 Face-sheets fabricated by vacuum infusion after cutting and before adhesively bonding to the grooved foam core

شکل 9 رویه های ساخته به روش تزریق در خلأ پس از برشکاری و پیش از چسباندن شدن بر روی هسته شیاردار

در مرحله دوم رویه های ساخته شده بر روی سطوح بالایی و پایینی هسته مشبک با استفاده از چسب اپوکسی چسباندن و پخت آن در کیسه خلأ انجام شده است. ابعاد نمونه های شاهد ساخته شده (فاقد شبکه رزینی) همانند نمونه های اصلی (دارای شبکه رزینی) است که مقادیر آن در جدول 1 ذکر شده است.

3-2 آماده سازی نمونه های آزمایش

در تحقیق حاضر تأثیر وجود شبکه رزینی بر خواص مکانیکی پنل ساندویچی در بارگذاری های خمشی و فشاری مورد بررسی قرار گرفته است. این دو نوع بارگذاری در سازه های دریایی حائز اهمیت هستند. بارگذاری خمشی به دلیل پدیده کوبش امواج یکی از بارگذاری های اصلی وارد بر سازه شناور محسوب شده و با حرکت امواج، به صورت متوالی بر سازه وارد می شود. بارگذاری فشاری نیز در ضربات احتمالی وارد بر بدنه شناور در اثر برخورد ناخواسته آن با اسکله، صخره و یا سایر شناورها محتمل بوده و حائز اهمیت است.

برای بررسی رفتار پنل ساندویچی در بارگذاری خمشی از آزمون خمش سه نقطه ای بر اساس استاندارد ASTM C393 استفاده شده است [25]. ابعاد نمونه آزمون خمش با رعایت محدودیت های ذکر شده در این استاندارد مطابق جدول 2 در نظر گرفته شده است.

رفتار پنل ساندویچی در بارگذاری فشاری در راستای ضخامت بر اساس استاندارد ASTM C365 مورد بررسی قرار گرفته است [26]. نمونه دارای ابعاد مربعی به طول اضلاع 60×60 mm در داخل صفحه بوده و سایر ابعاد نظیر ضخامت رویه ها، ضخامت هسته و ضخامت شیار همانند ابعاد مذکور برای نمونه های خمشی در جدول 1 می باشد.

¹ Waterjet

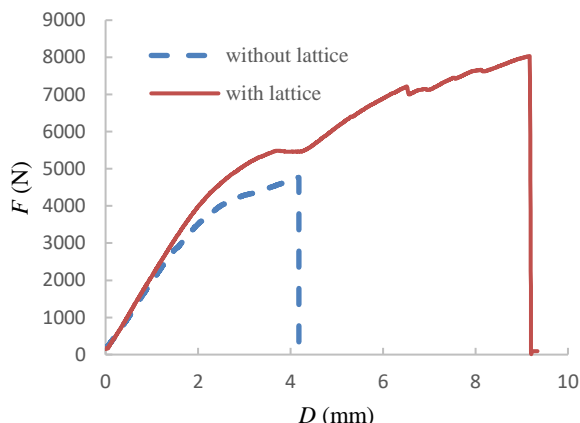


Fig. 13 Comparison of force-displacement diagrams obtained from the three-point bending tests for sandwich panel samples with resin lattice and without resin lattice

شکل 13 مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از آزمون خمش سه نقطه‌ای برای نمونه‌های پنل ساندویچی دارای شبکه رزینی و فاقد شبکه رزینی

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود نمودار مربوط به نمونه فاقد شبکه رزینی شیب کمتری نسبت به نمونه اصلی داشته و بسیار زودتر از نمونه اصلی دچار شکست می‌شود. به‌گونه‌ای که حداکثر نیروی قابل تحمل در نمونه اصلی 78% درصد بیشتر از نمونه فاقد شبکه رزینی است. این اختلاف بیش از هر چیز به تفاوت در مود شکست ایجاد شده در هر یک از دو نمونه بازمی‌گردد. در نمونه اصلی، مود شکست ناکارآمد کننده شکست لایه زیرین تحت کشش است. در حالی که در نمونه فاقد شبکه رزینی پیش از رسیدن تنش به استحکام کششی در رویه زیرین، رویه از هسته جدا می‌شود. با توجه به شیاردار بودن هسته، جدا شدن رویه از هسته باعث می‌شود ساختار ساندویچی سازه از بین رفته و ظرفیت تحمل خمش در آن به شدت افت نموده و سبب سقوط منحنی نیرو-جابجایی شود.

شکل 14 مودهای شکست ایجاد شده در رویه‌های بالایی و پایینی را در نمونه اصلی نشان می‌دهد. شکل 14-الف) ترک خوردگی رویه بالایی در محل تماس با سنبه و فشرده شدن فوم را در زیر سنبه نشان می‌دهد که در طی بارگذاری با ایجاد سر و صدایی ملایم به تدریج ایجاد شده و سبب بروز دندانه‌هایی در نمودار در نزدیکی مراحل پایانی بارگذاری می‌شود. شکل 14-ب) گسیختگی رویه پایینی را در سوی مقابل سنبه یعنی جایی که تنش‌های کششی ناشی از خمش بیشترین مقدار را دارند نمایش می‌دهد. شکست لایه زیرین برخلاف لایه رویین به‌طور ناگهانی و بدون علامت قبلی همراه با صدای شدیدی واقع شده و باعث سقوط آنی نمودار می‌شود.

برای داشتن مقایسه‌ای صحیح از عملکرد نمونه با افزوده شدن شبکه رزینی لازم است تا افزایش جرم ناشی از پر شدن فضای خالی شیارها با رزین نیز مورد توجه قرار گیرد. جرم نمونه، با و بدون شبکه رزینی با در نظر گرفتن چگالی وینیل استر، $\rho = 1045 \text{ kg/m}^3$ ، به ترتیب 248 g و 242.5 g بوده و اضافه شدن شبکه رزینی با جرم 5.5 g تنها 2% به جرم نمونه می‌افزاید. به‌عبارت دیگر 78% افزایش در حداکثر نیروی قابل تحمل معادل افزایش نیروی قابل تحمل ویژه به میزان 76.3% خواهد بود.

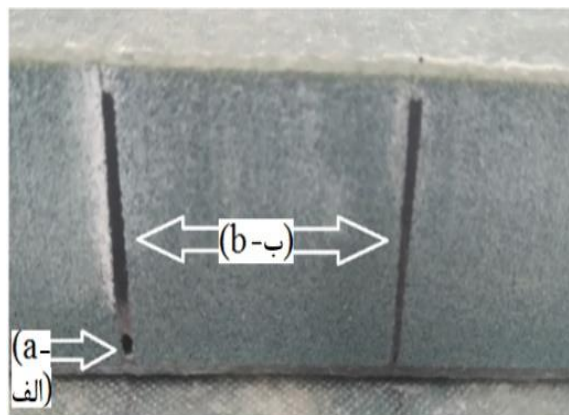


Fig. 11 Probable defects in sandwich panel fabrication, (a) bubble formation and (b) non-uniform thickness

شکل 11 عیوب محتمل در ساخت، (الف) تشکیل حباب و (ب) ضخامت نایکنواخت

با توجه به آن که ساخت پنل ساندویچی با هسته مشبک به روش تزریق در خلأ در ساخت پنل‌هایی در ابعاد بزرگ برای کاربردهای دریایی پیشنهاد شده است وجود چنین عیب‌هایی با در نظر گرفتن ضریب اطمینان مناسب در طراحی بلامانع است.

3- نتایج و بحث

3-1-3 آزمون خمش سه نقطه‌ای

بررسی خواص خمشی پنل ساندویچی با استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای صورت گرفته است. نحوه قرارگیری نمونه بر روی فیکسچر آزمون خمش سه نقطه‌ای با رعایت طول دهانه فیکسچر و فاصله دو تکیه‌گاه تا لبه‌ی نمونه (طبق دستورالعمل مذکور در استاندارد) در شکل 12 نشان داده شده است. دستگاه کشش به‌کاررفته برای انجام آزمایش‌ها ساخت شرکت سنتام مدل STM-150، واقع در آزمایشگاه خواص مکانیکی در پژوهشکده مهندسی کامپوزیت دانشگاه صنعتی مالک اشتر بوده است. اعمال بار به روش کنترل جابجایی و با نرخ 6 mm/min انجام گرفته است. آزمون دو مرتبه برای نمونه‌های اصلی (دارای شبکه رزینی) و دو مرتبه برای نمونه‌های شاهد (فاقد شبکه رزینی) تکرار شده است. شکل 13 نمودار نیرو-جابجایی را برای نمونه اصلی و نمونه فاقد شبکه رزینی در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد. هر یک از نمودارها از میانگین دو تکرار انجام شده به دست آمده است.

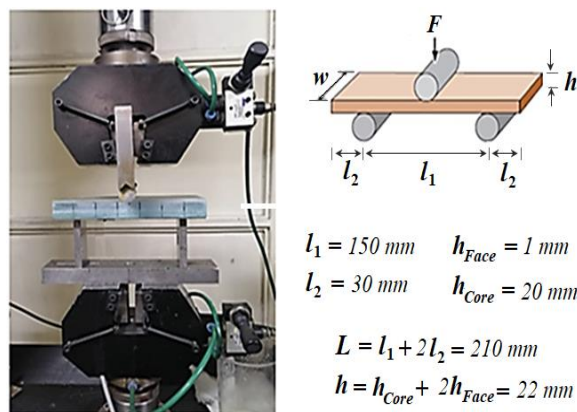


Fig. 12 Dimensions and placement of the sample in the three-point bending fixture

شکل 12 ابعاد نمونه و قرارگیری آن در فیکسچر آزمون خمش سه نقطه‌ای

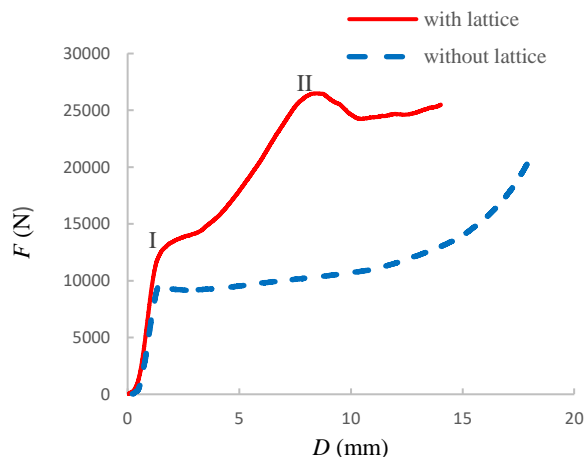


Fig. 16 Comparison of force-displacement diagrams obtained from the through thickness compression test for sandwich panel samples with resin lattice and without resin lattice

شکل 16 مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از آزمون فشار در راستای ضخامت برای نمونه‌های پنل ساندویچی دارای شبکه رزینی و فاقد شبکه رزینی

دو نمودار در مراحل اولیه آزمون تطابق نزدیکی با یکدیگر دارند تا جایی که نمونه فاقد شبکه رزینی (نمودار خط چین) در جابجایی 2.2 mm به آستانه تسلیم می‌رسد. در نقطه تسلیم، نمودار شکسته شده و شیب آن به صفر نزدیک می‌شود. شیب صفر نمودار به معنای وادادگی و عدم تحمل نیروی بیشتر در آن است. در این بخش، نیروی وارده صرف فشرده و متراکم شدن فوم می‌شود. نمودار تا جابجایی 9 mm تقریباً به حالت افقی ادامه می‌یابد تا آن که خلل و فرج فوم در اثر فشرده شدن پر شده و نمودار پس از جابجایی 9 mm مجدداً روند صعودی به خود می‌گیرد. روند نمودار در نمونه فاقد شبکه رزینی عمدتاً متأثر از رفتار فوم است. به همین خاطر نمودار مربوطه مشابه آنچه در رفتار فشاری فوم‌ها رایج است شامل سه بخش یعنی بخش الاستیک، بخش یکنواخت¹ و بخش تراکمی² است [27].

شکل 17 تغییر شکل دو نمونه آزمایش شده فاقد شبکه رزینی را نشان می‌دهد. در شکل 17-الف) چهار وجه جانبی نمونه اول و در شکل 17-ب) چهار وجه جانبی نمونه دوم نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل به خوبی دیده می‌شود پدیده بشکته‌ای شدن در برخی سطوح جانبی آزاد ایجاد شده است که در آزمون فشاری فوم تغییرشکلی شایع است. در صورتی که از وقوع پدیده کماتش پیشگیری شود ظرفیت تحمل فشار در قطعه افزایش می‌یابد.

در مقابل، در نمونه اصلی وجود شبکه رزینی باعث به تأخیر افتادن جابجایی در نقطه تسلیم و ادامه رفتار الاستیک تا حدود جابجایی 2.4 mm می‌شود. پس از این نقطه (نقطه I)، با ایجاد اولین شکست در دیواره‌ی شبکه رزینی، نمودار از حالت خطی خارج شده و کاهش چشمگیری در شیب نمودار نسبت به ناحیه الاستیک ایجاد می‌شود. این وادادگی پس از چندی بازیابی شده، شیب نمودار به تدریج افزایش یافته و نمودار مجدداً صعود می‌کند تا آن که در نقطه II دومین شکست در دیواره رزینی اتفاق افتاده و نمودار افت دیگری را تجربه می‌کند.

مقایسه کیفی شکل دو نمودار حاکی از آن است که در نمونه فاقد شبکه رزینی روند نمودار یکنواخت‌تر بوده و روندی صعودی دارد. اما در نمونه اصلی شکست جداره‌های رزینی به تدریج صورت گرفته و به همین خاطر نمودار

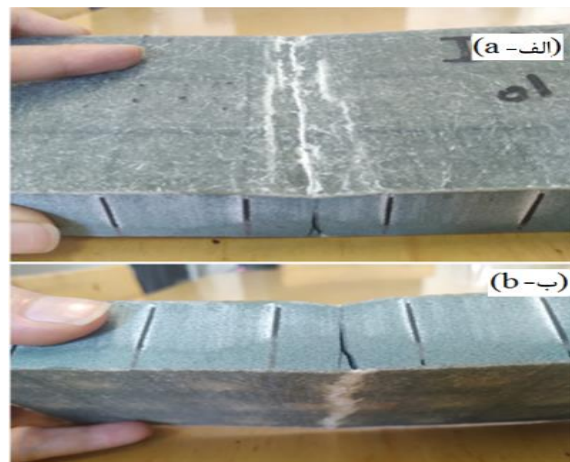


Fig. 14 Failure appeared in (a) upper face-sheet and (b) lower face-sheet in the sample with resin lattice under three-point bending test
شکل 14 شکست ایجاد شده در (الف) رویه بالایی و (ب) رویه پایینی در نمونه دارای شبکه رزینی تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

2-3-آزمون فشار

آزمون فشار مطابق شکل 15 با استفاده از دو صفحه فولادی که می‌توان آن‌ها را در مقایسه با نمونه آزمایش صلب فرض کرد انجام شده است. سطح تماس نمونه با فیکسچر روغن کاری شده است تا امکان لغزش رویه‌های بالا و پایین بر روی فیکسچر فراهم شده و بارگذاری وارده تا حد ممکن به فشار خالص نزدیک شود. برای انجام آزمون‌های فشار، از دستگاه کشش با مشخصات ذکر شده در بخش 1-3 استفاده شده است. بارگذاری با روش کنترل جابجایی و با نرخ 3 mm/min اعمال و آزمون تا جابجایی 14 mm ادامه یافته است.

آزمون دو مرتبه برای نمونه اصلی (دارای شبکه رزینی) و دو مرتبه برای نمونه شاهد (فاقد شبکه رزینی) تکرار شده است. برای نمونه فاقد شبکه رزینی دو نمودار بسیار به یکدیگر نزدیک است که به همگن بودن ساختار فوم به کاررفته بازمی‌گردد. اما در نمونه دارای شبکه رزینی تفاوت اندکی بین دو نمودار مشاهده شد که به ساختار ناهمگن شبکه رزینی در دو نمونه و وجود عیوبی همچون نایکنواختی در ضخامت شبکه رزینی و ایجاد حباب در آن مربوط می‌شود. میانگین دو تکرار انجام شده برای دو نمونه فاقد شبکه رزین و نمونه دارای شبکه رزین در شکل 16 با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

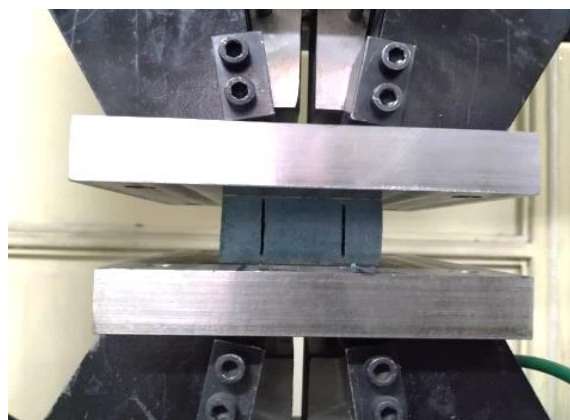


Fig. 15 The sample in the through thickness compression fixture
شکل 15 قرارگیری نمونه در فیکسچر آزمون فشار در راستای ضخامت

² Densification part

¹ Plateau part



Fig. 18 Deformation of the sample with resin lattice under through thickness compression, (a) four sides of the first samples and (b) four sides of the second sample

شکل 18 تغییرشکل نمونه دارای شبکه رزینی در اثر فشار عرضی، (الف) چهار وجه جانبی نمونه اول و (ب) چهار وجه جانبی نمونه دوم

4-جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر روش ساختی مبتنی بر روش تزریق در خلأ به صورت تجربی اجرا شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. هسته مورد استفاده در این روش فوم PVC شیردار بوده است. استفاده از فرایند تزریق در خلأ باعث می‌شود تا فضای خالی شیرها با رزین پر شده و پس از پخت، شبکه‌ای از رزین مشابه با هندسه شیرها ایجاد گردد. شبکه رزینی به شکل خودکار در طی فرایند تزریق شکل گرفته و نیازی به عملیات اضافه برای پیاده‌سازی آن وجود ندارد. این امر باعث می‌شود تا ساخت هسته‌ای متشکل از شبکه رزینی پر شده با فوم با این روش به سادگی و با هزینه پایین قابل پیاده‌سازی باشد.

در عین سادگی فرایند ساخت، استحکام خمشی، استحکام فشاری و ظرفیت جذب انرژی در نمونه‌های ساخته شده با این روش نسبت به نمونه ساخته شده با روش اتصال چسبی به ترتیب 78%، 92% و 101% بهبود یافته است. در بارگذاری خمشی تأثیرگذارترین عامل در بهبود به دست آمده، به اتصال بهتر رویه با هسته در این روش ساخت بازمی‌گردد. زیرا در نمونه ساخته شده با روش اتصال چسبی جدا شدن رویه از هسته مانع ادامه بارگذاری شده است. در بارگذاری فشاری تأثیرگذارترین عامل در بهبود به دست آمده، محصور شدن بلوک‌های فومی با شبکه رزینی است که مانع بروز پدیده بشک‌های شدن در بلوک‌های فومی شده است.

مقایسه و جمع‌بندی نتایج حاصل نشان می‌دهد که تقویت هسته با شبکه رزین، استحکام فشاری در راستای ضخامت را بیشتر از استحکام خمشی تحت تأثیر قرار داده است. دلیل این امر آن است که رفتار خمشی پنل ساندویچی عمدتاً متأثر از هندسه و جنس رویه بوده و از ساختار و جنس هسته تأثیر کمتری می‌پذیرد. بررسی عملکرد محصول در سایر انواع بارگذاری‌هایی که از جنس و ساختار هسته تأثیر بیشتری می‌پذیرند در ادامه پژوهش پیشنهاد می‌شود. همچنین بررسی عملکرد محصول در بارگذاری‌های دینامیکی و خستگی و به‌ویژه در بارگذاری ضربه‌ای که در صنایع دریایی از ارزش کاربردی بالایی برخوردار است در ادامه این پژوهش پیشنهاد می‌شود. و در نهایت، موضوع حائز اهمیت دیگر بررسی مستقیم کیفیت اتصال رویه به هسته است تا به صورت کمی مشخص گردد که روش حاضر تا چه اندازه در ارتقای این ویژگی می‌تواند تأثیرگذار باشد.

مربوطه با افت و خیزهایی در طول بارگذاری همراه است. مقایسه کمی دو نمودار تا جابجایی 15 mm نشان می‌دهد که بیشترین نیرو در نمونه اصلی 92% بیشتر از نمونه فاقد شبکه رزینی است که ارتقای درخور اعتناایی است. تفاوت حائز اهمیت دیگر اختلاف قابل توجه بین سطح زیر منحنی این دو نمودار است که نشان‌دهنده ظرفیت جذب انرژی در هر یک از دو ساختار است. سطح زیر منحنی در پنل ساندویچی ساخته شده به روش تزریق در خلأ برابر با 277612N.mm و در پنل ساندویچی فاقد شبکه رزینی 138021N.mm است که حاکی از افزایش 101% در جذب انرژی در نمونه ساخته شده به روش تزریق در خلأ نسبت به نمونه فاقد شبکه رزینی است.

شکل 18 تغییر شکل دو نمونه اصلی (دارای شبکه رزینی) را نشان می‌دهد. در شکل 18-الف) چهار وجه جانبی نمونه اول و در شکل 18-ب) چهار وجه جانبی نمونه دوم نمایش داده شده است. با مقایسه نحوه تغییر شکل در نمونه دارای شبکه رزینی با نمونه فاقد شبکه رزینی نتیجه می‌شود که وجود شبکه رزینی باعث بهبود خواص فشاری پنل ساندویچی با سه مکانیزم مختلف می‌گردد. اول آن که شبکه رزینی در تحمل بار فشاری مستقیماً مشارکت می‌کند. این مشارکت تا جایی ادامه می‌یابد که شبکه رزینی تحت بار فشاری در اثر کماتش موضعی¹ [15] دچار واماندگی شود. دوم آن که وجود شبکه رزینی باعث مقید شدن سطوح جانبی آزاد در بلوک‌های فومی شده و مانع پدیده بشک‌های شدن در سطوح مقید می‌شود. سوم آن که محصور شدن بلوک‌های فومی در چارچوب رزینی باعث می‌شود تنش از حالت تک‌محوره به حالت سه محوره تبدیل شده و ظرفیت تحمل بار در فوم نیز به این ترتیب افزایش یابد.

با در نظر گرفتن مجموعه عوامل فوق نتیجه می‌شود که وجود مشبک رزین و بلوک‌های فومی در تماس با یکدیگر باعث هم‌افزایی و در نتیجه بهبود عملکرد هر یک از این دو جزء شده است. به گونه‌ای که از یک سو وجود بلوک‌های فومی در نقش بستر الاستیک² مانع کماتش سراسری³ جداره‌های رزینی می‌گردد [27]. از سوی دیگر وجود جداره رزینی با محصور کردن بلوک‌های فومی مانع ایجاد پدیده بشک‌های شدن و افزایش ظرفیت تحمل بار در فوم می‌شود.

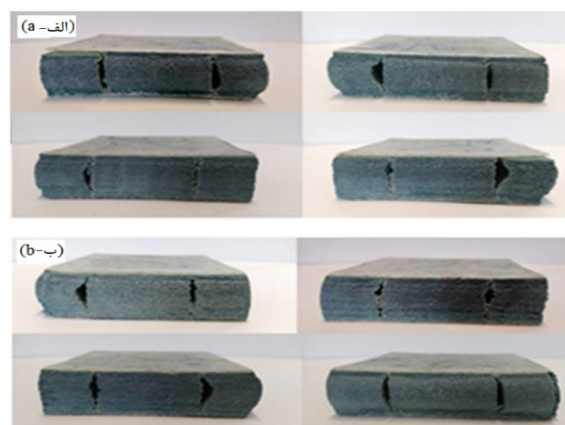


Fig. 17 Deformation of the sample without resin lattice under through thickness compression, (a) four sides of the first samples and (b) four sides of the second sample

شکل 17 تغییرشکل نمونه فاقد شبکه رزینی در اثر فشار عرضی، (الف) چهار وجه جانبی نمونه اول و (ب) چهار وجه جانبی نمونه دوم

³ Global buckling

¹ Local buckling

² Elastic foundation

5-مراجع

- with CNT-reinforced composite layers using Galerkin method”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1677-1686, 2022.
- [17] Hou, S., Li, T., Jia, Z. and Wang, L., “Mechanical properties of sandwich composites with 3d-printed auxetic and non-auxetic lattice cores under low velocity impact”, Materials & Design, Vol. 160, No. 1, pp. 1305-1321, 2018.
- [18] Mazloomi, M.S. and Ranjbar, M., “Hybrid design optimization of sandwich panels with gradient shape anti-tetrachiral auxetic core for vibroacoustic applications”, Transport in Porous Media, Vol 9, No. 1, pp. 1-8, 2021.
- [19] Khorshidi, K. and Shabani, Y., “Free vibration analysis of sandwich plates with magnetorheological smart fluid core by using modified shear deformation theory,” In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 4, pp. 1826-1835, 2022.
- [20] Najafi, M. and Eslami-Farsani, R., “Introducing novel sandwich panels based on of cork/polyurethane foam hybrid core and composite grid structure for marine applications”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 3, pp. 1064-1075, 2020.
- [21] Karlsson, K.F. and Aström, B.T., “Manufacturing and applications of structural sandwich components”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 28, No. 2, pp. 97–111, 1997.
- [22] Krzyżak, A., Mazur, M., Gajewski, M., Drozd, K., Komorek, A. and Przybyłek P., “Sandwich structured composites for aeronautics: methods of manufacturing affecting some mechanical properties”, International Journal of Aerospace Engineering, Vol 1, No. 1, pp 1-10, 2016.
- [23] Yousefi, A.L., Mohammadi, B. and 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.
- [24] Halimi, F., Golzar, M., Asadi, P. and Beheshty, M.H., “Core modifications of sandwich panels fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding”, Journal of composite materials, Vol. 47, No. 15, pp. 853-863, 2013.
- [25] Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions, Annual Book of ASTM Standard, C 393-00, 2000.
- [26] Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Composite Cores, Annual Book of ASTM Standard, C 365/365-11a, 2011.
- [27] Ziaie, M., Zamani, F., Homayouni, S., Khaledi, H., Qareqani, A., Ziaie, M., “Numerical and experimental study on mechanical properties of glass fiber-reinforced polymer sandwich structure with polyurethane foam-filled M-shaped core”, Polymer Composites, Vol. 44, No. 2, pp. 1054-1070, 2023.
- [1] Khodaei, M., Safarabadi-Farahani, M. and Haghghi-Yazdi, M., “Numerical investigation of high velocity impact on foam-filled honeycomb structures including foam fracture model”, Mechanics of Advanced Materials and Structures, Vol. 29, No. 4, pp. 748-760, 2022.
- [2] Jayaram, R. S., Nagarajan, V.A. and Kumar, K.V., “Compression and low velocity impact response of sandwich panels with polyester pin-reinforced foam filled honeycomb core”, Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol 21, No 6, pp 2014-2030, 2019.
- [3] Jayaram, R. S., Nagarajan, V.A. and Kumar, K.V., “Low velocity impact and compression after impact behaviour of polyester pin-reinforced foam filled honeycomb sandwich panels”, Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol 24, No 1, pp157-173, 2022
- [4] Masoumiasl, S. and Rahimi, G.H., “Experimental and numerical investigation of effect of shape of ribs on flexural behavior of curved composite sandwich panels with lattice core”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 3, pp. 351-362, 2019.
- [5] Zarei, M. and Rahimi, G.H., “Global buckling load calculation of the of sandwich conical shells with lattice cores subjected to axial compression loading using a novel smeared method”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1217-1226, 2021.
- [6] Zarei, M., Rahimi, G.H. and Hemmatnezhad, M., “A novel smeared method for investigating the free vibrations of sandwich conical shells with lattice cores”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1163-1170, 2021.
- [7] Heidari-shahmaleki, E. and Zeinedini, A., “Application of cotton/epoxy laminated composites to fabricate the uni- and bi-directional cosine corrugated cores sandwich panels”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No.7, pp. 863-872, 2020.
- [8] Maher, R., Khalili, S. M. R. and Eslami-Farsani, R., “The effect of shape memory wire on the ballistic behavior of smart corrugated core sandwich panels”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1612-1627, 2021.
- [9] Taghizadeh, S.A., Farrokhhabadi, A., Liaghat, G.H., Pedram, E., Malekinejad, H., Mohammadi, S.F. and Ahmadi, H., “Characterization of compressive behavior of PVC foam filled composite sandwich panels with different corrugated core shapes”, Thin-Walled Structures, Vol 135, No 1, pp. 160-172, 2019.
- [10] Balıkoğlu, F., Demircioğlu, T. K. and Arslan, N., “Compressive and flexural behaviour of pin reinforced marine composite sandwich beams”, Proceedings of the IV international EGE composite materials symposium, pp. 454-461, Izmir, Turkey, 2018
- [11] Toluei, A. and Etemadi, E., “Mechanical properties of multifunctional composite structures with z-pin core using numerical simulation of Hopkinson pressure bar test device”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 683-693, 2020.
- [12] Rahmani, M., Mohammadi, Y. and Kakavand, F., “Vibration analysis of truncated conical sandwich shell with porous FG core in different thermal loading ”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 694-704, 2020.
- [13] Torabizadeh, M.A., “Experimental study of the effect of impact shape and skin layout on the behavior of aluminum foam core sandwich panels at low velocity impact load”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1153-1162, 2021.
- [14] Yan, L.L., Yu, B., Han, B., Chen, C.Q., Zhang, Q.C. and Lu, T.J., “Compressive strength and energy absorption of sandwich panels with aluminum foam-filled corrugated cores”, Composites Science and Technology Vol 24, No. 86, pp. 142-148, 2013.
- [15] Wu, Z., Liu, W., Wang, L., Fang, H. and Hui, D., “Theoretical and experimental study of foam-filled lattice composite panels under quasi-static compression loading” Composites Part B: Engineering, Vol. 60, No. 1, pp.329-340, 2014.
- [16] Shabani, Y. and Khorshidi, K., “Free vibration analysis of rectangular doubly curved auxetic-core sandwich panels integrated