جلد 7، شماره 3، پاییز 99، ص‌ص 1064-1075

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیت**

http://jstc.iust.ac.ir

معرفی پانل‌های ساندویچی نوین مبتنی بر هسته هیبریدی کورک/فوم پلی‌یورتان و ساختار مشبک کامپوزیتی برای کاربردهای دریایی

مسلم نجفی[1]، رضا اسلامی فارسانی[2*]

1- محقق پسادکترا، دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد، دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، کدپستی 43344-19919، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 99/03/22

پذیرش: 99/10/03

کلیدواژگان

پانل‌های ساندویچی

هسته هیبریدی

کورک

فوم پلی‌یورتان

ساختار مشبک کامپوزیتی

چکیده

فوم‌های پلی‌یورتان کم‌چگالی به‌عنوان موادی ارزان‌قیمت و در عین حال سبک، در ساخت بخش‌هایی از سازه شناورهای دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این وجود، این فوم‌ها دارای خواص مکانیکی پایین بوده و در برابر نفوذ آب و رطوبت حساس هستند. وجود عیوب اولیه یا آسیب‌های ناشی از ضربه در سطح خارجی شناورهای دریایی می‌تواند به نفوذ آب به داخل هسته فومی منجر شود که عموماً به فساد هسته و متعاقب آن تورق در ناحیه اتصال هسته/پوسته خواهد انجامید. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش کاهش نقاط ضعف ساختارهای مبتنی بر فوم‌های پلی‌یورتان کم‌چگالی از طریق معرفی یک ماده جدید در این حوزه است. بدین منظور، یک پانل ساندویچی با هسته هیبریدی متشکل از کورک آگلومره و فوم پلی‌یورتان کم‌چگالی، تقویت‌شده با ساختار مشبک کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه، طراحی، ساخته و مورد آزمون قرار گرفت. نتایج آزمون پیرسازی 100 روزه در آب نشان داد که جذب آب نمونه‌های جدید کمتر از نصف نمونه‌های ساندویچی متداول مبتنی بر فوم پلی‌یورتان است. همچنین جایگزین نمودن هسته هیبریدی فوم پلی‌یورتان/کورک تقویت‌شده به‌جای هسته فوم پلی‌یورتان منجر به افزایش 506، 814 و 144.94 درصد به ترتیب در بیشینه بار خمشی، سفتی خمشی اولیه و چقرمگی خمشی پانل شد. در ادامه با استفاده از شبیه‌سازی عددی آزمون خمش، رفتار سازه‌ای دو نوع ساختار جدید و متداول مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل عددی نشان داد که سفتی خمشی پانل جدید نسبت به ساختار متداول حدود 884% ارتقاء یافته است.

Introducing novel sandwich panels based on of cork/polyurethane foam hybrid core and composite grid structure for marine applications

Moslem Najafi, Reza Eslami-Farsani*

1- Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
* P.O.B., 19919-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

Keywords

Sandwich panels
Hybrid core
Cork
Polyurethane foam,
Composite grid structure

Abstract

Low-density polyurethane foams as the low-cost and lightweight materials are used to produce some structural parts of marine vessels. However, these foams have low mechanical properties and they are susceptible to water and moisture penetration. The presence of initial defects or impact-induced damages on the external surface of the marine vessels can lead to the water penetration into the foam core, which generally results in core decay and, subsequently, delamination in core/skin interfacial bonding. Thus, the main objective of this research is to reduce the weaknesses of low-density polyurethane foam-based structures by introducing a novel material in this field. For this purpose, a sandwich panel with a hybrid core consisting of agglomerated cork and low-density polyurethane foam reinforced by a composite grid from epoxy/glass fibers structure is successfully designed, fabricated, and tested. Results of 100-days aging indicated that the water absorption of novel specimens was less than half of the conventional polyurethane-based specimens. In addition, replacing the stiffened cork/polyurethane hybrid core instead of the polyurethane core resulted in 506, 814 and 144.94 % increase in maximum flexural load, initial flexural stiffness and flexural toughness, respectively. In the following, the structural behavior of both the novel and conventional structures was investigated by numerical simulation of bending test. The results of numerical analysis showed that the flexural stiffness of novel panel was enhanced about 884%, comparing to the conventional structure.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Najafi, M. 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.

1- مقدمه

امروزه مواد کامپوزیتی در دو نوع چندلایه‌های تک‌پوسته[1] و پانل‌های ساندویچی[2] به نحو گسترده‌ای در طراحی و ساخت سازه‌های دریایی بکار می‌روند. از سویی، اثبات شده است که قرارگیری طولانی‌مدت سازه‌های ساخته‌شده از کامپوزیت‌ها در معرض شرایط محیطی دریایی نظیر ضربات مکرر امواج، آب شور، رطوبت و اشعه ماوراء بنفش منجر به کاهش خواص مکانیکی و فیزیکی این مواد می‌شود. شرایط محیطی خشن به‌عنوان یک مانع عمده برای استفاده طولانی مدت از مواد کامپوزیتی محسوب شده و همواره یکی از مسائل مورد علاقه محققان بوده است [1]. بدیهی است که یک طراحی کارآمد نیازمند پیش‌بینی‌های لازم از رفتار سازه کامپوزیتی تحت شرایط سرویس‌دهی در هر دو حالت متعارف و خشن است.

کاربرد پانل‌های ساندویچی به دلیل مزایایی نظیر استحکام و سفتی نسبت به وزن بالا، مقاومت بالا در برابر بارهای خمشی، مقاومت به خوردگی و قیمت مناسب در صنایع مختلف نظیر صنعت دریایی رو به گسترش است [3،2]. در این نوع ساختارها، پوسته‌های مستحکم عموماً به منظور تحمل تنش‌های نرمال طراحی‌شده و هسته، بخش سبک و ضعیف‌تر پانل ساندویچی بوده و وظیفه تأمین تحمل بارهای برشی جانبی را به عهده دارد [4]. پانل-های ساندویچی متداول در حوزه دریایی عمدتاً متشکل از پوسته‌هایی از جنس مواد کامپوزیتی پلیمری همراه با هسته‌هایی سبک نظیر چوب بالسا[3]، فوم‌های پلی‌یورتان[4]، فوم‌های پی‌وی‌سی[5] و چوب لایه‌ای دریایی[6] می‌باشند.

چوب بالسا به‌عنوان یک ماده طبیعی، به سبب ویژگی‌های مناسبی نظیر وزن کم، سفتی قابل‌توجه و مقاومت بالا در برابر تغییر شکل‌های خارج از صفحه و بارهای ضربه‌ای جانبی نسبت به سایر هسته‌ها با چگالی برابر، از دیرباز در ساخت شناورهای دریایی مورداستفاده قرار گرفته است [6،5]. با این وجود، بزرگ‌ترین چالش بر سر راه استفاده گسترده از این ماده، در نقطه‌ضعف طبیعی موجود در این نوع چوب نهفته است. بالسا به‌عنوان یک ماده بسیار مستعد به جذب رطوبت شناخته می‌شود. در صورت وقوع آسیب-های موضعی در سطح بیرونی یک شناور ساخته‌شده از ساختار ساندویچی متشکل از چوب بالسا و کامپوزیت پایه پلیمری، آب از طریق منافذ موجود در آسیب به درون پوسته نفوذ کرده و سپس به‌سرعت وارد هسته می‌شود. با وقوع این امر، کاهش خواص برشی سطح مشترک کامپوزیت/هسته و تورق[7]، وقوع جذب آب شدید توسط هسته آب‌دوست[8] بالسا و پوسیدگی هسته امری بسیار محتمل است. به این ترتیب پیامدهایی نظیر افزایش وزن سازه به سبب جذب آب بروز کرده که منجر به کاهش سرعت و چالاکی یک شناور دریایی شده و به‌تبع آن افزایش مصرف سوخت و درنهایت خارج شدن شناور از شرایط عملیاتی را به همراه دارد [7].

فوم‌های پی‌وی‌سی با چگالی‌های متنوع جایگاه ویژه‌ای در ساخت سازه‌های دریایی دارند. ساختار سلول‌بسته این نوع فوم‌ها موضوع جذب آب را در این مواد تا حد بسیار زیادی مرتفع ساخته و با توجه به خواص مکانیکی بسیار خوب، آن‌ها را به عنوان گزینه‌ای مناسب در طراحی پانل‌های ساندویچی دریایی مطرح می‌سازد. البته همین ویژگی مثبت عدم جذب آب، به نحوی دیگر خاصیت چسبندگی سطح اتصال فوم به لایه‌های کامپوزیتی را به شکل منفی تحت‌الشعاع قرار داده است. مسئله تورق در ناحیه هسته/پوسته در پانل کف[9] شناورها که عموماً در معرض بارهای تکراری ناشی از کوبش امواج (اسلمینگ)[10] است، کاربرد این ماده را با محدودیت مواجه نموده است.

امروزه از فوم‌های پلی‌یورتان به عنوان شکل‌دهنده در بخش هسته تقویتی‌های طولی و عرضی پانل شناورهای کامپوزیتی تک‌پوسته یا ساندویچی استفاده می‌شود. با توجه به جذب آب قابل توجه و خواص مکانیکی نسبتاً پایین، هیچ‌گاه از این نوع فوم‌ها به‌صورت مستقیم در سازه پانل کف شناورهای دریایی با ساختار ساندویچی استفاده نمی‌شود. البته در کنار نقاط ضعف فوم‌های پلی‌یورتان، مزایایی نظیر قیمت بسیار پایین، برقراری اتصال مناسب با لایه‌های کامپوزیتی و سهولت کار مطرح می‌باشد.

در تحقیقی انجام شده توسط مانوجش و همکاران روی خواص مکانیکی پانل‌های ساندویچی مبتنی بر هسته فوم پلی‌یورتان، مشخص شد که شرایط مه نمکی و رطوبت برای مدت 180 روز منجر به کاهش شدید خواص خمشی و فشاری مواد مورد مطالعه می‌شود [8]. این کاهش خواص عمدتاً تغییراتی در ساختار هسته فومی و تشدید بروز ترک در فوم و کاهش انسجام ساختاری پانل ساندویچی را به همراه دارد. نتایج نشان داد که کاهش خواص ناشی از اعمال شرایط مرطوب در پانل‌های ساندویچی با هسته‌های فومی با چگالی کمتر بیش از نوع دیگر خواهد بود.

فارغ از نوع ساختار کامپوزیتی، عموماً در تمامی شناورهای دریایی پس از ساخت ورق کف، از تقویتی‌های طولی و عرضی[11] جهت افزایش استحکام پانل استفاده می‌شود. استفاده از سیستم فریمینگ ثانویه به شکل متداول عمدتاً به لحاظ فنی و ملاحظات ساخت، دارای مشکلاتی نیز می‌باشد. عموماً در مرحله اول، ورق کف ساخته شده و پس از پخت، سیستم فریمینگ روی آن اعمال می‌شود. با توجه به افزایش چگالی پیوندهای عرضی رزین در هنگام پخت، اتصال یک المان ثانویه به ساختار پیش‌پخت‌شده دارای شرایط ایده‌آل و استحکام عالی نخواهد بود. استفاده از این روش متداول تقویت سازه در بسیاری از موارد با آسیب‌هایی جدی نظیر جدایش تقویتی‌ها از ورق کف همراه است. از سویی، اعمال اتصالات ثانویه عمدتاً فرایندی زمان‌بر و پرهزینه است که زمان اجرای پروژه را به نحو قابل توجهی افزایش می‌دهد.

ژو و همکاران، تأثیر پدیده کوبش کف را به‌صورت تجربی و عددی روی قسمتی از لگن شناورهای دریایی با ساختارهای ساندویچی تقویت‌شده با فریمینگ مبتنی بر فوم پلی‌یورتان مورد بررسی قرار دادند [9]. نتایج این بررسی نشان داد که با توجه به وجود ناپیوستگی ناگهانی در ناحیه اتصال پوسته با فریمینگ، این ناحیه از نقاط بسیار آسیب‌پذیر بوده که عمده تورق از همین نواحی در شناورهای کامپوزیتی رخ می‌دهد (شکل 1).

با توجه به عدم وجود سفتی خمشی مناسب در سازه‌های ساخته شده با طرح تک‌پوسته، معمولاً طراحان به منظور اقناع حدود مجاز طراحی، از تعداد زیادی لایه‌های کامپوزیتی استفاده می‌کنند که قاعدتاً افزایش وزن سازه را به دنبال دارد. همچنین مقاومت به ضربه و شوک نامناسب این ساختارها، همواره به عنوان یکی از چالش‌های اصلی طراحان سازه‌های دریایی قلمداد می‌شود. با ارائه پانل‌های ساندویچی و حل بسیاری از مشکلات ساختارهای کامپوزیتی تک‌پوسته، ضعف رفتار فشاری هسته در برابر بارهای شدید و

[1] Single-Skin Laminates
[2] Sandwich Panels
[3] Balsa Wood
[4] Polyurethane Foams
[5] Polyvinyl Chloride Foams
[6] Marine Plywood
[7] Delamination
[8] Hydrophilic
[9] Bottom Panel
[10] Slamming
[11] Longitudinal and Transverse Stiffeners

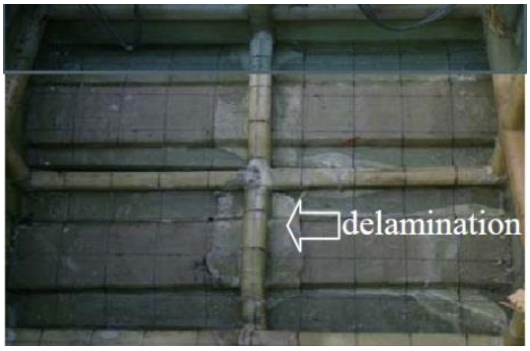


Fig. 1 An example of destruction in bottom panel of a composite vessel due to debonding of longitudinal and transverse stiffeners from bottom plate [9]

شکل 1 نمونه‌ای از تخریب در پانل کف یک شناور کامپوزیتی بر اثر وقوع جدایش تقویتی‌های طولی و عرضی از ورق کف [9]

همچنین جدایش در ناحیه هسته/پوسته به عنوان مشکلات عمده این نوع ساختارها تاکنون به قوت خود باقی است.

پانل‌های ساندویچی مبتنی بر فوم عموماً در جهت ضخامت[1] خواص مکانیکی نسبتاً ضعیفی از خود بروز می‌دهند. از این رو، در دو دهه اخیر گرایش به تقویت قسمت هسته پانل‌های ساندویچی با استفاده از روش‌های نظیر دوخت[2]، یا زد پین کردن[3] توسعه یافته است. لاسکوپ و همکاران، در تحقیقات خود دریافتند که دوختن هسته توسط نخ‌های شیشه‌ای در راستای ضخامت به بهبود رفتار خمشی پانل‌های ساندویچی با هسته فوم پلی‌یورتان منجر می‌شود [10]. یالکین و همکاران، خواص خمشی، برشی و ضربه‌ای پانل‌های ساندویچی با هسته‌های سوراخ‌دار، دوخته‌شده و ساده را مورد بررسی قرار دادند [11]. مشاهده شد که پانل‌های ساندویچی دارای هسته‌های سوراخ‌دار پرشده با رزین اپوکسی و همچنین هسته‌های دوخته‌شده، دارای خواص مکانیکی بالاتری از ساندویچ‌های با هسته ساده هستند. البته مشخصاً به سبب خاصیت تردی و استحکام و سفتی پایین رزین تقویت‌نشده، پانل‌های ساندویچی با هسته‌های دوخته‌شده بهترین شرایط را دارا بودند. ژنگ و همکاران، پانل‌های ساندویچی با هسته فوم تقویت‌شده با پین‌های الیاف شیشه/اپوکسی و پوسته الیاف کربن تولید نمودند [12]. نتایج نشان داد که استفاده از پین‌های کامپوزیتی استحکام کششی و مدول کششی هسته را تا حد زیادی ارتقا می‌دهد. در تحقیقات دو و همکاران، مشخص شد که استفاده از پین‌های کربنی که به عنوان ستون در ضخامت هسته مستقر شده بودند بهبود چشمگیری در استحکام خمشی ساختار ایجاد می‌کند [13].

بررسی نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهند که تقویت هسته در راستای ضخامت به طرق مختلف منجر به ارتقای عملکرد مکانیکی نظیر خواص خمشی، کششی، ضربه‌ای و بهبود خواص ناحیه اتصال هسته به پوسته شده که متعاقب آن منجر به بهبود رفتار سازه‌ای پانل‌های ساندویچی می‌شود.

با توجه به ضعف ساختارهای مبتنی بر فوم‌های پلی‌یورتان کم‌چگالی (ساختارهای متداول)، تحقیقاتی درخصوص ارتقاء قابلیت جذب انرژی این مواد صورت گرفته است که نمونه‌ای از آن استفاده از ایده هسته‌های هیبریدی در دو الگوی چگالی‌متغیر و ماده‌متغیر است که به نوعی خواص جذب انرژی این مواد را بهبود می‌بخشید. کابگلو و همکاران، خواص خمشی و ضربه سرعت‌پایین ساختارهای ساندویچی با پوسته کامپوزیت الیاف شیشه و هسته هیبریدی متشکل از چگالی‌های متفاوت فوم پی‌وی‌سی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از هسته هیبریدی با الگوی طراحی‌شده‌ای از انواع فوم با چگالی‌های متفاوت، رفتار خمشی و ضربه‌ای ساختار ساندویچی را تا حد زیادی ارتقاء می‌بخشد [14]. کوهبر و کیدان، تأثیر چگالی بر جذب انرژی و تحمل بار فوم‌های هیبریدی متشکل از پلی‌یورتان را بررسی نمودند [15]. نتایج گویای این امر بود که استفاده از یک الگوی هیبریدی به‌جای الگوی متعارف یکنواخت هسته، منجر به بهبود خاصیت جذب انرژی ماده، تحمل بار و کاهش وزن کلی سازه شده است.

با توجه به این که اساساً فوم پلی‌یورتان در قابلیت جذب انرژی ماده‌ای چندان مطرح نمی‌باشد، بهتر است با حفظ ایده هیبرید نمودن هسته از ماده‌ای دیگر نیز به عنوان جاذب قوی انرژی در کنار پلی‌یورتان استفاده شود.

کورک، ماده‌ای دوستدار محیط‌زیست و تجدیدپذیر محسوب می‌شود که می‌تواند نقش مهمی در توسعه مواد سبز نوین ایفا نماید. به سبب مزایای کم‌نظیر کورک (مقاومت در برابر جذب آب، سبز بودن و تجدیدپذیری، انعطاف‌پذیری بالا و خواص آکوستیک عالی)، تا به امروز چندین نوع پانل ساندویچی مبتنی بر این ماده طراحی و ساخته شده است [16-19]. کورک متشکل از سلول‌های کوچک (بیش از 40 میلیون در سانتی‌مترمکعب) است که دارای دیواره‌های پنج لایه ساخته شده از سلولز، لیگنین[4]، سوبرین[5]، تانین[6] و نوعی واکس است. از ویژگی‌های کورک به عنوان یک ماده طبیعی با ساختار سلول‌بسته می‌توان به جذب انرژی عالی، وزن سبک، انعطاف‌پذیری بالا و نفوذناپذیری آن در برابر گازها و مایعات اشاره نمود. همچنین این ماده به عنوان یک عایق الکتریکی، صوتی، ارتعاشی و حرارتی مطرح بوده و دارای خواص دی‌الکتریک است. کورک آگلومره به عنوان یک فراورده قابل بازیافت و پایدار طی یک فرایند گذر از بخار آب توسط گرانول‌های کورک و چسب‌های مخصوص ساخته می‌شود. بنابراین در صورت هیبریداسیون کورک/پلی‌یورتان، هسته هیبریدی دارای ویژگی‌های جذب انرژی بالا و جذب آب بسیار ناچیز (ناشی از کورک آگلومره) و همچنین وزن پایین و قیمت ارزان (ناشی از فوم پلی‌یورتان کم‌چگالی) خواهد بود.

بنا به آنچه گفته شد، هدف اصلی از انجام این پژوهش، ارائه یک راهکار کاربردی به منظور بهبود و بهینه‌سازی رفتار مکانیکی سازه‌های متداول ساندویچی در برابر بارگذاری‌های مکانیکی و شرایط محیطی دریایی است. به منظور نیل به اهداف مورد نظر، از سه استراتژی بهبود خواص مکانیکی هسته در راستای ضخامت، بهره‌گیری از روش هیبریداسیون چندمنظوره[7] با هدف بهینه‌سازی رفتار مکانیکی ماده و بهبود دوام در برابر شرایط محیطی و بهبود خواص مکانیکی در ناحیه اتصال هسته به پوسته در طراحی و ساخت ساختار مورد نظر استفاده شده است.

در پژوهش حاضر برای اولین بار به‌صورت هم‌زمان از قابلیت‌های هسته‌های هیبریدی مقاوم به جذب آب و ساختارهای مشبک کامپوزیتی به‌عنوان مصادیقی شناخته‌شده در حوزه مواد نوین استفاده شده است. این تحقیق، رفتار خمشی و دوام محیطی پانل ساندویچی با هسته هیبریدی کورک/فوم پلی‌یورتان کم‌چگالی تقویت‌شده با ساختار مشبک کامپوزیت

[1] Through the Thickness Direction
[2] Stitching
[3] Z-pinning
[4] Lignin
[5] Suberin
[6] Tannins
[7] Multifunctional Hybridization

اپوکسی/الیاف شیشه را در قیاس با ساختارهای متداول مبتنی بر هسته فوم پلی‌یورتان مورد بررسی قرار می‌دهد.

2- مواد و روش‌ها

در طرح پیشنهادی، به‌منظور ارتقای خواص مکانیکی هسته، از یک ساختار مشبک کامپوزیتی استفاده شده است که علاوه بر بهبود چشمگیر خواص هسته، دو پوسته فوقانی و تحتانی پانل ساندویچی را به یکدیگر مرتبط ساخته و عملاً یک ساختار یکپارچه و منسجم به منظور توزیع مناسب بار را پدید آورده است (شکل 2). بدیهی است که در یک مقیاس واقعی، طراحی ابعاد و چیدمان اجزای ساختار مشبک کامپوزیتی متناسب با توزیع فشار اسلمینگ و همچنین بارهای عمومی وارد بر شناور صورت خواهد پذیرفت.

به منظور مقایسه رفتار سازه‌ای پانل ساندویچی پیشنهادی با ساختارهای متداول، دو نوع ساختار مطابق شکل 3 به‌صورت مقیاس‌کوچک[1] مد نظر قرار گرفت. با توجه به وجود تفاوت‌های ساختاری در طراحی دو نوع پانل، به منظور سهولت در مقایسه عملکرد ساختارها با یکدیگر، سعی شده است تا حد امکان وزن پیکره‌بندی‌ها در یک محدوده باشد. مشخصات کلی دو نوع ساختار در جدول 1 آمده است.

بر این اساس، پیکره‌بندی نوع 1، همان ساختار ساندویچی متداول دریایی است که دارای پوسته‌هایی از جنس اپوکسی/الیاف شیشه و هسته فوم پلی‌یورتان کم‌چگالی است. همچنین پیکره‌بندی نوع 2، ساختار ساندویچی پیشنهادی است که دارای هسته فوم پلی‌یورتان کم‌چگالی تقویت‌شده با ساختار مشبک کامپوزیتی متعامد بوده که از دو سمت از طریق پوسته‌هایی از جنس کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه پوشانده شده است. همان‌گونه که از جدول 1 نیز می‌توان مشاهده نمود، وزن واحد سطح هر دو پیکره‌بندی در محدوده 8.41 کیلوگرم بر مترمربع است. ضخامت هسته در دو حالت نیز یکسان و معادل 25 میلی‌متر در نظر گرفته شد.

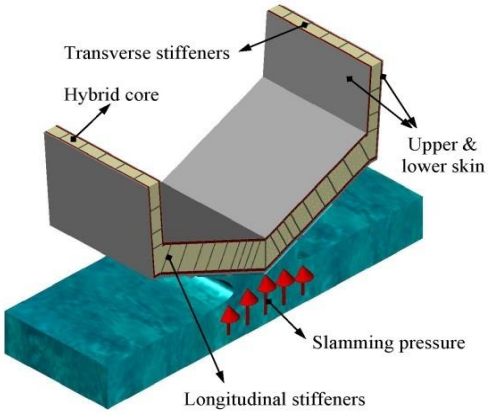
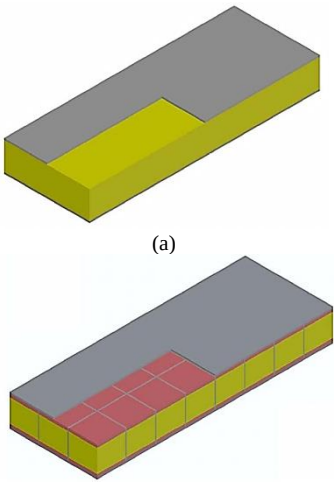


Fig. 2 Schematic of marine panel made from proposed conceptual design under slamming pressure

شکل 2 شمایی از پانل دریایی ساخته‌شده از طرح مفهومی پیشنهادی تحت فشار اسلمینگ

[1] Small-Scale



(a)

(b)

Fig. 3 Marine structure configurations for (a) Type 1, (b) Type 2

شکل 3 پیکره‌بندی‌های ساختارهای دریایی، (a) نوع 1، (b) نوع 2

جدول 1 مشخصات کلی پیکره‌بندی‌های ساختارهای دریایی

Table 1 General specification of marine structure configurations

نوع پانل	نوع ساختار	ضخامت پوسته (mm)	مشخصات هسته	ضخامت تقویتی (mm)	وزن واحد سطح ساختار (kg/m^2)
نوع 1	پانل ساندویچی متداول	2.25	پلی‌یورتان	بدون تقویتی	8.41±0.05
نوع 2	پانل ساندویچی با تقویت مشبک	1.50	کورک/ پلی‌یورتان	1	8.41±0.07

دیاگرام فرآیند موردنظر برای تولید پانل ساندویچی متشکل از هسته هیبریدی کورک/فوم پلی‌یورتان و ساختار مشبک کامپوزیتی با شماره‌گذاری مراحل در شکل 4 نشان داده شده است. به منظور ساخت هسته هیبریدی، از ورق‌های کورک آگلومره شرکت آموریم[2] با ضخامت 2.5 میلی‌متر و چگالی 120 کیلوگرم بر مترمکعب و فوم پلی‌یورتان ساخت شرکت اکسون‌پناه با ضخامت 20 میلی‌متر و چگالی 40 کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شد (شکل a-4). به این ترتیب، دو سمت ورق فوم پلی‌یورتان به‌طور کامل توسط چسب اپوکسی آرالدیت 2011/AB با ضخامت حدود 0.2 میلی‌متر پوشش داده شد و دو ورق کورک آگلومره در دو وجه آن قرار گرفته و به مدت یک روز تحت فشار یکنواخت قرار گرفته و نهایتاً یک هسته هیبریدی کورک/فوم پلی‌یورتان ساخته شد (شکل b-4). هسته هیبریدی تولیدشده توسط اره رومیزی با ابعاد 25 × 25 میلی‌متر به شکل حبه-حبه برش داده شده و کنار یکدیگر قرار گرفت (شکل c-4). وجه تحتانی نمونه در قالب توسط الیاف شیشه حصیری شرکت کولان[3] استرالیا با چگالی سطحی 200 گرم بر مترمربع و رزین اپوکسی دو جزیی 828 شرکت کومهو[4] کره جنوبی توسط فرآیند لایه‌گذاری دستی ساخته شد (شکل d-4). حبه‌های ساخته‌شده از هسته هیبریدی

[2] Amorim
[3] Colan Products Pty
[4] Kumho P&B Chemicals

کورک/فوم پلی‌یورتان در کنار یکدیگر و روی ورق کامپوزیتی ساخته‌شده، قرار داده شدند (شکل 4-e). در این مرحله، پس از برش لایه‌ها مطابق اندازه حبه‌ها (شکل 4-f)، الیاف شیشه به رزین آغشته شده (شکل 4-g) و در دو وجه یک حبه خوابانده شد (شکل 4-h) و به همین ترتیب این فرایند برای دو حبه جانبی حبه فوق تکرار شد تا لایه‌های الیافی آغشته به رزین مابین کلیه حبه‌ها جاسازی شوند.

لازم به ذکر است، هنگام قرار دادن لایه‌های آغشته به رزین در وجوه حبه‌ها، مقداری رزین نیز روی سطح ورق کامپوزیتی اعمال شده تا سطح تحتانی حبه‌ها به‌صورت کامل آغشته به رزین شوند. به ترتیب لایه‌های پیل‌پلای[1]، بریدر[2] و کیسه خلأ[3] بر روی ساختار تولیدشده در مرحله قبل قرار گرفته و محیط ساختار توسط درزگیر ماستیک به‌صورت کامل درزگیری شد. ساختار تولیدشده در این مرحله برای مدت یک روز در خلأ و در دمای محیط توسط سیستم کیسه خلأ تحت عملیات مکش قرار گرفت (شکل 4-i). با اتمام فرایند، لایه‌های کیسه خلأ، بریدر و پیل‌پلای از روی محصول برداشته شد و سطح فوقانی هسته هیبریدی که در این مرحله به‌صورت مشبک تقویت شده بود، توسط سمباده برقی هموارسازی شد (شکل 4-j). در نهایت نیز سطح فوقانی پانل ساندویچی توسط لایه‌گذاری اپوکسی/الیاف شیشه (شکل 4-k) روی هسته هیبریدی تقویت‌شده مشبک تولید شد (شکل 4-l). بر این اساس، نمونه‌های نوع 1 و 2 به ترتیب با پوسته‌هایی متشکل از 6 و 9 لایه کامپوزیتی با کسر وزنی الیاف 50% ساخته شدند.

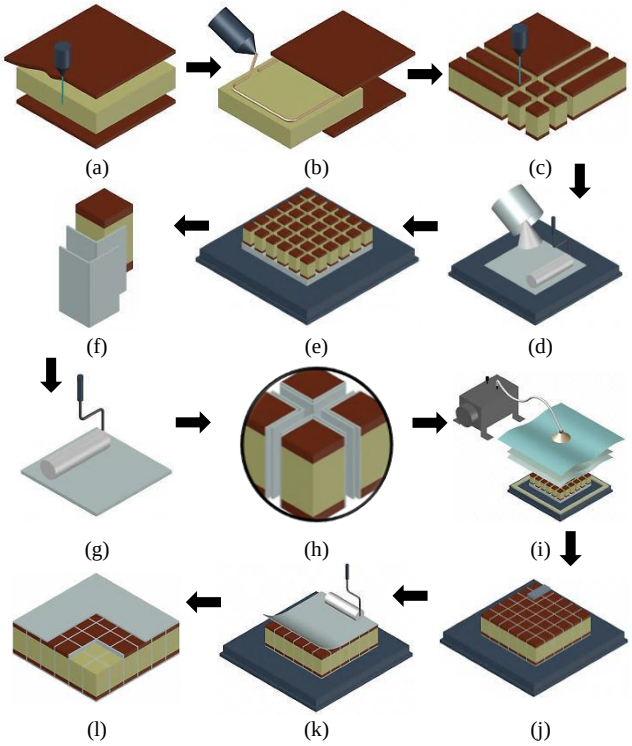


Fig. 4 Schematic of manufacturing process of sandwich panel based on of cork/polyurethane foam hybrid core and composite grid structure.

شکل 4 شمای کلی فرآیند ساخت پانل ساندویچی مبتنی بر هسته هیبریدی کورک/فوم پلی‌یورتان و ساختار مشبک کامپوزیتی

2-1- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌ها از صفحات ساخته‌شده از پانل ساندویچی با ابعاد موردنظر برش داده شده و لبه‌ی آن‌ها با استفاده از یک کاغذ سنباده نرم آماده‌سازی شد تا ترک‌های سطحی احتمالی و ناهمگونی‌های موضعی از نمونه‌ها زدوده شوند. به منظور سهولت در کدگذاری نمونه‌ها، برای نشان دادن پانل ساندویچی متداول و پانل ساندویچی با هسته هیبریدی تقویت‌شده با ساختار مشبک کامپوزیتی به ترتیب از عبارت‌های نوع 1 و نوع 2 استفاده شد. شماتیکی از نمونه آزمون خمش شامل هسته و پانل ساندویچی تقویت‌شده توسط ساختار مشبک به همراه نمونه واقعی برای این آزمون در شکل 5 نشان داده شده‌اند.

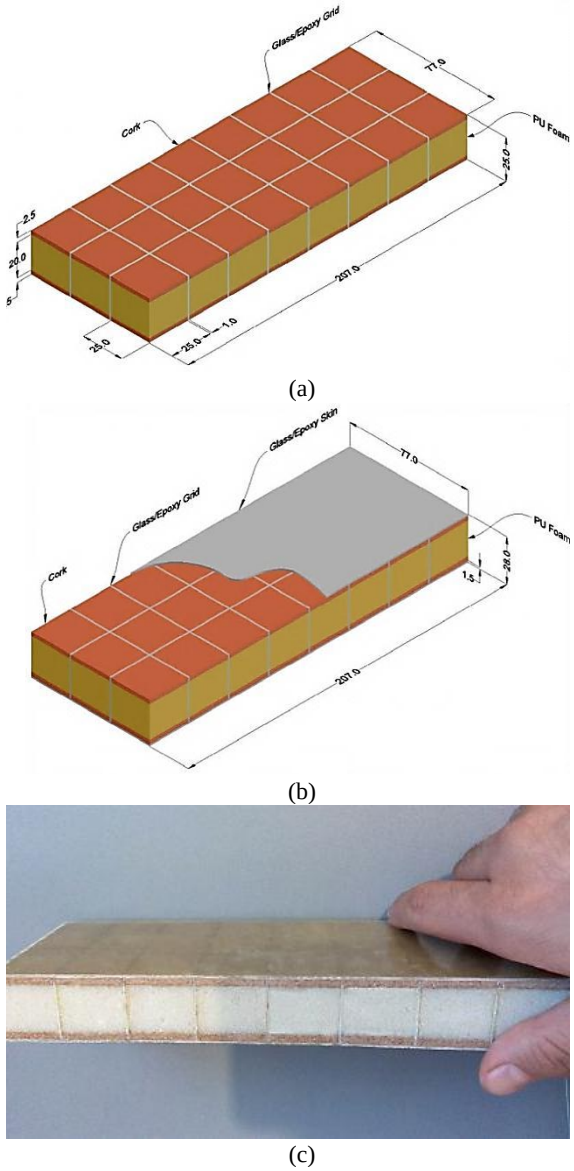


Fig. 5 Bending test specimen specification, (a) Schematic of hybrid core, (b) schematic of sandwich panel based on of hybrid core and composite grid structure, (c) real bending test specimen made from sandwich panel based on of hybrid core and composite grid structure

شکل 5 مشخصات نمونه آزمون خمش شامل، (a) شماتیک هسته هیبریدی تقویت‌شده، (b) شماتیک پانل ساندویچی متشکل از هسته هیبریدی تقویت‌شده با ساختار مشبک، (c) نمونه واقعی پانل ساندویچی متشکل از هسته هیبریدی تقویت‌شده با ساختار مشبک.

2-2- اعمال شرایط محیطی مرطوب توسط غوطه‌ورسازی در آب

[1] Peel Ply
[2] Breather
[3] Vacuum Bag

مجموعه‌ای از نمونه‌ها با ابعاد 25 × 25 × 25 میلی‌مترمکعب (طول × عرض × ضخامت)، شامل فوم پلی‌یورتان با 6 لبه باز (PU)، فوم پلی‌یورتان با 2 لبه باز و 4 لبه آب‌بند (PU/S) و کورک/پلی‌یورتان با 2 لبه باز و 4 لبه آب‌بند (PU/C/S) جهت اعمال شرایط محیطی تعیین شدند. شایان ذکر است که به منظور اطمینان از عدم نفوذ آب از لبه‌های آب‌بند، فرایند آب‌بندی توسط اعمال یک مرحله رزین اپوکسی انجام شد. بدین ترتیب، نمونه‌ها طی مدت 100 روز به‌صورت کامل در یک محفظه حاوی آب قرار گرفتند. چون چگالی کلیه نمونه‌ها کمتر از آب بود، نمونه‌ها در سطح آب نیمه‌غوطه‌ور می‌شدند. بنابراین، به منظور حصول اطمینان از مغروق شدن کامل نمونه‌ها طی فرایند پیرسازی، شبکه‌های پلاستیکی توری‌شکل روی نمونه‌ها قرار داده شد که از این طریق امکان جذب آب به‌صورت همگن و از تمامی جهات برای نمونه‌ها محقق شود. تغییرات جرم به‌صورت تابعی از زمان به‌طور مداوم انجام شد. نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C272 [20] به‌صورت دوره‌ای از حمام آب خارج شده و پس از خشک شدن توسط یک حوله جاذب رطوبت، توسط یک ترازوی دیجیتال دقیق مورد توزین قرار گرفتند. درصد جذب آب (M_t) به‌صورت رابطه‌ی (1) محاسبه شد:

$$M_t(\%) = \left(\frac{W_t - W_0}{W_0}\right) \times 100 \qquad (1)$$

W_t، وزن نمونه در زمان t و W_0، وزن اولیه نمونه خشک است.

3-2- آزمون خمش

آزمون خمش سه‌نقطه‌ای بر اساس استاندارد ASTM C393/C393M [21] و با استفاده از یک دستگاه آزمون یونیورسال هانسفیلد[1] (Model H25KS) ساخت انگلستان انجام شد. ابعاد اسمی نمونه‌های آزمون 207 × 77 × 28 میلی‌مترمکعب (طول × عرض × ضخامت)، نرخ جابجایی 6 میلی‌متر بر دقیقه و آزمون در دمای 2 ± 23 درجه سانتی‌گراد صورت پذیرفت. میزان طول خارج از ساپورت نمونه 25 میلی‌متر تعیین شد که در این حالت، طول دهانه تیر ساندویچی برابر با 157 میلی‌متر می‌شد. آزمون خمش تا وقوع حداکثر بار خمشی ادامه یافته و با مشاهده تخریب‌های واضح در نمونه متوقف شد.

3- مدل‌سازی اجزای محدود[2]

به منظور پیش‌بینی رفتار کلی ساختارهای مورد بررسی، تحلیل اجزای محدود الاستیک خطی توسط بسته نرم‌افزاری انسیس نسخه 15 انجام شد. شرایط بارگذاری و تکیه‌گاهی بر اساس آزمون‌های تجربی شبیه‌سازی شد. بدین منظور، تکیه‌گاه‌ها به‌صورت جسم صلب در نظر گرفته شدند و درجات آزادی آن‌ها به‌صورت شرایط تکیه‌گاهی ساده مقید شد. سنبه بارگذاری نیز مشابه تکیه‌گاه‌ها شبیه‌سازی شد، با این تفاوت که امکان حرکت در راستای عمودی برای آن در نظر گرفته شد. برای ساده‌سازی حل، از اصطکاک مابین تکیه‌گاه‌ها و پوسته ساختارهای کامپوزیتی صرف‌نظر گردید. اجزای کامپوزیتی شامل پوسته و تقویتی‌ها توسط المان‌های جامد شش‌وجهی 20 گرهی[3] با رفتار ارتوتروپیک خطی و هسته توسط همین المان با رفتار ایزوتروپیک مدل‌سازی شد. این المان، یک المان مرتبه بالا با رفتار جابجایی درجه دوم بوده و دارای یک گره در هر گوشه از المان و یک گره میانی در هر وجه المان است. بر اساس مشاهدات صورت گرفته در آزمون‌های تجربی، سطح مشترک پوسته-هسته در مراحل آغازین آزمون، بدون عیوب اولیه بود. بنابراین، سطح مشترک پوسته/هسته به‌صورت کاملاً پیوسته در نظر گرفته شد.

در شکل 6، نحوه مش‌بندی و اعمال بار روی ساختار نوع 1 نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، به منظور جلوگیری از خطاهای عددی ناشی از اتصال پوسته نازک و هسته ضخیم در ساختار ساندویچی تا حد ممکن از مش‌بندی ظریف و یکنواخت استفاده شده است.

4- نتایج و بحث

4-1- رفتار جذب آب

نمودار تغییرات جذب آب به‌عنوان تابعی از روزهای غوطه‌وری برای نمونه‌های PU (فوم پلی‌یورتان با 6 لبه باز)، PU/S (فوم پلی‌یورتان با 2 لبه باز و 4 لبه آب‌بند) و PU/C/S (کورک/پلی‌یورتان با 2 لبه باز فوقانی و تحتانی از جنس کورک و 4 لبه آب‌بند فوم)، در شکل 7 آمده است. از شکل 7 مشخص است که نمونه‌های PU پس از گذشت زمان 100 روز پیرسازی در آب، به سطح جذب آب بسیار چشمگیر (486.21%) رسیده‌اند. پس از سپری شدن زمان پیرسازی در آب، تغییر ابعاد در نمونه‌های PU و PU/S نیز مشهود است.

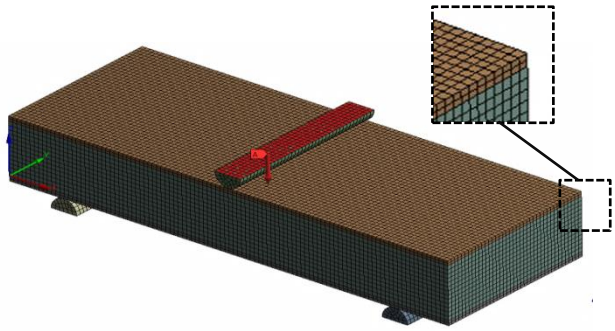


Fig. 6 Meshing and loading of the type 1 sandwich panel finite element mode l

شکل 6 مش بندی و بارگذاری مدل اجزای محدود پانل ساندویچی نوع 1

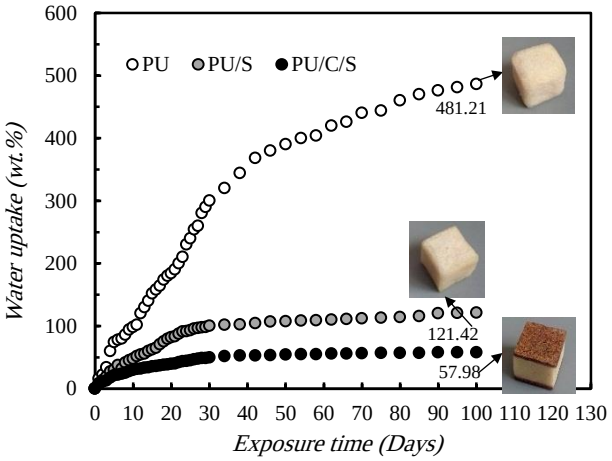


Fig. 7 Weight percentage of water uptake vs. immersion exposure time for PU, PU/S and PU/C/S specimens

شکل 7 درصد جذب آب به ازای زمان غوطه‌ورسازی برای نمونه‌های PU، PU/S و PU/C/S

از نمودارهای ارائه داده‌شده در شکل 7 می‌توان مشاهده نمود که میزان حداکثر جذب آب برای نمونه‌های PU/S و PU/C/S در همین مدت زمان

[1] Hounsfield
[2] Finite Element Method (FEM)
[3] Hexahedron Element (Hex 20)

پیرسازی (100 روز) به‌مراتب کمتر از نمونه‌های PU است. همچنین همان‌طور که انتظار می‌رفت، مقادیر ثبت‌شده جذب آب PU/S بیش از نمونه‌های PU/C/S است. سطح حداکثر جذب آب برای نمونه‌های PU/S و نمونه‌های PU/C/S غوطه‌ور شده در آب به ترتیب 121.42% و 57.98% ثبت‌شده است. با توجه به جذب آب بسیار پایین چوب کورک در حالت خالص، احتمالاً همین مقدار جذب آب نسبتاً پایین که در نمونه‌های هیبرید کورک/فوم پلی‌یورتان صورت گرفته نیز تا حد بسیار زیادی به لبه‌های آب‌بند شده فوم مربوط است که احتمالاً به سبب وجود خلل و فرج اولیه و عدم آب‌بندی کامل لبه‌های آب‌بند رخ داده است. علاوه بر این در حالت واقعی نیز تنها سطوح فوقانی یا تحتانی در معرض آسیب ناشی از شرایط محیطی هستند و لبه‌های آزاد ورق ساندویچی به‌صورت غیر آب‌بند به‌هیچ‌وجه با محیط تماسی ندارند.

2-4- خواص خمشی

از آنجایی که بارهای خارج از صفحه نظیر ممان‌های خمشی هاگینگ و سگینگ[1] ناشی از امواج و پدیده اسلمینگ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شرایط بارگذاری واقع بر شناورهای دریایی مطرح می‌باشند، آزمون‌های خمشی جهت تعیین میزان بهبود ساختار پیشنهادی نسبت به پانل‌های ساندویچی متداول بکار گرفته شد.

شکل 8 نشان‌دهنده نمودارهای نیرو-جابجایی به دست آمده از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای ساختارهای ساندویچی با دو نوع هسته متفاوت است. واضح‌ترین مسئله قابل‌ذکر در این نمودارها، بهبود چشمگیر رفتار خمشی ساختارهای ساندویچی مبتنی بر هسته هیبریدی تقویت‌شده توسط ساختار مشبک نسبت به نمونه ساندویچی متداول است. همان‌طور که در شکل 8 قابل‌مشاهده است، رفتار خمشی دو نوع نمونه ساندویچی، قابل تقسیم‌بندی به سه فاز است. در مرحله اول پس از یک افت اولیه اندک در بارگذاری نمونه‌ها به سبب تماس نامناسب اولیه میان نقاط بارگذاری و نمونه، یک رفتار الاستیک خطی بدون بروز هیچ‌گونه تخریب در نمونه‌ها رخ می‌دهد. این رفتار را می‌توان منتج از پاسخ خطی و نسبتاً ترد اجزای تشکیل‌دهنده نمونه‌ها در مرحله پیش از آغاز تخریب تلقی نمود [22]. در این مرحله، سفتی اولیه از طریق محاسبه شیب نمودار نیرو-جابجایی تعیین می‌شود. با مقایسه نمودارهای دو نمونه کاملاً واضح است که نمونه نوع 2 نسبت به نمونه نوع 1، سفتی خمشی بسیار بالاتری از خود بروز داده است.

فاز دوم با یک رفتار غیرخطی آغاز می‌شود که عمدتاً به شکل‌گیری هسته‌های ریزترک درون هسته یا جدایش‌های موضعی پوسته/هسته منجر شده و با کاهش شیب نمودار تا رسیدن به نقطه بیشینه بارگذاری ادامه می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند که میزان رفتار غیرخطی نمونه‌های نوع 1 به مراتب بیش از نمونه‌های نوع 2 است. علت عمده بروز نرم‌شدگی و رفتار غیرخطی قابل توجه در نمونه‌های نوع 1، طبیعت قابل فروریزش[2] فوم پلی-یورتان است. این رفتار در نمونه‌های نوع 2 به نوعی تحت تأثیر ساختار مشبک کامپوزیتی قرار گرفته که با ایجاد یک سفتی یکنواخت در فواصل

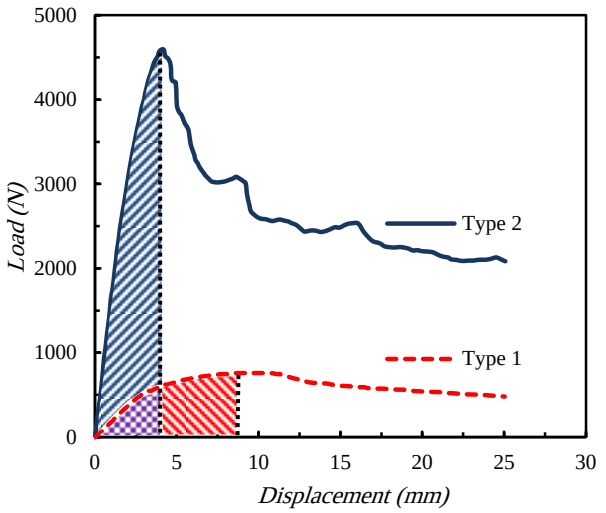


Fig. 8 Load–displacement curves for Type 1 and 2 sandwich specimens under three-point bending test

شکل 8 نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌های ساندویچی نوع 1 و 2 تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

منظم، امکان تغییرشکل‌های وسیع و همچنین رفتار غیرخطی قابل توجه را تا پیش از رسیدن به استحکام بیشینه از ساختار سلب می‌نماید.

در فاز سوم، نیروی اعمالی به نمونه کاهش یافته و تا شکست نهایی نمونه ادامه می‌یابد. با توجه به تعدد اجزای ساختاری موجود در نمونه‌های نوع 2، انواع مکانیسم‌های شکست در این مرحله در ساختار رخ می‌دهد که نواحی پستی و بلندی مشخص در نمودار نیرو-جابجایی به‌وضوح نمایانگر تنوع تخریب و تحمل بار اجزای سازه‌ای در نمونه‌های نوع 2 است. به منظور مقایسه مناسب‌تر، مقادیر خمشی استخراج‌شده از نمودارهای نیرو-جابجایی در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 2 نتایج آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

Table 2 Results of three-point bending test

مشخصه	پانل نوع 1	پانل نوع 2
بیشینه بار خمشی (N)	759.07 ± 9	4596.22 ± 53
بیشینه بار خمشی ویژه ($N.m^2/kg$)	90.26	546.52
سفتی خمشی اولیه (N/mm)	184.37 ± 3	1684.70 ± 10
سفتی خمشی ویژه (kN.m/kg)	21.92	200.32
تغییرشکل در حداکثر بار خمشی (mm)	8.85 ± 1.3	4.19 ± 0.6
مساحت زیر نمودار تا حداکثر بار خمشی (N.mm)	4773.73 ± 93	11692.90 ± 344

مطابق مقادیر مندرج در این جدول (که میانگینی از نتایج سه تکرار آزمون برای هر نوع ساختار است)، نمونه نوع 1 دارای سفتی اولیه 184.37 نیوتن بر میلی‌متر و بیشینه بار خمشی 759.07 نیوتن است. به‌طور مشابه، نمونه نوع 2 دارای سفتی اولیه 1684.70 نیوتن بر میلی‌متر و بیشینه بار خمشی 4596.22 نیوتن می‌باشد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که جایگزینی هسته‌های متداول فوم پلی‌یورتان با هسته هیبریدی فوم پلی‌یورتان/کورک

[1] Hogging and Sagging Bending Moments
[2] Crushable

تقویت‌شده توسط ساختار مشبک، تأثیر شگرفی معادل 506% افزایش در حداکثر بار خمشی و 814% افزایش در سفتی خمشی اولیه ایجاد نموده است.

لازم بذکر است که مقادیر خمشی ویژه که بیانگر نسبت مشخصه مورد نظر به وزن ساختار است، عموماً از موضوعات مورد توجه طراحان سازه علی-الخصوص در حوزه سازه‌های سبک‌وزن نظیر شناورهای کامپوزیتی می‌باشد. در اینجا با توجه به برابری وزن واحد سطح هر دو ساختار نوع 1 و 2 (8.41 کیلوگرم بر مترمربع)، مقادیر ویژه خمشی نیز برابر آنچه پیش از این گفته شد، با همان نسبت‌ها افزایش یافته است.

در این پژوهش، مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی تا نقطه حداکثر بار به نوعی معرف چقرمگی خمشی نمونه‌های ساندویچی است. بر این اساس و با توجه به مساحت‌های هاشور خورده در شکل 8، نمونه‌های نوع 1 و 2 به ترتیب دارای مساحت زیر نمودار 4773.73 و 11692.90 نیوتن میلی‌متر هستند که این به معنای افزایش 144.94% مشخصه مذکور در پانل‌های ساندویچی پیشنهادی (نوع 2) نسبت به نمونه‌های متداول (نوع 1) است.

نظیر آنچه در بحث رفتار خمشی دو نوع نمونه پیش از گفته شد، سفتی بالای ساختاری نمونه‌های نوع 2 نسبت به نوع 1 منجر به کاهش میزان تغییرشکل در نقطه حداکثر بار خمشی شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است، تغییرشکل در حداکثر بار خمشی برای نمونه‌های نوع 1 و 2 به ترتیب برابر با 8.85 و 4.19 میلی‌متر است.

به منظور ایجاد درک مناسب‌تر از ماهیت مکانیسم‌های شکست و ارتباط آن با پاسخ ساختاری دو نوع سیستم مختلف ساندویچی، تصاویری از نمونه‌ها در حین و پس از آزمون خمش تهیه شده است. در شکل‌های 9 و 10 به ترتیب توالی آزمون خمش بر روی نمونه نوع 1 و همچنین انواع مکانیسم‌های شکست در این نوع نمونه نمایش داده شده است.

همان‌طور که از تصاویر ارائه‌شده در شکل 9 قابل مشاهده است، نمونه‌های نوع 1 تا جابجایی حدود 10 میلی‌متر یک رفتار خمش کلی در طول تیر از خود بروز داده و پس از آن به تدریج در محل اعمال بار دچار تغییرشکل موضعی می‌شوند. در همین اثنا پوسته فوقانی دچار شکست موضعی در محل اعمال بار شده و با ادامه بارگذاری وسعت و عمق این آسیب تشدید می‌شود. بررسی پوسته تحتانی هیچ‌گونه آسیب مشهودی را در این پوسته نشان نمی‌دهد که به نوعی نمایانگر عدم تحمل بار در این پوسته به نسبت پوسته فوقانی است. درنهایت نمونه‌های نوع 1 در ناحیه هسته یک تغییرشکل فشاری موضعی با افزایش چگالی[1] و تخریب فشاری هسته در حالتی متقارن را از خود بروز می‌دهند (شکل 10).

به همین ترتیب، در شکل‌های 11 و 12 توالی آزمون خمش و انواع مکانیسم‌های شکست روی نمونه نوع 2 نشان داده شده است. با بررسی دقیق توالی بارگذاری نمونه در شکل 11 می‌توان نتیجه گرفت که میزان خمش کلی در تیر نوع 2 نسبت به نمونه نوع 1 به‌طرز محسوسی کاهش یافته و در عوض زمان رخداد میزان تغییرشکل موضعی در محل بارگذاری تسریع شده است. تغییر حالت تغییرشکل موضعی از U باز به V (شکل 9-c در مقایسه با 11-c) کاملاً مشهود و دلالت بر پاسخ ساختاری متفاوت دو نوع پانل در برابر بارگذاری خمشی دارد.

[1] Densification

در نمونه نوع 2 با ادامه بارگذاری و وقوع شکست فشاری در پوسته فوقانی در جابجایی نسبتاً محدود (کمتر از 5 میلی‌متر)، تقویتی مرکزی عرضی به‌تدریج دچار کمانش می‌شود (شکل‌های 11-c و 11-d). در این حالت دو تقویتی امتدادیافته در طول تیر، مقادیر عظیمی از بار را متحمل شده و با بروز کمانش موضعی، ظرفیت تحمل بار سازه را به‌طرز چشمگیری ارتقاء می‌دهند.

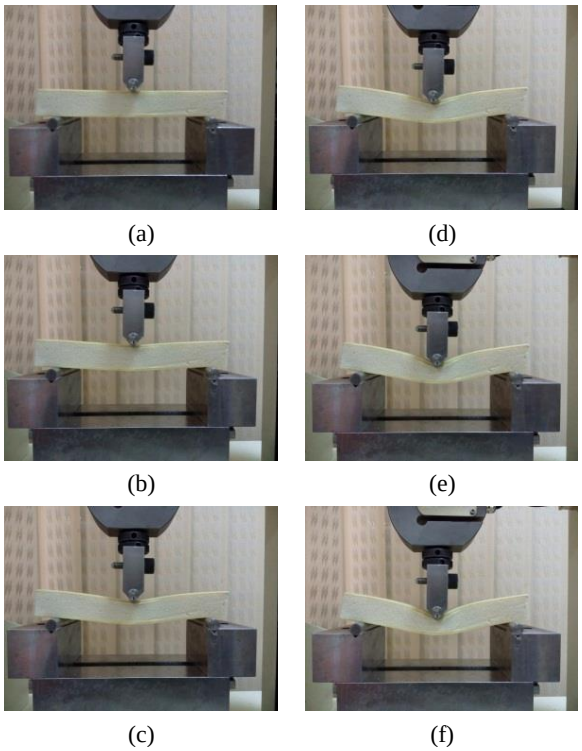


Fig. 9 Sequence of three-point bending test conducted on type 1 sandwich specimen at displacement of, (a) 0 mm, (b) 5 mm, (c) 10 mm, (d) 15 mm, (e) 20 mm, (f) 25 mm

شکل 9 توالی آزمون خمش سه‌نقطه‌ای اعمال‌شده بر روی نمونه‌های ساندویچی نوع 1 در جابجایی، (a) 0 mm، (b) 5 mm، (c) 10 mm، (d) 15 mm، (e) 20 mm، (f) 25 mm

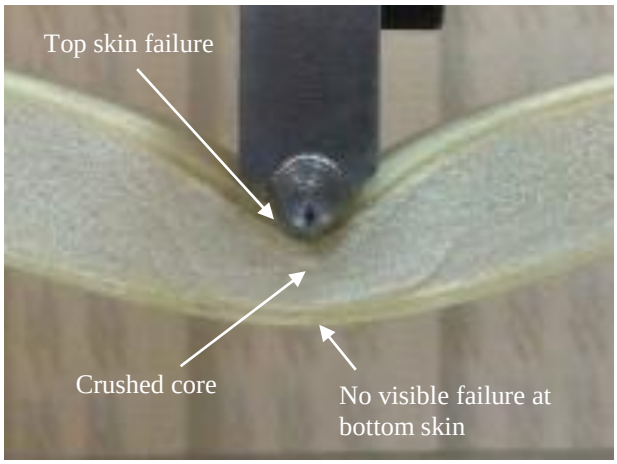


Fig. 10 Failure mechanisms in type 1 sandwich specimen under three-point bending test

شکل 10 مکانیسم‌های تخریب در نمونه ساندویچی نوع 1 تحت آزمون خمش سه-نقطه‌ای

در مراحل انتهایی بارگذاری، سایر تقویتی‌های عرضی از ناحیه فوقانی خود اندکی متمایل به محل بارگذاری می‌شوند. این دخالت تقویتی‌های عرضی در فرایند تحمل بار، منجر به ایجاد انسجام ساختاری چشمگیری در سازه شده و همچنین از فروریزش و تغییرشکل وسیع در هسته فومی ممانعت می‌نماید (شکل 12).

از نکات قابل توجه در تحلیل مکانیسم‌های شکست نمونه نوع 2، عدم وقوع تورق مشهود در سطح مشترک کورک به پوسته کامپوزیتی و همچنین فوم پلی‌یورتان است. نتایج مشابهی در پژوهشی که توسط آزادیان و همکاران [23] روی کامپوزیت‌های ساندویچی سه‌بعدی حلقوی پودی تحت ضربات ثقلی صورت گرفت، مشاهده می‌شود. با توجه به اتصال پوسته‌های فوقانی و تحتانی ساختارهای ساندویچی فوق توسط تقویتی‌های متصل به پوسته‌ها، هیچگونه جدایش بین هسته و پوسته در هیچ یک از سطوح بارگذاری ضربات ثقلی رخ نداد.

شایان ذکر است که به رغم نامتجانس بودن مواد بکار رفته در ترکیب نمونه‌های نوع 2، این ساختار در نواحی اتصال لایه کورک به سایر اجزاء رفتار مناسبی از خود بروز می‌دهد. این امر به سطح خارجی ورق‌های کورک مربوط می‌شود که با دارا بودن خلل و فرج متعدد و ناهمگون، امکان درگیری بیشتر اجزاء توسط مکانیسم‌های قفل‌کننده را فراهم آورده و در نتیجه سازه فراتر از پیش‌بینی‌های اولیه عمل کرده و دارای استحکام برشی مناسبی در نواحی اتصال اجزاء به یکدیگر خواهد بود.

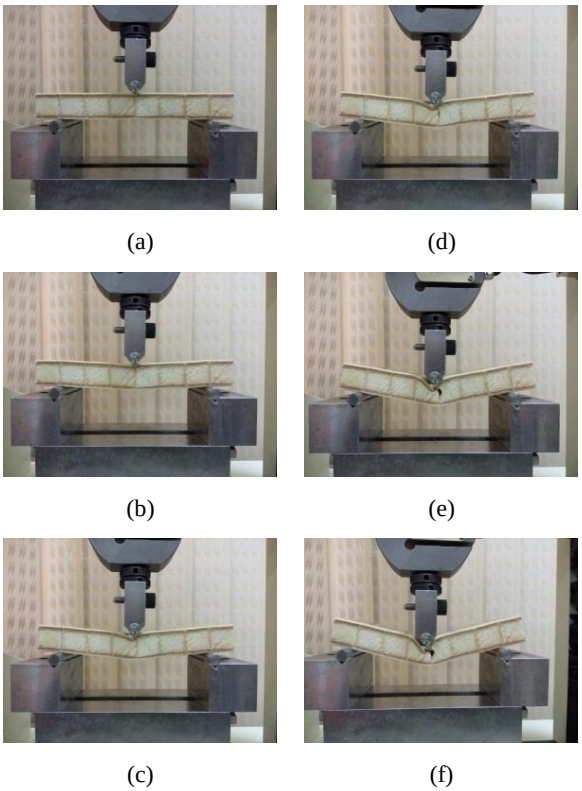


Fig. 11 Sequence of three-point bending test conducted on type 2 sandwich specimen at displacement of, (a) 0 mm, (b) 5 mm, (c) 10 mm, (d) 15 mm, (e) 20 mm, (f) 25 mm

شکل 11 توالی آزمون خمش سه‌نقطه‌ای اعمال‌شده روی نمونه‌های ساندویچی نوع 2 در جابجایی، (a) 0 mm، (b) 5 mm، (c) 10 mm، (d) 15 mm، (e) 20 mm، (f) 25 mm

وجود آسیب‌هایی هرچند اندک در پوسته کامپوزیتی تحتانی، به نوعی نشانگر ایفای نقش مناسب این پوسته در تحمل بار کششی ناشی از خمش بر سازه است. همان‌گونه که در شکل 12 قابل مشاهده است، کلیه تقویتی‌های کامپوزیتی حتی در مراحل نهایی بارگذاری نیز به خوبی به پوسته‌های کامپوزیتی فوقانی و تحتانی متصل باقی مانده‌اند که گویای انجام صحیح و استاندارد فرایند ساخت می‌باشد. به عنوان یک نتیجه کلی، تعداد و تنوع مکانیسم‌های آسیب در پانل نوع 2 نسبت به پانل نوع 1 بیشتر بوده که خود نمایانگر مشارکت بیشتر و مناسب‌تر کلیه اجزای سازه‌ای در فرایند تحمل بار است.

به عنوان جمع‌بندی نهایی در بخش تجربی پژوهش، استفاده از ساختار مشبک کامپوزیتی از چند راه منجر به بهبود ظرفیت تحمل بار در ساختار نوع 2 شده است. در وهله اول، بهبود اتصال مابین هسته و پوسته منجر به افزایش مقاومت به تورق ساختار شده است. ثانیاً، چیدمان منظم ساختار مشبک کامپوزیتی در درون هسته به مثابه ستون‌هایی عمل کرده که به عنوان پشتیبان هسته هیبریدی نقش ایفا می‌کنند و منجر به بهبود خواص فشاری هسته در راستای ضخامت می‌شوند. ساختار منسجم ایجادشده در نمونه‌های نوع 2 از ایجاد تغییرشکل‌های گسترده در فوم و متعاقب آن فروریزش زودهنگام فوم به نحو چشمگیری ممانعت می‌نماید. همچنین اتصال پوسته‌های فوقانی و تحتانی به یکدیگر منجر به ایجاد یک انسجام ساختاری در سازه شده که انتقال مناسب‌تر تنش مابین اجزا و توزیع یکنواخت‌تر تنش را در کل ساختار فراهم کرده است.

3-4- نتایج عددی

به منظور پیش‌بینی پاسخ ساختاری دو نوع پانل مورد مطالعه، شبیه‌سازی آزمون خمش با اعمال حداکثر نیروی خمشی در میانه دهانه تیر و مطابق شرایط نمونه‌های واقعی صورت گرفت که نتایج آن در قالب نمودار در شکل 13 نشان داده شده است.

بر اساس حل عددی، میزان جابجایی در میانه دهانه تیر در نمونه‌های نوع 1 و 2 در حداکثر نیروی خمشی، به ترتیب برابر با 3.69 و 2.27 میلی‌متر است که 58.26% و 45.82% کمتر از مقادیر تجربی هستند.

.

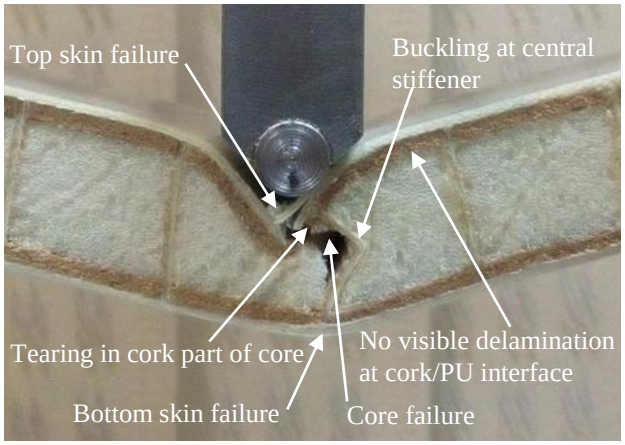
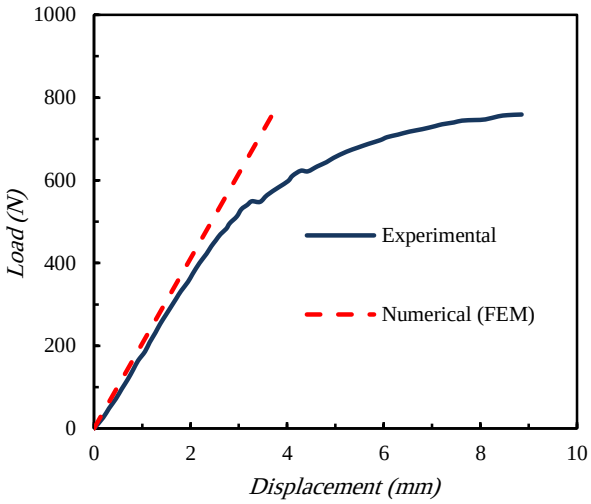
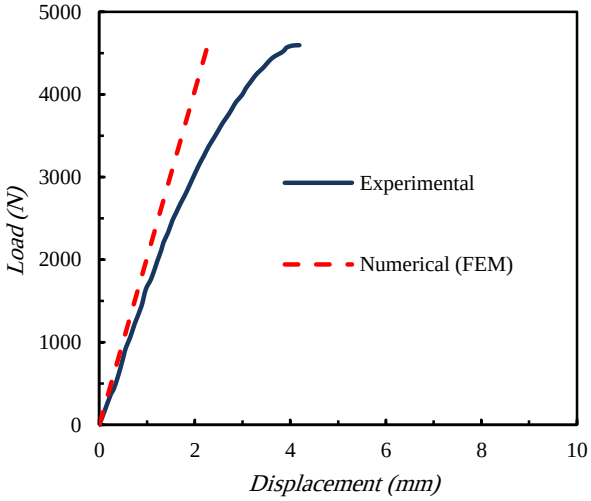


Fig. 12 Failure mechanisms in type 2 sandwich specimen under three-point bending test

شکل 12 مکانیسم‌های تخریب در نمونه نوع 2 تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای



(a)



(b)

Fig. 13 Comparison of experimental and numerical results in, (a) type 1, (b) type 2 sandwich specimens

شکل 13 مقایسه نتایج تجربی و عددی در نمونه‌های ساندویچی (a) نوع 1، (b) نوع 2

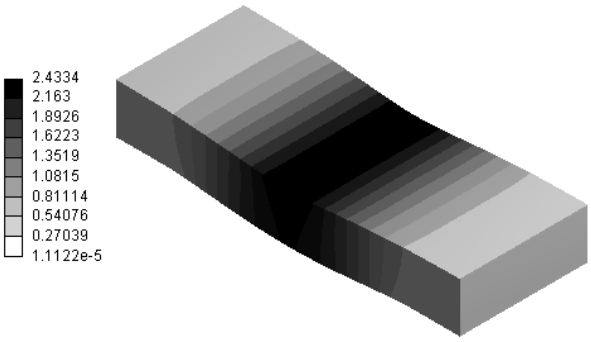
همچنین با توجه به شکل 13، سفتی خمشی اولیه در نمونه‌های نوع 1 و 2 به ترتیب برابر با 205.48 و 2023.27 نیوتن بر میلی‌متر است که 11.44% و 20.10% کمتر از مقادیر تعیین‌شده در آزمون‌های تجربی می‌باشند

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقادیر مربوط به سفتی خمشی اولیه در مقایسه با جابجایی تطابق بسیار مناسب‌تری با نتایج تجربی دارد که مهم‌ترین دلیل آن به رفتار خطی اجزای ساختاری پانل‌ها در مراحل ابتدایی بارگذاری مرتبط است. با توجه به تعریف رفتار خطی برای مواد بکار رفته در مدل‌سازی عددی نمونه‌ها، به‌تدریج و با افزایش بار، نتایج حل عددی و تجربی اختلاف بیشتری دارند (شکل 13). اختلاف نسبتاً اندک در برآورد سفتی خمشی اولیه در حل عددی نسبت به نتایج تجربی احتمالاً به فرایند ساخت نمونه‌ها مرتبط است؛ چون در شبیه‌سازی عددی، اتصال تمامی سطوح مشترک اجزاء به یکدیگر به‌صورت ایده‌آل و بدون عیوب اولیه در نظر گرفته شده است.

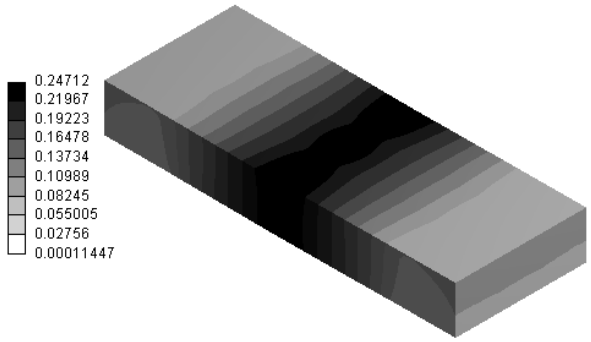
با توجه به تطابق مناسب نتایج تجربی و عددی در مقدار نیروی حدود 500 نیوتن، این میزان نیروی اعمالی روی هر دو نوع ساختار اعمال شده و به عنوان ملاکی برای تعیین مقادیر جابجایی کلی سازه در میانه دهانه تیر، تنش نرمال در اجزای کامپوزیتی و تنش برشی در بخش هسته در نظر گرفته شد.

کانتورهای توزیع جابجایی برای دو نمونه نوع 1 و 2 در شکل 14 آورده شده است. مطابق با این شکل، اعمال نیروی 500 نیوتن منجر به ایجاد جابجایی 2.43 و 0.25 میلی‌متر به ترتیب در دو نمونه نوع 1 و 2 شده است. بر این اساس، در اثر اعمال نیروی یکسان، میزان جابجایی در نمونه نوع 1 حدود 872% بیش از نمونه نوع 2 است. این اختلاف در نتایج تجربی نیز بسیار قابل توجه بوده و معادل 732.35% است.

کانتورهای توزیع تنش نرمال در راستای طول نمونه برای اجزای کامپوزیتی دو نوع پانل مورد مطالعه 1 و 2 در شکل 15 نمایش داده شده است. با توجه به وجود ساختار مشبک کامپوزیتی در نمونه‌های نوع 2 و به منظور بررسی دقیق‌تر مقادیر تنش در این نوع نمونه، تنش نرمال به‌صورت تفکیکی در پوسته و ساختار مشبک ارائه شده است. بر این اساس، اعمال نیروی 500 نیوتن به ترتیب منجر به ایجاد تنش نرمال 34.17 و 7.43 مگاپاسکال در پوسته‌های کامپوزیتی دو نمونه نوع 1 و 2 شده است. همچنین این مقدار در ساختار مشبک کامپوزیتی برابر با مقدار نسبتاً یکنواخت اما اندک 4.80 مگاپاسکال است. لازم به ذکر است که به منظور مقایسه دقیق‌تر، مقادیر تنش نرمال در سوی پوسته تحتانی نمونه‌های ساندویچی که تنش در این نواحی حالت کششی دارد، مورد ارزیابی قرار گرفت. با مقایسه مقادیر تنش نرمال در پوسته‌های کامپوزیتی مشخص است که تنش در نمونه نوع 1 حدود 359.84% بیش از نمونه نوع 2 است.



(a)



(b)

Fig. 14 Deflection distribution of the sandwich specimens under the load 500 N, (a) type 1, (b) type 2

شکل 14 توزیع جابجایی در نمونه‌های ساندویچی تحت بار 500 نیوتن، (a) نوع 1، (b) نوع 2

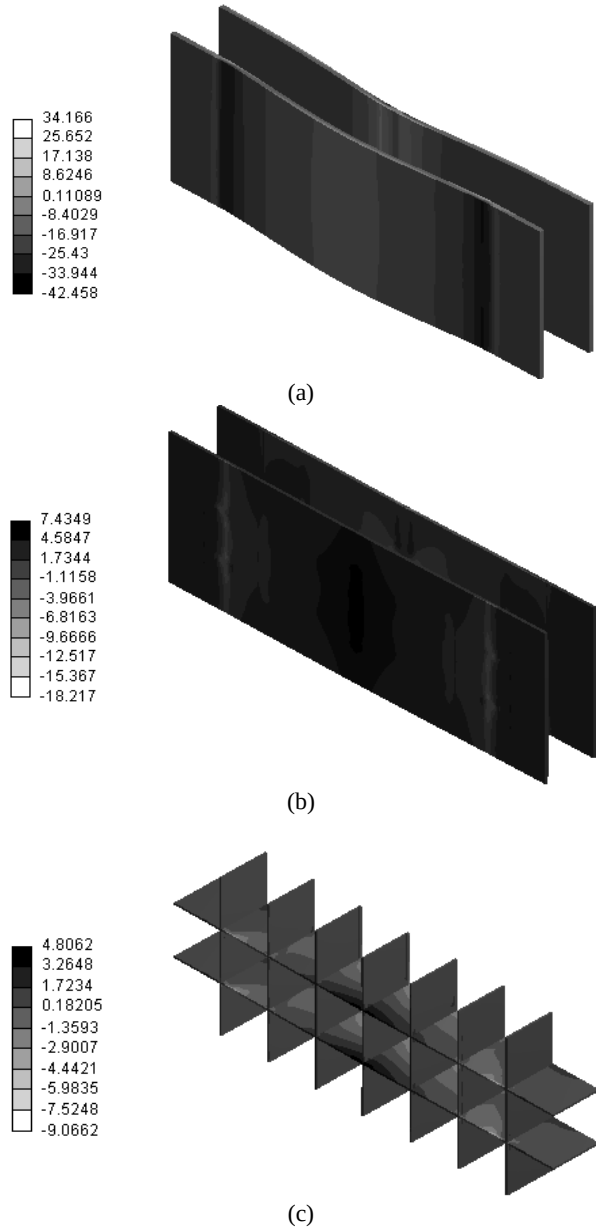


Fig. 15 Normal stress distribution under the load 500 N, (a) composite skin of type 1 specimen, (b) composite skin of type 2 specimen, (c) composite grid structure of type 2 specimen

شکل 15 توزیع تنش نرمال تحت بار 500 نیوتن، (a) پوسته کامپوزیتی نمونه نوع 1، (b) پوسته کامپوزیتی نمونه نوع 2، (c) ساختار مشبک کامپوزیتی نمونه نوع 2

به سبب هیبریدی بودن هسته در نمونه‌های نوع 2، مقایسه تنش برشی بیشینه هسته صرفاً در بخش پلی‌یورتان دو نوع پانل انجام شده است. با توجه به توزیع تنش برشی نمایش‌داده شده در شکل 16 مشخص است که میزان تنش برشی بیشینه در بخش پلی‌یورتان هسته در دو نمونه نوع 1 و 2 به ترتیب برابر با 0.126 و 0.012 مگاپاسکال است که نشان از بالاتر بودن 950 درصدی این پارامتر در نمونه نوع 1 نسبت به نوع 2 می‌باشد. بنابراین با یک بررسی اولیه می‌توان گفت که در اثر اعمال بار یکسان، فاکتور ایمنی سازه در بخش هسته برای نمونه نوع 2 حدود 9.5 برابر نوع 1 است.

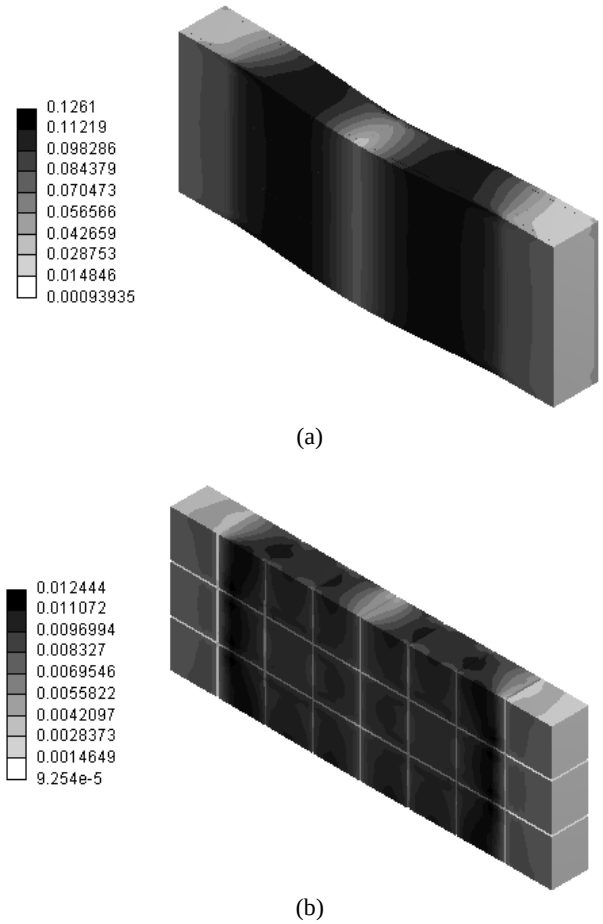


Fig. 16 Maximum shear stress distribution under the load 500 N, (a) PU core of type 1 specimen, (b) PU core of type 2 specimen

شکل 16 توزیع تنش برشی بیشینه تحت بار 500 نیوتن، (a) هسته پلی‌یورتان نمونه نوع 1، (b) هسته پلی‌یورتان نمونه نوع 2

در نهایت با در نظر گرفتن کلیه موارد فوق مشخص می‌شود که استفاده از یک ساختار مشبک کامپوزیتی در کنار یک هسته هیبریدی با مشخصات مکانیکی و فیزیکی متغیر امکان استفاده حداکثری از ظرفیت اجزای سازه در فرایند تحمل بار را فراهم آورده است. وجود ساختار سبک و در عین حال مستحکم کامپوزیتی به‌صورت منظم، مانع از فروریزش سریع هسته فومی و بروز تورق در ناحیه هسته/پوسته شده و به‌تبع آن از انتقال کل بار روی پوسته‌های کامپوزیتی پانل ساندویچی ممانعت می‌نماید.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، خواص مکانیکی و دوام محیطی دو نوع پانل ساندویچی برای کاربردهای دریایی مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، ارزیابی خواص مکانیکی توسط آزمون خمش سه‌نقطه‌ای و دوام محیطی ساختارها توسط آزمون پیرسازی 100 روزه در آب تعیین شد. پانل نوع 1، متشکل از پوسته کامپوزیتی از جنس اپوکسی/الیاف شیشه و هسته فوم پلی‌یورتان و پانل جدید (نوع 2)، مشتمل بر سه بخش اصلی پوسته کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه، هسته هیبریدی کورک/پلی‌یورتان و ساختار مشبک کامپوزیتی از جنس اپوکسی/الیاف شیشه است. به عنوان یک مطالعه امکان‌سنجی اولیه، نتایج آزمون‌های تجربی و همچنین شبیه‌سازی‌های عددی اولیه مؤید برتری

چشمگیر ساختار پیشنهادی جدید نسبت به نمونه متداول است. برخی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش به شرح ذیل هستند:

- میزان جذب آب ناشی از پیرسازی 100 روزه حاکی از جذب آب بیش از دو برابری نمونه‌های آب‌بند شده فوم پلی‌یورتان نسبت به کورک/فوم پلی‌یورتان است. این نتیجه به خاصیت ذاتی کورک یعنی مقاومت عالی در برابر نفوذ مایعات و گازها مرتبط است.
- بخش آغازین نمودار نیرو-جابجایی آزمون خمش در هر دو نوع نمونه به‌صورت خطی است. بخش دوم نمودار نیرو-جابجایی آزمون خمش نشانگر بروز رفتار غیرخطی شدید نمونه نوع 1 نسبت به نمونه نوع 2 است. بروز رفتار مذکور تا نقطه بیشینه بارگذاری برای هر دو نوع نمونه امتداد می‌یابد که تا حد زیادی متأثر از نرمی و طبیعت قابل فروریزش فوم پلی‌یورتان است.
- جایگزینی هسته متداول فوم پلی‌یورتان با هسته هیبریدی فوم پلی‌یورتان/کورک تقویت‌شده توسط ساختار مشبک، منجر به افزایش 506% در حداکثر بار خمشی و 814% در سفتی خمشی اولیه پانل شد. ارتقاء چقرمگی خمشی پانل نیز برابر با 144.94% است.
- مکانیسم شکست در نمونه‌های نوع 1 متشکل از تغییرشکل و تخریب فشاری موضعی در هسته، افزایش چگالی هسته و شکست موضعی پوسته فوقانی در محل اعمال بار است.
- شکست موضعی پوسته فوقانی، شکست جزئی در پوسته تحتانی، کمانش در تقویتی‌های عرضی نزدیک به محل بارگذاری، پارگی لایه کورک در محل بارگذاری و تخریب هسته فومی به عنوان مهم‌ترین مکانیسم‌های آسیب در نمونه‌های نوع 2 محسوب می‌شوند.
- نتایج شبیه‌سازی عددی در تخمین سفتی خمشی اولیه از تطابق خوبی با نتایج آزمون‌های تجربی برخوردار است.
- اختلاف حدود 50 درصدی در مقادیر جابجایی حاصل از آزمون‌های تجربی با حل عددی به‌دست آمد که ناشی از رفتار غیرخطی هسته است که البته در مراحل اولیه بارگذاری (بخش خطی) این مقادیر اندک است.
- نتایج حل عددی حاکی از این است که در اثر اعمال بار یکسان، میزان جابجایی، تنش نرمال در پوسته و تنش برشی بیشینه در هسته در نمونه نوع 1 به ترتیب حدود 872، 360 و 950 درصد بیش از نمونه نوع 2 است.

مراجع

[1] 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 ," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 3, pp. 263-274, 2017.

[2] Rashiddadash, S., Sadighi, M., Dariushi, S., "Experimental and numerical investigation of sandwich panels with bilateral connection under static loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 415-426, 2018.

[3] Azarafza, R., Davar, A., Mahmoodi, A., "Three-point bending test of metal and composite sandwich panels with grid stiffened core", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 377-388, 2017.

[4] Safari, M., Biglari, H., "Frequency dependent damped vibration of composite sandwich beam with viscoelastic and transverse flexible core based on GHM method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 397-408, 2017.

[5] Mohammadi, M. S., Nairn, J. A., "Crack propagation and fracture toughness of solid balsa used for cores of sandwich composites," Journal of Sandwich Structures and Materials, Vol. 16, No. 1, pp. 22-24, 2014.

[6] Dimitrov, N., Berggreen, C., "Probabilistic fatigue life of balsa cored sandwich composites subjected to transverse shear," Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol. 17, No. 5, pp. 562-577, 2015.

[7] Najafi, M., Ansari, R., Darvizeh, A., "Experimental characterization of a novel balsa cored sandwich structure with fiber metal laminate skins," Iranian Polymer Journal , Vol. 28, pp. 87-97, 2019.

[8] Manujesh, B. J., Vijayalakshmi, R., Sham, M. P., "Moisture absorption and mechanical degradation studies of polyurethane foam cored E-glass-reinforced vinyl-ester sandwich composites," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 33, No. 5, pp. 479-492, 2014.

[9] Xue, Z., Hu, Z., Gao, H., Hu, P., "Evaluation Study on Composite Hull Structure Subjected to Slamming Loads," 18th International Conference On Composite Materials, Jeju Island, Korea, 2011.

[10] Lascoup, B., Aboura, Z., Khellil, K., et al., "Homogenization of the core layer in stitched sandwich structures," Composites Science and Technology, Vol. 70, No. 2, pp. 350-355, 2010.

[11] Yalkin, H. E., Icten, B. M., Alpyildiz, T., "Enhanced mechanical performance of foam core sandwich composites with through the thickness reinforced core," Composites Part B: Engineering, Vol. 79, pp. 383-391, 2015.

[12] Zheng Y, Xiao J, Duan M, et al. "Experimental study of partially-cured Z-pins reinforced foam core composites: K-Cor sandwich structures," Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 27, No. 1, pp. 153-159, 2014.

[13] Du, L., Jiao, G., "Indentation study of Z-pin reinforced polymer foam core sandwich structures," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 40, No. 6-7, pp. 822-829, 2009.

[14] Kaboglu, C., Yu, L., Mohagheghian, I., "Effects of the core density on the quasi-static flexural and ballistic performance of fibre-composite skin/foamcore sandwich structures," Journal of Materials Science, Vol. 53, No. 24, pp. 16393-16414, 2018.

[15] Koohbor, B., Kidane, A., "Design optimization of continuously and discretely graded foam materials for efficient energy absorption," Materials and Design, Vol. 102, pp.151-161, 2016.

[16] Gameiro, C. P., Cirne, J., Gary, G., "Experimental study of the quasi-static and dynamic behaviour of cork under compressive loading," Journal of Materials Science, Vol. 42, pp. 4316-4324, 2007.

[17] Moreira, R. A. S., de Melo, F. J. Q., Dias Rodrigues, J. F., "Static and dynamic characterization of composition cork for sandwich beam cores," Journal of Materials Science, Vol. 45, No. 12, pp. 3350-3366, 2010.

[18] Najafi, M., Darvizeh, A., Ansari, R., "Characterization of moisture effects on novel agglomerated cork core sandwich composites with fiber metal laminate facesheets," Journal of Sandwich Structures & Materials, https: //doi.org/10.1177/10996 36218 78961 3, 2018.

[19] Reis, L., Silva, A., "Mechanical behavior of sandwich structures using natural cork agglomerates as core materials," Journal of Sandwich Structures and Materials, Vol. 11, No. 6, pp. 487-500, 2009.

[20] ASTM C272, Standard test method for water absorption of core materials for structural sandwich constructions.

[21] ASTM C393/C393, Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure.

[22] Tuwair1, H., Volz, J., ElGawady, M. A., Mohamed, M., Chandrashekhara, K., Birman, V., "Testing and evaluation of polyurethane-based GFRP sandwich bridge deck panels with polyurethane foam core," Journal of Bridge Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 1-13, 2016.

[23] Azadian, M., Hasani, H. Shokrieh, M.M., "The novel three dimensional weft knitted sandwich composites under drop-weight impacts in different energy levels", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 2, pp. 271-278, 2018.