



مقایسه اثر پیرسازی رطوبتی بر رفتار خمشی و کمانشی دو نوع ساختار ساندویچی مبتنی بر هسته بالسا

مسلم نجفی^{1*}، رضا انصاری²

1- استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

2- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

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

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/11/30

پذیرش: 1401/04/04

کلیدواژگان

ساختارهای ساندویچی، هسته بالسا، چندلایه‌های الیافی فلزی، رفتار خمشی، رفتار کمانشی

چکیده

به رغم ویژگی‌های منحصر به فرد برتر بالسا نظیر قیمت مناسب و خواص مکانیکی عالی، آبدوستی و حساسیت فراوان این ماده به جذب رطوبت، استفاده روزافزون از آن را در ساخت سازه‌های پیشرفته دریایی با چالش جدی مواجه نموده است. در صورت نفوذ رطوبت به پوسته‌های کامپوزیتی، ساختارهای ساندویچی مبتنی بر هسته بالسا دچار جذب آب شدید شده و انسجام ساختاری آن به مخاطره می‌افتد. در این مطالعه، به منظور ارتقاء خواص مکانیکی و همچنین مقاومت محیطی ساختارهای ساندویچی مبتنی بر هسته بالسا در مواجهه با شرایط محیطی مرطوب، ایده استفاده از چندلایه‌های الیافی فلزی به جای پوسته‌های کامپوزیتی پلیمری پیشنهاد شده است. بدین منظور، ساختارهای ساندویچی با هسته بالسا و دو نوع پوسته کامپوزیتی ساخته شده از الیاف شیشه/اپوکسی و چندلایه الیافی فلزی تحت آزمون‌های شرایط محیطی و مکانیکی قرار گرفتند. اهم نتایج به دست آمده از آزمون پیرسازی 100 روزه در آب نشان می‌دهد که حداکثر میزان جذب آب در نمونه‌های ساندویچی با پوسته کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی و چندلایه الیافی فلزی با لبه‌های آبدند شده و دارای آسیب مصنوعی به ترتیب 106.71٪ و 83.32٪ است. همچنین با بررسی رفتار خمشی و کمانشی دو نوع ساختار ساندویچی مذکور، پیش و پس از فرایند پیرسازی رطوبتی مشخص شد که کاهش بار خمشی، سفتی خمشی و بار کمانشی بیشینه ناشی از پیرسازی رطوبتی در نمونه‌های ساندویچی با پوسته کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی با لبه‌های آبدند به ترتیب 23.43٪، 23.15٪ و 36.14٪ و برای نمونه‌های با پوسته چندلایه الیافی فلزی به مراتب کمتر و به ترتیب 13.57٪ و 11.06٪ و 16.14٪ بوده است.

Comparison of moisture aging effect on flexural and buckling behavior of two types of balsa core sandwich structures

Moslem Najafi^{1*}, Reza Ansari²

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

2- Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

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

Keywords

Sandwich structures,
Balsa core, Fiber
metal laminates,
Flexural behavior,
Buckling behavior

Abstract

Despite the unique superior properties of balsa such as reasonable price and excellent mechanical properties, the hydrophilicity and high sensitivity of this material to moisture absorption have posed a serious challenge to its increasing use in the construction of advanced marine structures. If moisture can penetrate into the composite skins, the balsa core sandwich structures will absorb a lot of water and compromise its structural integrity. In this study, to improve the mechanical properties and the environmental resistance of sandwich structures with balsa core against the moist environmental conditions, the idea of using fiber metal laminates instead of polymer composite skins has been proposed. For this purpose, sandwich structures with balsa core and two types of composite skins made of glass fiber/epoxy and fiber metal laminate were subjected to environmental and mechanical tests. The most important results obtained from the 100-day aging test in water show that the maximum water absorption in sandwich specimens with glass fiber/epoxy composite and fiber metal laminate skins having sealed edges and artificial damage is 106.71% and 83.32%, respectively. In addition, by evaluating the flexural and buckling behavior of two types of sandwich structures, before and after the moisture aging process, it was found that the reduction of flexural load, flexural stiffness and maximum buckling load due to moisture aging in sandwich specimens with glass fiber/epoxy composite skin with sealed edges were 23.43%, 23.15% and 36.14%, respectively, and for specimens with fiber metal laminate skin were much less, and 13.57%, 11.06% and 16.14%, respectively.

1- مقدمه

در حال حاضر، ساختارهای ساندویچی¹ متشکل از پوسته‌های مستحکم و هسته‌های سبک-وزن به دلیل ویژگی‌های مطلوبی از قبیل وزن کم، سفتی خمشی عالی و مقاومت به خوردگی بالا در کاربردهای دریایی متعددی نظیر بدنه کشتی‌ها و قایق‌ها، پره‌های توربین بادی و سکوهاى نفتی فراساحل مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. پوسته‌ها عموماً به‌منظور تحمل تنش‌های نرمال ناشی از خمش ایجاد شده توسط بارهای خارج صفحه‌ای² طراحی شده و معمولاً از جنس کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف³ یا لایه‌های فلزی ساخته می‌شوند. هسته، بخش ضعیف‌تر ساختار ساندویچی بوده و وظیفه تأمین استحکام فشاری، تحمل بارهای برشی، حفظ پایداری در برابر کمانش و ایجاد ممان اینرسی مورد نیاز ساختار ساندویچی را به عهده دارد [2,3].

در ساختارهای ساندویچی، مواد متعددی نظیر لانه‌زنبوری‌های فلزی و غیرفلزی⁴، چوب بالسا⁵، چوب لایه‌ای⁶ و همچنین فوم‌های فلزی و پلاستیکی⁷ به عنوان هسته مورد استفاده قرار می‌گیرند [4]. چوب بالسا به عنوان یک هسته طبیعی به دلیل چندین ویژگی جذاب از جمله وزن کم، سفتی قابل توجه و مقاومت در برابر آتش در مقایسه با سایر هسته‌های چگالی مشابه از دیرباز به طور گسترده در ساخت سازه‌های دریایی مورد استفاده قرار گرفته است [4-6]. علاوه بر این، چوب بالسا، به عنوان یک ماده خام سازگار با محیط‌زیست⁸ از منابع تجدیدپذیر، کماکان می‌تواند در توسعه مواد سبز جدید⁹ مشارکت نماید. این ویژگی‌های جذاب چوب بالسا همواره تعداد زیادی از محققین را بر آن داشته است که تحقیقاتی در ارتباط با رفتار ساختارهای ساندویچی مبتنی بر چوب بالسا صورت دهند. فتیحی و همکاران [7] خواص خمشی نمونه‌های مختلف ساندویچی با پوسته‌های الیاف شیشه/اپوکسی و چهار نوع هسته مختلف یعنی چوب بالسا، فوم پت¹⁰، فوم پی‌وی‌سی¹¹ و فوم پلی‌ورتان¹² را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که نمونه‌های هسته بالسا دارای مقاومت برشی و سفتی خمشی بالاتری در مقایسه با سه نمونه دیگر دارای هسته فومی هستند. از سوی دیگر، مشاهده شد که نمونه‌های مبتنی بر هسته بالسا در مقایسه با نمونه‌های دارای فوم پلیمری رفتار شکننده‌تری از خود بروز می‌دهند. تاگاریلی و همکاران [8] به صورت تجربی پاسخ دینامیکی تیرهای ساندویچی ساخته شده از پوسته‌های الیاف شیشه/وینیل استر با فوم پی‌وی‌سی و هسته چوب بالسا را در حالت تیر دو انتها گیردار در وسط دهانه تیر بررسی کردند. نتایج نشان داد که تخریب در نمونه‌های ساندویچی مبتنی بر چوب بالسا به صورت تورق¹³ پوسته از هسته بروز کرده، در حالی که مکانیسم‌های شکست غالب در تیرهای ساندویچی مبتنی بر فوم پی‌وی‌سی ترک خوردگی هسته و تخریب کششی پوسته‌ها در نواحی تکیه‌گاهی است. همچنین مشاهده شد که تیرهای ساندویچی مبتنی بر چوب بالسا نسبت به فوم پی‌وی‌سی در مواجهه با پرتابه‌های با تکان کم عملکرد بهتری دارند که این موضوع را می‌توان به سفتی و استحکام بالاتر چوب بالسا در مقایسه با فوم پی‌وی‌سی تحت بارگذاری‌های فشاری و برشی

نسبت داد. آتاس و سویم [9] در مطالعات خود بر روی پاسخ سازه‌های ساندویچی متشکل از پوسته‌های الیاف شیشه/اپوکسی و هسته چوب بالسا و فوم پی‌وی‌سی در برابر بارهای ضربه‌ای تمرکز نمودند. از نمودارهای بار-جابجایی به دست آمده، مشخص شد که سازه ساندویچی مبتنی بر هسته بالسا در مقایسه با فوم پی‌وی‌سی، سفتی خمشی بیشتری دارد. همچنین نیروی تماسی بالاتر و جابجایی کمتر نمونه‌های ساندویچی با هسته بالسا به سفتی بالاتر چوب بالسا در مقایسه با فوم پی‌وی‌سی نسبت داده شد. وانگ و همکاران [10] پاسخ به ضربه ساختارهای ساندویچی با پنج نوع هسته متفاوت یعنی بالسا چگالی پایین، بالسا چگالی بالا، کورک، پلی‌استایرن و لانه-زنبوری پلی‌پروپیلن در ضربات با سرعت متوسط مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که در انرژی‌های ضربه متفاوت، ساختارهای ساندویچی با هسته بالسا چگالی بالا و چگالی پایین بیشترین مقدار انرژی ویژه جذب شده را در بین پنج ساختار دارا هستند.

طی بررسی‌های به عمل آمده، مشخص شد که بسیاری از تحقیقات متمرکز بر ساختارهای ساندویچی متشکل از هسته بالسا و پوسته‌هایی از جنس کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف است. از سوی دیگر، یکی از شرایط عملیاتی که ساختارهای ساندویچی مبتنی بر چوب بالسا در آن به نحو گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند، محیط‌های آبی و مرطوب نظیر آب دریا است. ساختارهای ساندویچی مبتنی بر چوب بالسا طی چند دهه اخیر همواره در ساخت شناورهای دریایی به خصوص قایق‌های تندرو و ورزشی مورد توجه طراحان بوده‌اند. استفاده از این ساختارهای ساندویچی به کاهش قابل توجه وزن، قیمت تمام شده، کاهش مصرف سوخت، افزایش چالاکی و سرعت و افزایش استحکام این شناورها انجامیده است. باین وجود، بزرگ‌ترین چالش بر سر راه استفاده گسترده از این ساختارها در این بخش و سایر بخش‌های صنعتی، در نقطه ضعف موجود در پوسته‌های مورد استفاده در این ساختارهای ساندویچی نهفته است. پوسته‌های ساخته شده از کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف نسبت به انواع شرایط محیطی نظیر جذب رطوبت و دماهای بالا، تشعشعات فرابنفش و بارگذاری‌های دینامیکی حساسیت بالایی داشته و عملاً در شرایط واقعی و عملیاتی با گذشت زمان دچار انواع زوال‌های مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی می‌شوند [11]. علاوه بر این، در صورت وقوع آسیب‌های کوچکی نظیر سوراخ‌شدگی و خراش موضعی در سطح پوسته بیرونی (و نه عمق ساختار)، تأثیر مخرب عوامل کاهش‌دهنده خواص تشدید می‌شود. به‌طور مثال، در صورت وقوع آسیب موضعی در سطح بیرونی یک شناور ساخته شده 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 به سرعت وارد هسته می‌شود. با وقوع این امر، علاوه بر کاهش خواص خود پوسته کامپوزیتی، کاهش خواص برشی سطح مشترک کامپوزیت/هسته، وقوع جذب آب شدید توسط هسته آب‌دوست¹⁴ بالسا و پوسیدگی هسته امری حتمی است. به این ترتیب پیامدهای ناگواری نظیر افزایش وزن سازه به سبب جذب آب بروز کرده که به تنهایی می‌تواند منجر به کاهش سرعت و چالاکی یک شناور دریایی شده و به تبع آن افزایش مصرف سوخت و در نهایت خارج شدن شناور از شرایط عملیاتی را رغم بزند [11,12]. در شکل 1 چرخه عمر هسته بالسا به کاررفته در یک سازه ساندویچی با پوسته‌های ساخته شده از کامپوزیت پایه پلیمری در مواجهه با رطوبت نشان داده شده است.

¹ Sandwich Structures
² Out-of Plane Loadings
³ Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites
⁴ Metallic and Non-Metallic Honeycombs
⁵ Balsa Wood
⁶ Plywood
⁷ Plastic and Metallic Foams
⁸ Eco-Friendly Raw Material
⁹ New Green Materials
¹⁰ Polyethylene Terephthalate (PET) Foam
¹¹ Polyvinyl chloride (PVC) Foam
¹² Polyurethane (PU) Foam
¹³ Delamination

¹⁴ Hydrophilic

چندلایه‌های الیافی فلزی (FMLs)³ یک ترکیب مناسب از این دو ماده می‌تواند منجر به ارائه یک سیستم ساندویچی جدید گردد که دارای ویژگی‌های جذابی نظیر وزن کم، خواص استاتیکی مناسب، مقاومت به شرایط محیطی عالی و تحمل آسیب بالا باشد.

FMLها متشکل از لایه‌های نازک و متناوب فلزات (معمولاً آلومینیوم، تیتانیوم، منیزیم و فولاد) و کامپوزیت‌های پایه پلیمری به‌عنوان دسته‌ای جدیدی از مواد کامپوزیتی هیبریدی شناخته شده‌اند. با توجه به بهره‌گیری از خواص ترکیبی دو ماده در یک قالب ساختار واحد، FMLها دارای مزیت‌های قابل توجهی نظیر استحکام خستگی عالی، مقاومت به ضربه بالا، چگالی پایین و مقاومت مناسب به خوردگی و شرایط محیطی هستند [15-17].

بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در ارتباط با دوام محیطی FMLها در شرایط محیطی مرطوب، گویای برتری چشمگیر این مواد در مقایسه با کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف است که به‌صورت متداول در حوزه دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نجفی و همکاران [18] پژوهشی در ارتباط با تأثیر شرایط محیطی گوناگون (شامل پیرسازی برودتی در دمای 196°C ، پیرسازی دمابالا در دمای 130°C و پیرسازی رطوبتی/حرارتی در دمای 90°C در آب مقطر) بر خواص مکانیکی FMLهای نوع گلار⁴ (مبتنی بر آلومینیوم و الیاف شیشه) انجام دادند. نتایج نشان داد که اثر منفی شرایط محیطی بر خواص مکانیکی نمونه‌های تحت پیرسازی برودتی و دمای بالا چشمگیرتر بوده و FMLهای مورد بررسی در این پژوهش به میزان قابل قبولی نسبت به پیرسازی رطوبتی/حرارتی مقاوم بوده‌اند. نتایج تحقیقات مشابه در خصوص پیرسازی رطوبتی/حرارتی 35 روزه در آب با دمای 90°C و رطوبت 90٪ گویای کاهش تنها 7 درصدی و 2 درصدی در مقدار نیروی خمشی بیشینه و سفتی خمشی برای نمونه‌های FML متداول (مبتنی بر آلومینیوم آلیاژی سری 2000) است، در حالی که کاهش این خواص در کامپوزیت‌های الیاف شیشه/اپوکسی به ترتیب معادل 19٪ و 14٪ گزارش گردید [19]. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، پیرسازی رطوبتی/حرارتی در آب شور با دمای 100°C به مدت 10 ساعت منجر به کاهش 9٪ و 7٪ در مقادیر نیروی خمشی بیشینه و سفتی خمشی در نمونه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی گردید، در حالی که هیچ‌گونه اثر منفی قابل ملاحظه‌ای در رفتار خمشی FMLهای جدید دریایی (مبتنی بر آلومینیوم سری 5000) مشاهده نشد [20].

به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد FMLها در زمینه جذب انرژی در ضربات سرعت‌پایین و بالا، استحکام باقی‌مانده و تحمل آسیب و همچنین دوام محیطی، اخیراً، استفاده از این مواد به عنوان پوسته در سازه‌های ساندویچی نوین توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است [12,20,21]. با توجه به این مقدمات، مقاله حاضر به عنوان بخشی از یک کار پژوهشی برای توسعه نسل جدیدی از ساختارهای ساندویچی مبتنی بر FMLها برای استفاده در صنایع دریایی است. بدین ترتیب، پس از جایگزینی FML به جای کامپوزیت‌های پلیمری متداول به عنوان پوسته ساختارهای ساندویچی مبتنی بر هسته بالسا، لازم بود خواص مکانیکی این ساختارها در مواجهه با شرایط دریایی مورد مطالعه قرار گیرد. از این رو، برای نخستین بار خواص باقیمانده خمشی و فشاری ساختارهای ساندویچی مبتنی بر هسته بالسا و پوسته FML پس از اعمال شرایط پیرسازی رطوبتی تعیین شد. همچنین به منظور ارزیابی تغییرات ایجاد شده در پوسته، نمونه‌های ساندویچی متداول با



Fig. 1 The life cycle of balsa core: On the right side of the sandwich panel, the core material has retained its original color and strength. The core in the middle has been exposed to moisture and shows early signs of degradation. The core on the left side has decomposed and lost all of its strength [13].

شکل 1 چرخه عمر هسته بالسا: در سمت راست پانل ساندویچی، هسته رنگ و استحکام اصلی خود را حفظ کرده است. هسته در ناحیه میانی پانل در معرض رطوبت قرار گرفته و علائم اولیه زوال را نشان می‌دهد. هسته در ناحیه سمت چپ تجزیه شده و کل استحکام خود را از دست داده است [13].

با توجه به اینکه در ساختارهای ساندویچی که در ساخت آن‌ها از چوب بالسا به‌عنوان هسته استفاده می‌شود، خود چوب دارای یک ساختار طبیعی است، بنابراین ایجاد تغییرات به‌منظور مقاوم‌سازی آن در برابر شرایط محیطی عملاً بسیار مشکل خواهد بود. از سویی به سبب وجود فضاهای خالی در ریزسازه¹ چوب بالسا که همین عامل نیز موجب وزن سبک این چوب است، بالسا را به‌عنوان یک ماده بسیار مستعد در جذب رطوبت معرفی می‌کند. سادلو و همکاران [14] تأثیر غوطه‌ورسازی در آب را بر سه نوع هسته چوب بالسا، اکوکور² و فوم پی‌وی‌سی ارزیابی نمودند. نتایج نشان دادند به‌رغم اینکه چوب بالسا قبل از تماس با آب دارای خواص مکانیکی مناسب‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها دارا است، اما پس از غوطه‌ورسازی در آب بیشترین کاهش خواص مکانیکی، میزان جذب آب، تورم و تغییر ابعاد مربوط به چوب بالسا است. میزان جذب آب در بالسا حدود 900٪ و در اکوکور و پی‌وی‌سی به ترتیب 75٪ و 62٪ گزارش شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که به‌رغم خواص برتر چوب بالسا نسبت به سایر هسته‌های متداول، به‌منظور بهره‌گیری از این خواص، لازم است به نحوی از تماس مستقیم این ماده با رطوبت جلوگیری شود. بنابراین، قاعدتاً بهبود خواص مقاومت به رطوبت و آسیب پوسته‌های ساخته‌شده از مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت‌شده با الیاف در اولویت قرار خواهد گرفت. از طرفی، ضعف پوسته کامپوزیتی پلیمری در برابر جذب آب و مقاومت کم در برابر آسیب‌های وارده امری اثبات‌شده است. تحقیقات صورت گرفته در ارتباط با مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت‌شده با الیاف نشان می‌دهد که به‌رغم ویژگی‌های ارزنده آن‌ها، این مواد دارای معایبی نظیر حساسیت فراوان به شرایط محیطی و آسیب‌پذیری پایین در برابر نفوذ ناشی از ضربات دینامیکی هستند که کاربرد عملیاتی آن‌ها در محیط‌های واقعی را تا حدی محدود ساخته است [11].

در این مقاله یک راهکار عملی برای کاهش آسیب‌پذیری سازه‌های ساندویچی دریایی در برابر بارگذاری‌ها و شرایط محیطی ارائه شده است. با توجه به ظرفیت‌های وسیع موجود در چوب بالسا و ساختارهای موسوم به

³ Fiber Metal Laminate (FMLs)

⁴ Glare

¹ Microstructure

² Eco-core

جدول 1 مشخصات آلیاژ آلومینیوم، الیاف شیشه، رزین اپوکسی و چسب اپوکسی

Table 1 Specifications of aluminum alloy, glass fiber, epoxy resin and epoxy adhesive

کد نمونه	آلیاژ آلومینیوم	الیاف شیشه	رزین اپوکسی	چسب اپوکسی
چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	2.70	2.54	1.17	1.17
استحکام کششی نهایی (مگا پاسکال)	310	3400	41-79	33
مدول کششی (گیگا پاسکال)	68.94	72	3.35-3.55	NA
کرنش در شکست (%)	12	4.8	1.5-2.5	9
ویسکوزیته (سانتی پواز)	NA	NA	1000-1500	50000

هسته بالسا و پوسته الیاف شیشه/اپوکسی نیز ساخته شد و نتایج آزمون‌های محیطی و مکانیکی با نمونه‌های پیشنهادی مورد مقایسه قرار گرفت.

2- مواد و روش‌ها

2-1- مواد

در این پژوهش، انتخاب مواد با توجه به کاربرد محصول نهایی در ساخت سازه‌های دریایی و ملاحظات اقتصادی، فنی و تولیدی صورت گرفته است. به این منظور، آلومینیوم آلیاژی 6061-T6 که به سبب مقاومت به خوردگی بالا در کنار آلیاژهای سری 5000 آلومینیوم به عنوان ماده‌ای شناخته شده در ساخت سازه‌های دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، جهت ساخت FMLها انتخاب گردیده است. ورق‌های آلومینیوم 6061-T6 با ضخامت 0.50 میلی‌متر از شرکت ایمگ استریا متال¹ اتریش خریداری شد. با توجه به سهولت اجرا، قیمت پایین و دسترس‌پذیری، در ساخت محصول پیشنهادی از الیاف شیشه نوع ای² با بافت مسطح استفاده شده است. پارچه‌های الیاف شیشه با بافت مسطح و دانسیته سطحی 200 گرم بر مترمربع که ماده‌ای بسیار متداول در ساخت شناورهای دریایی است از شرکت کولان³ استرالیا خریداری شد. در این پژوهش از رزین اپوکسی دوجزئی آرالدیت ال-وای 5052 و سخت‌کننده آرادور 5052 شرکت هانسمن⁴ استفاده شده است. به منظور اتصال هسته به پوسته، یک چسب اپوکسی چندمنظوره یعنی آرالدیت 2011/AB شرکت هانسمن خریداری شد و جهت آب‌بندی تعدادی از نمونه‌ها از چسب تک جزئی پایه سیلیکونی شرکت مگاپخش پارس ساخت کشور ایران استفاده شده است. در این پژوهش، چوب بالسا با ضخامت 9.15 میلی‌متر و دانسیته 130 کیلوگرم بر متر مکعب از شرکت میدوست⁵ تهیه شده و به عنوان هسته مورد استفاده قرار گرفته است. خواص مکانیکی و فیزیکی ورق‌های آلومینیوم، رزین و چسب مورد استفاده در این پژوهش که از طریق اطلاعات شرکت‌های سازنده و هندبوک‌های مواد استخراج شده است، در جدول 1 آورده شده است.

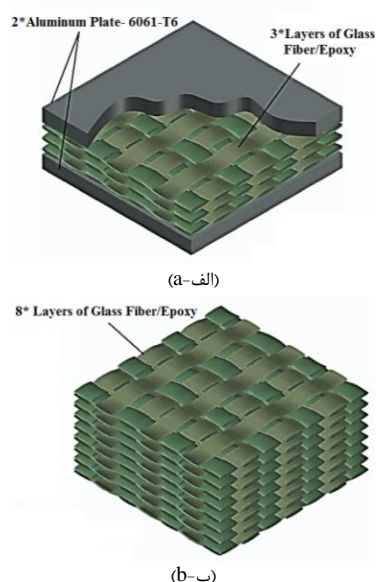


Fig. 2 Schematic representation of the laminate sequence in (a) FML (b) GE laminates.

شکل 2 تصویر شماتیک از چیدمان لایه‌گذاری در چندلایه‌های کامپوزیتی (الف) FML (ب) GE.

شکل 2 تصویر شماتیک از چیدمان لایه‌های مختلف فلز و کامپوزیت در ساخت چندلایه‌های کامپوزیتی استفاده شد. از هشت تک‌لایه کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی استفاده شد. از روش لایه‌گذاری دستی برای تولید چندلایه‌های الیافی فلزی و همچنین، چندلایه‌های کامپوزیتی استفاده شد. پس از لایه‌گذاری، چندلایه‌ها برای مدت یک روز در خلأ 60- کیلو پاسکال در دمای محیط توسط سیستم کیسه خلأ تحت عملیات مکش قرار گرفتند. در نهایت، ضخامت چندلایه‌های الیافی فلزی و کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی مورد بررسی به ترتیب حدود 1.80 ± 0.02 و 2.08 ± 0.08 میلی‌متر و جرم واحد سطح هر دو نوع کامپوزیت حدود 0.03 ± 4.35 کیلوگرم بر متر مربع تعیین گردید. تصویری شماتیک از چیدمان لایه‌های مختلف فلز و کامپوزیت در ساخت چندلایه‌های FML و GE، در شکل 2 قابل مشاهده است.

ساختارهای ساندویچی توسط اتصال پوسته‌هایی از جنس FML و همچنین GE به هسته چوب بالسا از طریق لایه‌هایی از چسب آرالدیت با ضخامت 0.05 میلی‌متر تولید شدند. به منظور اطمینان از پخت کامل و حصول اتصال بهینه، ساختارهای ساندویچی تولید شده به مدت یک روز تحت فشار خلأ قرار گرفتند. در شکل 3 تصاویری شماتیک از ساختار ساندویچی متشکل از هسته بالسا و پوسته FML نشان داده شده است.

2-2- فرآیند ساخت ساختارهای ساندویچی

در این پژوهش، دو نوع ساختار ساندویچی مبتنی بر هسته بالسا با پوسته چندلایه الیافی فلزی (FML) و پوسته الیاف شیشه/اپوکسی (GE) طراحی و ساخته شد. برای ساخت FMLها از ورق‌های مربع‌شکل آلیاژ آلومینیوم با ابعاد 400 میلی‌متر \times 400 میلی‌متر استفاده شد. به منظور افزایش کیفیت اتصال فلز به کامپوزیت، سطح ورق‌های فلزی از طریق فرایندهای چربی‌زدایی، اسیدشویی، بازشویی و کروماته کردن آماده‌سازی گردید. FMLهای مورد استفاده در این پژوهش، با لایه‌چینی متناوب سه لایه

¹ AMAG Austria Metall

² E-Glass Fiber

³ Colan Products Pty

⁴ Huntsman Advanced Materials Americas Inc.

⁵ Midwest Products Co.

2-3- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌ها از صفحات ساخته‌شده از ساختارهای ساندویچی با ابعاد موردنظر توسط یک دستگاه برش جت آب برش داده شده و لبه آن‌ها با استفاده از یک کاغذ سنباده نرم آماده‌سازی شد. بدین ترتیب، ترک‌های سطحی احتمالی و ناهمگونی‌های موضعی از نمونه‌ها زدوده شد. به‌منظور سهولت در کدگذاری نمونه‌ها، برای نشان دادن نمونه‌های با پوسته کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف و چندلایه‌های الیافی فلزی به ترتیب از کدهای GE و FML استفاده شده است. نماد "B" نشان‌دهنده نوع هسته مورد استفاده در ساختار ساندویچی است یعنی هسته بالسا است. همچنین به‌منظور نشان دادن نمونه‌های خشک و بدون آسیب (مرجع) از نماد "D"، نمونه‌های غوطه‌ور شده در آب با لبه‌های آزاد (آب‌بندی نشده) و بدون آسیب از نماد "O" و نمونه‌های غوطه‌ور شده در آب با لبه‌های آب‌بندی‌شده و با آسیب مصنوعی از نماد "S" استفاده شد. نمادهای آخر به ترتیب "F" و "B" است که مربوط به نوع آزمون‌های مکانیکی اعمال‌شده به نمونه‌ها یعنی خمش و کمانش می‌باشد. لازم به ذکر است که در نمونه‌هایی که صرفاً به منظور آزمون جذب آب مورد استفاده قرار گرفتند، صرفاً از نمادهای "O" و "S" پس از نماد "B" استفاده شده است. برای مثال یک نمونه خمشی ساخته‌شده از ساختار ساندویچی با هسته بالسا و پوسته‌های چندلایه الیافی فلزی خشک با کد FML/B/DF و یک نمونه کمانشی ساخته‌شده از ساختار ساندویچی با هسته بالسا و پوسته‌های کامپوزیت با لبه‌های آب‌بندی‌شده (دارای تخریب) با کد GE/B/SB نام‌گذاری شده است.

3- فرآیند انجام آزمون‌ها

3-1- اعمال شرایط محیطی مرطوب توسط غوطه‌ورسازی در آب

بنا بر توصیه لژراند و همکاران [22]، نمونه‌های در نظر گرفته‌شده جهت آزمون جذب آب در گام نخست تحت دمای 50 درجه سانتی‌گراد در یک آون فن‌دار رطوبت‌زدایی اولیه شدند. مجموعه‌ای از نمونه‌هایی با لبه‌های باز و لبه‌های آب‌بندی‌شده (دارای آسیب اولیه) از هر نوع ساختار ساندویچی جهت اعمال شرایط محیطی پیش از آزمون‌های مکانیکی تعیین شدند. نمونه‌ها طی مدت 100 روز به‌صورت کامل در یک حمام حاوی آب غوطه‌ور شدند. همین شرایط محیطی بر روی مجموعه دیگری از نمونه‌ها با ابعادی کوچکتر از نمونه‌های آزمون‌های مکانیکی یعنی ابعادی معادل با 50×50 میلی‌متر مربع (طول × عرض) به منظور ارزیابی دقیق‌تر میزان جذب آب اعمال گردید. لازم به‌ذکر است که نمونه‌های کوچک مذکور در دو نوع آب‌بندی نشده و بدون آسیب (O) و آب‌بندی‌شده و با یک آسیب مرکزی در دو وجه فوقانی و تحتانی (S) آماده شدند (یک نمونه حاوی آسیب در بخش فوقانی شکل 4 قابل مشاهده است).

علاوه بر این، نمونه‌هایی آماده‌شده از چوب بالسا (بدون پوسته) با ابعاد 50 × 9.15 میلی‌متر مکعب به‌عنوان مرجع حالت اشباع رطوبت¹ تحت پیرسازی رطوبتی قرار گرفتند. از آنجایی که دانسیته کلیه نمونه‌ها کمتر از آب بود، نمونه‌ها در سطح آب نیمه‌غوطه‌ور می‌شدند. بنابراین، به‌منظور حصول اطمینان از مغروق شدن کامل نمونه‌ها طی فرآیند 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 شد. تغییرات جرم به‌صورت تابعی از زمان به‌طور مداوم انجام شد تا نمونه‌های چوب بالسا به حالت اشباع نسبی رسیدند. میزان جذب آب طی 30 روز اول

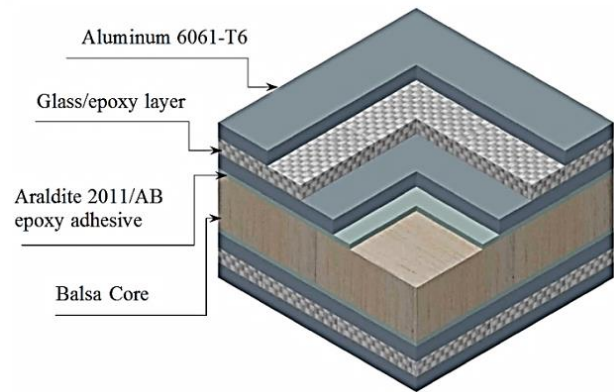


Fig. 3 Schematic section of a sandwich structure made of balsa core and skins made of FML.

شکل 3 مقطعی شماتیک از ساختار ساندویچی ساخته‌شده از هسته بالسا و پوسته‌هایی از جنس FML

در این بخش، به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند جذب آب در حالت آسیب‌دیدگی پوسته، تخریب‌های مصنوعی به‌صورت متقارن بر هر دو وجه بالایی و پایینی تعداد مشخصی از نمونه‌ها ایجاد شد. به این ترتیب، آسیب‌ها در فاصله 10 میلی‌متری از منتهالیه نمونه‌های آزمون خمش که خارج از دهانه تیر بوده و همچنین 10 میلی‌متری از منتهالیه نمونه‌های کمانش که داخل فیکسچر است ایجاد شدند. بنابراین با توجه به دور بودن این آسیب‌ها از نقاط بارگذاری، وجود آن‌ها تأثیر چندانی بر پاسخ سازه‌های نمونه‌ها ندارد. بر این اساس، نمونه‌ها به‌صورت جزئی توسط یک دریل کاربردی با پوشش تیتانیوم نیتريد با قطر 6 میلی‌متر سوراخ شدند. به منظور اطمینان از کفایت تسریع جذب آب از پوسته‌ها، عمق سوراخ‌ها برای هر دو نوع پوسته معادل 1.55 میلی‌متر تعیین شد که با عنایت به ضخامت کمتر FML نسبت به بحرانی‌تری قرار دارد. علاوه بر این، به‌منظور کاهش جذب آب از لبه‌های آزاد نمونه‌ها، لبه‌های جانبی نمونه‌های آسیب‌دیده توسط یک لایه نازک چسب سیلیکونی الاستیک پوشش داده شد. شکل 4 نشان‌دهنده فرآیند ایجاد تخریب و آب‌بندی نمونه‌های آسیب‌دیده به‌صورت واقعی و شماتیک است.

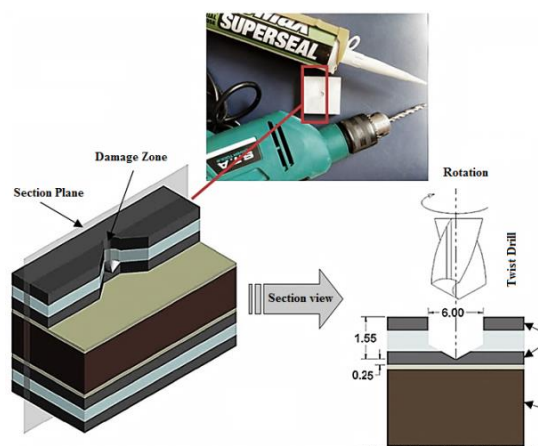


Fig. 4 Details of artificial damage to specimens made of sandwich structure consisting of balsa core and FML skin.

شکل 4 جزئیات آسیب مصنوعی واردشده بر نمونه‌های ساخته‌شده از ساختار ساندویچی با هسته بالسا و پوسته FML

¹ Moisture saturation state

مخصوصاً از جنس استیل به صورت کاملاً گیردار مقید شده و تحت بار محوری فشاری واقع شد. به منظور اجتناب از تخریب‌های موضعی دو انتهای نمونه، دو سر نمونه تا حد ممکن مسطح شدند تا عمود بر جهت بارگذاری باشند. نحوه انجام آزمون و تصویری از یک نمونه تحت بارگذاری محوری فشاری در شکل 6 قابل مشاهده است. بدین ترتیب، نمونه‌ها درون فک‌های متحرکی که در راستای عرضی حرکت ریلی داشتند قرار داده شدند. پس از آن، به منظور اطمینان از همراستایی نیروی فشاری اعمالی از یک گونیا استفاده شد و پس از هم راستا نمودن، نمونه‌ها توسط 4 پیچ تنظیم‌کننده (در هر سمت) ثابت شدند.

4- نتایج و بحث

4-1- رفتار جذب آب

نمودار تغییرات جذب آب به عنوان تابعی از روزهای غوطه‌وری برای چوب بالسا و ساختارهای ساندویچی با پوسته GE و FML در شکل‌های 7 و 8 ارائه شده است. از شکل 7 مشخص است که نمونه‌های چوب بالسا پس از گذشت زمان 100 روز پیرسازی در آب به سطح اشباع بسیار چشمگیر 1180٪ می‌رسد. پس از سپری شدن زمان پیرسازی در آب، تغییر رنگ چوب بالسا از کرمی روشن به اخراپی مشهود است.

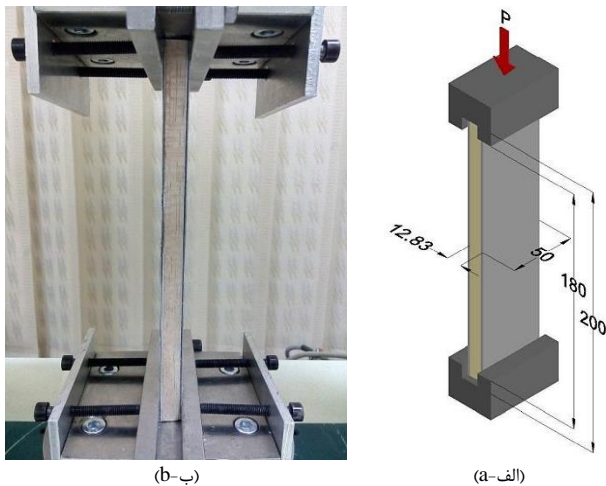


Fig. 6 (a) Test configuration and (b) sandwich specimen under compressive loading (all dimensions are in mm).

شکل 6 (الف) پیکره‌بندی آزمون (ب) نمونه تیر ساندویچی تحت بارگذاری فشاری (همه ابعاد بر حسب میلی‌متر هستند).

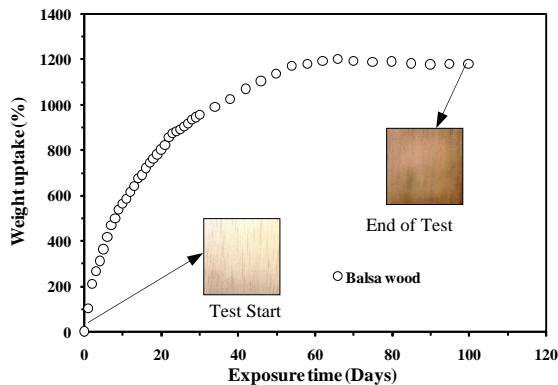


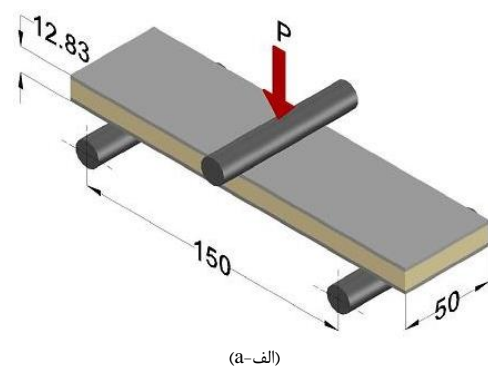
Fig. 7 Percentage of water uptake in terms of aging days in balsa wood.

شکل 7 درصد جذب آب بر حسب روزهای پیرسازی در چوب بالسا.

به صورت 24 ساعت یک‌بار و سپس با کاهش تدریجی جذب آب، هر 96 ساعت و 120 ساعت یک‌بار صورت گرفت. به این منظور، نمونه‌ها به صورت 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.

2-3- آزمون خمش

آزمون خمش سه‌نقطه‌ای¹ بر روی نمونه‌های ساندویچی با هسته بالسا با ابعاد اسمی به ترتیب $12.83 \pm 0.1 \times 50 \times 200$ میلی‌متر (ضخامت \times عرض \times طول) با نرخ جابجایی 6.0 میلی‌متر بر دقیقه و در دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد مطابق اساس استاندارد ASTM C393/C393M [23] انجام شد. طول دهانه تیر ساندویچی برابر با 150 میلی‌متر در نظر گرفته شد. آزمون تا وقوع حداکثر بار خمشی ادامه یافته و با مشاهده تخریب‌های واضح در نمونه متوقف شد. تصویری از نحوه انجام آزمون خمش سه‌نقطه‌ای بر روی نمونه‌های ساندویچی با هسته بالسا در شکل 5 نشان داده شده است.



(الف-ا)



(ب-ب)

Fig. 5 (a) Test configuration and (b) sandwich beam specimen under 3PB loading (all dimensions are in mm).

شکل 5 (الف) پیکره‌بندی آزمون (ب) نمونه تیر ساندویچی تحت بارگذاری خمش سه‌نقطه‌ای (همه ابعاد بر حسب میلی‌متر هستند).

3-3- آزمون کمانش

آزمون کمانش تحت بار فشاری محوری (موازی صفحه) مبنایی جهت ارزیابی رفتار کمانشی نمونه‌های ساندویچی فراهم می‌سازد. بر اساس استاندارد ASTM C364/C364M [24]، به منظور تأمین شرایط لازم جهت وقوع کمانش لازم است طول پشتیبانی‌نشده نمونه لااقل بزرگ‌تر از 8 برابر ضخامت نمونه باشد. به این ترتیب، نمونه‌های مستطیلی ساندویچی با هسته بالسا با ابعاد $12.83 \pm 0.1 \times 50 \times 200$ میلی‌متر مکعب (b×L×d) با طول دهانه 180 میلی‌متر که تقریباً معادل 14 برابر ضخامت است توسط دو فیکسچر

¹ Three-point bending (3PB) test

جدول 2 بیشینه مقدار جذب آب در نمونه‌های ساندویچی با هسته بالسا پس از پیرسازی در آب

Table 2 Maximum amount of water uptake in sandwich specimens with balsa core after aging in water

نمونه‌های ساندویچی با پوسته کامپوزیتی الیاف شیشه‌اپوکسی		نمونه‌های ساندویچی با پوسته چندلایه‌های الیافی فلزی		مشخصه
GE/B/S	GE/B/O	FML/B/S	FML/B/O	
106.71	138.24	83.32	115.22	بیشینه مقدار جذب رطوبت (%)

FML غوطه‌ور شده در آب با لبه‌های آزاد یعنی GE/B/O و FML/B/O به ترتیب 138.24٪ و 115.22٪ ثبت شده است.

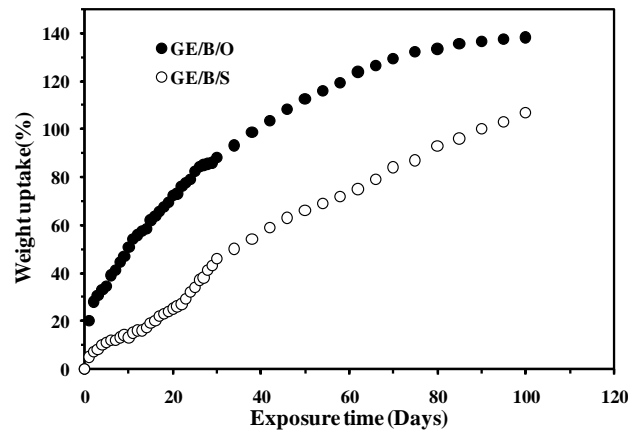
لازم به ذکر است که با توجه به آزاد بودن لبه‌های نمونه‌ها، مقادیر عمده جذب آب در هر دو نوع سیستم ساندویچی توسط هسته چوبی صورت گرفته است و اصولاً جذب آب نه‌تنها در FMLها بلکه در چندلایه‌های کامپوزیتی GE (البته در حالت سالم و بدون تخریب)، معمولاً کمتر از 3٪ است. بنابراین این آزمون نمی‌تواند به‌عنوان ملاک کاملی جهت ارزیابی رفتار جذب آب نمونه‌ها در نظر گرفته شود. 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 ندارد. لذا به‌منظور بررسی نحوه پاسخ هر دو سیستم به پدیده جذب آب از نمونه‌های با لبه آب‌بندی شده و حاوی آسیب استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که برای هر دو نوع نمونه مقادیر جذب آب در حالت آب‌بند نمودن لبه تا حدی کاهش یافته است. بدین ترتیب، حداکثر میزان جذب آب برای نمونه‌های با هسته بالسا با لبه‌های آب‌بندی شده و دارای آسیب مصنوعی یعنی GE/B/S و FML/B/S به ترتیب 106.71٪ و 83.32٪ ثبت گردیده است.

با توجه به آب‌بندی نمونه‌ها در لبه‌ها توسط چسب سیلیکونی قاعداً می‌بایست نفوذ آب صرفاً از طریق سطوح بالا و پایین و آسیب مصنوعی ایجاد شده بر روی همین سطوح صورت می‌گرفت که نتایج نشان می‌دهد مقادیر زیادی آب از طریق خود چسب آب‌بند (به سبب وجود خلل و فرج اولیه) در آغاز آزمون وارد نمونه‌ها شده است. لازم به ذکر است که به منظور کاهش اثر چسب آب‌بند در خواص مکانیکی نمونه‌های آب‌بند شده لایه نازکی از این چسب روی نمونه‌ها اعمال شده بود که به نظر می‌رسد این لایه آب‌بند به سبب نازکی نتوانسته به صورت کامل مانع ورود آب به داخل نمونه‌ها شود و خود نیز دچار جذب آب شده است.

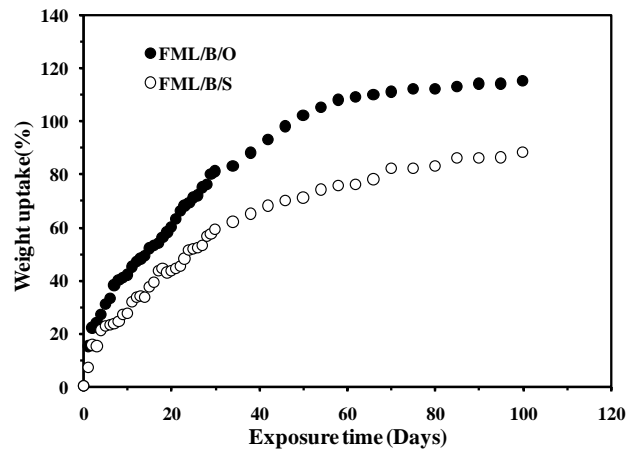
از سویی دیگر، همان‌گونه که در شکل 8 مشخص است نمونه‌های GE/B/S بر خلاف نمونه‌های آب‌بند نشده پس از گذشت حدود یک ماه با شیب تندی دچار افزایش وزن شده‌اند که دال بر عملکرد منفی آسیب مصنوعی ایجاد شده روی سطح این نمونه‌ها به عنوان منفذی جهت تسریع ورود آب به داخل هسته و حتی خود پوسته است. بر خلاف این، نمونه‌های FML/B/S دارای چنین رفتاری نبوده که نشانگر این موضوع است که آب نتوانسته از آسیب مصنوعی به درون ساختار راه یابد. این عدم حساسیت نمونه‌های با پوسته FML به جذب آب ناشی از آسیب به احتمال قوی به لایه‌های فلزی مجاور هسته مرتبط است که نظیر یک سد غیرقابل نفوذ در برابر ورود آب به هسته عمل نموده‌اند و همان‌گونه که به‌صورت شماتیک در شکل 9 نشان داده شده است آب را وادار به منعکس شدن می‌نمایند.

همان‌گونه که در شکل 9 (الف-a) می‌توان ملاحظه نمود، حساسیت فراوان ساختارهای ساندویچی با پوسته GE به نفوذ رطوبت عمدتاً به سبب تعداد سطوح قرارگرفته در معرض آب است که به طرز قابل‌توجهی از نمونه‌های با پوسته FML بیشترند.

از تصاویر نشان داده‌شده در شکل 8 می‌توان مشاهده نمود که میزان حداکثر جذب آب برای ساختار ساندویچی با پوسته کامپوزیت GE و FML در مدت زمان پیرسازی 100 روز به‌مراتب کمتر از چوب بالسای خالص است؛ اما همین میزان نیز برای ساختارهای ساندویچی با پوسته کامپوزیت GE و FML متفاوت و قابل‌تأمل است. یقیناً حضور پوسته در هر دو نوع ساختار ساندویچی به نحو موفقیت‌آمیزی منجر به کاهش جذب رطوبت گردیده است. نتایج حداکثر میزان جذب آب برای دو سیستم ساندویچی با پوسته‌های کامپوزیت GE و FML در جدول 2 آورده شده است.



(الف-a)



(ب-b)

Fig. 8 Percentage of water uptake in terms of aging days in sandwich structure with balsa core and skin made of (a) GE (b) FML.

شکل 8 درصد جذب آب برحسب روزهای پیرسازی در ساختار ساندویچی با هسته بالسا و پوسته ساخته‌شده از جنس (الف) GE (ب) FML.

همان‌طور که انتظار می‌رفت مقادیر ثبت‌شده جذب آب برای سیستم‌های ساندویچی با پوسته کامپوزیت GE بیش از ساختار ساندویچی با پوسته FML است. سطح حداکثر جذب آب برای نمونه‌های بالسا با پوسته GE و

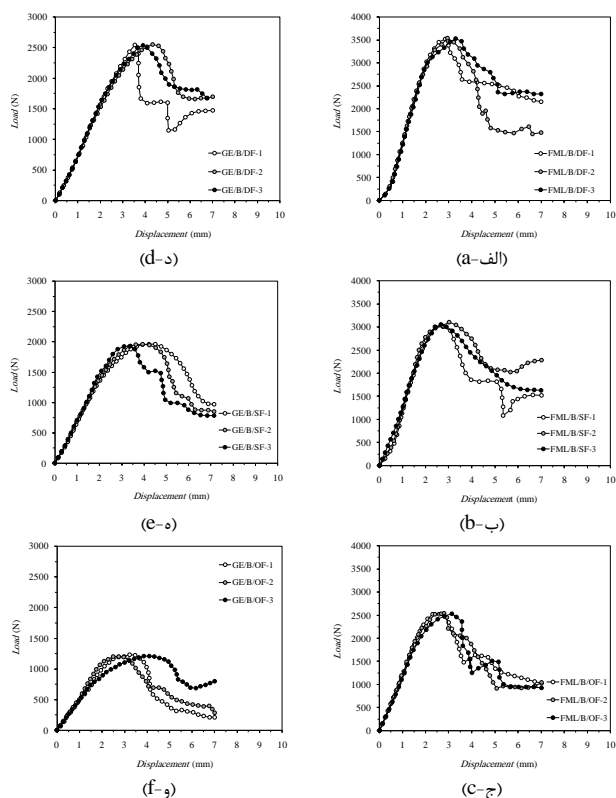


Fig. 10 Load-displacement curve for sandwich specimens with balsa core (a) FML/B/DF (b) FML/B/SF (c) FML/B/OF (d) GE/B/DF (e) GE/B/SF (f) GE/B/OF under 3PB test.

شکل 10 نمودار بار-جابجایی برای نمونه‌های ساندویچی با هسته بالسا (الف) GE/B/SF (ب) FML/B/DF (ج) FML/B/SF (د) FML/B/OF (ه) GE/B/DF (و) GE/B/OF تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای.

جدول 3 نتایج آزمون خمش سه‌نقطه‌ای برای نمونه‌های ساندویچی با هسته بالسا

Table 3 Results of 3PB test for balsa core sandwich specimens

کد نمونه	سفتی خمشی اولیه (نیوتن بر میلی‌متر)	نیروی خمشی بیشینه (نیوتن)
FML/B/DF	1870.72 ± 38	3532.83 ± 10
FML/B/SF	1633.91 ± 69	3053.29 ± 50
FML/B/OF	1211.25 ± 21	2532.03 ± 11
GE/B/DF	904.75 ± 6	2544.18 ± 7
GE/B/SF	695.32 ± 25	1948.14 ± 18
GE/B/OF	478.84 ± 10	1215.02 ± 17

مطابق جدول 3 نمونه‌های FML/B/DF (نمونه‌های خمشی خشک) دارای سفتی خمشی اولیه 1870.72 نیوتن بر میلی‌متر و نیروی خمشی بیشینه 3532.83 نیوتن هستند. به‌طور مشابه، نمونه‌های GE/B/DF دارای سفتی خمشی اولیه 904.75 نیوتن بر میلی‌متر و بیشینه نیروی خمشی 2544.18 نیوتن می‌باشند. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که با جایگزینی کامپوزیت‌های متداول الیاف شیشه/اپوکسی (GE) با چندلایه‌های الیافی-فلزی (FML)، تأثیر شگرفی در افزایش خواص خمشی ساختارهای ساندویچی با هسته بالسا رخ می‌دهد (107٪ افزایش در سفتی خمشی اولیه و 39٪ افزایش در مقدار نیروی خمشی بیشینه).

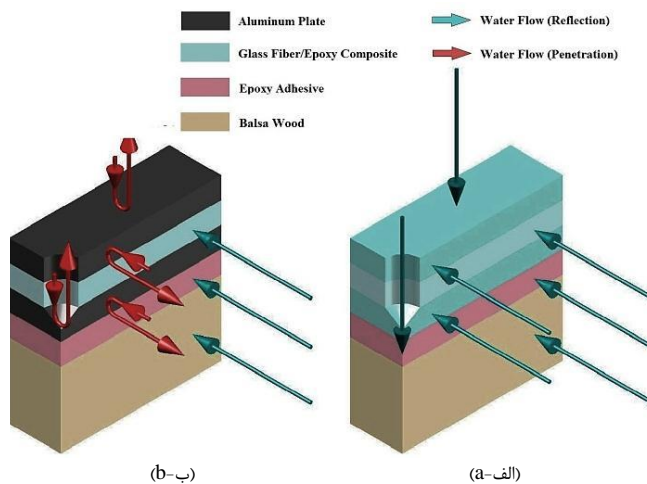


Fig. 9 Schematic illustration of the transport of water flow into the (a) GE and (b) FML.

شکل 9 بیان شماتیک انتقال آب به درون ساختار آسیب‌دیده با پوسته GE (الف) FML (ب)

2-4- رفتار خمشی

از آنجایی که بارهای خارج از صفحه نظیر ممان‌های خمشی هاگینگ و سگینگ¹ ناشی از امواج و پدیده کوبش کف² به‌عنوان مهم‌ترین شرایط بارگذاری واقع بر شناورهای دریایی مطرح می‌باشند، آزمون‌های خمشی جهت ارزیابی میزان زوال خواص مکانیکی ناشی از رطوبت در شرایط سرویس‌دهی بکار گرفته شده است.

شکل 10 نشان‌دهنده نمودارهای بار-جابجایی به‌دست‌آمده از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای ساختارهای ساندویچی با دو نوع متفاوت پوسته در حالت پیش و پس از پیرسازی رطوبتی است.

واضح‌ترین مسئله قابل‌ذکر در این نمودارها، بهبود چشمگیر رفتار خمشی ساختارهای ساندویچی مبتنی بر چوب بالسا توسط پوسته‌هایی از جنس چندلایه‌های الیافی فلزی است. همان‌طور که در شکل 10 قابل‌مشاهده است، رفتار خمشی نمونه‌های ساندویچی، قابل‌تقسیم بندی به سه فاز است: الف- نمونه‌های ساندویچی با هسته بالسا در ابتدا یک رفتار الاستیک خطی بدون بروز هیچ‌گونه تخریب از خود نشان دادند. با توجه به شکل 10، نمونه‌های با پوسته FML نسبت به نمونه‌های با پوسته GE، سفتی خمشی بسیار بالاتری از خود بروز داده‌اند.

ب- فاز دوم با یک رفتار غیرخطی آغاز می‌شود که عمدتاً به شکل‌گیری هسته‌های میکروتورک درون هسته یا جدایش موضعی پوسته/هسته منجر می‌گردد و با کاهش شیب نمودار تا رسیدن به نقطه بیشینه بارگذاری ادامه می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که میزان رفتار غیرخطی نمونه‌های با پوسته FML قدری بیش از نمونه‌های با پوسته کامپوزیتی است. یک علت محتمل برای بروز چنین رفتاری، تأثیر پوسته‌های مدول بالا و چقرمه FML است که به کل ساختار اجازه تغییر شکل‌های پلاستیک وسیعی را می‌دهد.

پ- در فاز سوم، نیروی اعمالی به نمونه کاهش یافته و تا شکست نهایی نمونه ادامه می‌یابد.

در جدول 3 مقادیر خمشی میانگین که مستقیماً از نمودار نیرو-جابجایی تعیین شده، ارائه گردیده است.

¹ Hogging and sagging bending moments

² Slamming

با فرض ورود یکسان آب از لبه‌های آزاد هر دو نوع سیستم ساندویچی، مشاهده می‌شود کاهش خواص خمشی در نمونه‌های GE با لبه باز بیش از نمونه‌های با پوسته FML است. این کاهش بیشتر خواص خمشی دو دلیل محتمل دارد: 1- پوسته GE نسبت به پوسته ساخته شده از FML بیشتر تحت تأثیر مکانیسم‌های مخرب ناشی از پیرسازی رطوبتی قرار گرفته است. 2- مقداری از جذب آب توسط خود سطوح کامپوزیتی وارد هسته شده است؛ امری که در نمونه‌های متشکل از FML رخ نداده است. احتمالاً این جذب آب صورت گرفته از ناحیه پوسته توانسته است کاهش خواص برشی ناحیه هسته/پوسته را در نمونه‌های کامپوزیتی تشدید نماید. بنابراین همان‌طور که انتظار می‌رفت، نتایج نشان‌دهنده برتری خواص خمشی نمونه‌های ساخته شده از پوسته FML نسبت به نمونه‌های با پوسته GE بوده و این برتری پس از پیرسازی رطوبتی نیز تا حد زیادی در این نمونه‌ها حفظ می‌گردد.

به منظور بررسی تأثیر پیرسازی رطوبتی بر رفتار مکانیکی مواد مورد مطالعه تصاویری در قالب اشکال 12 و 13 ارائه شده است که در آن‌ها رفتار نمونه‌ها حین و پس از آزمون خمش قابل ملاحظه می‌باشد. مطابق شکل 12 آنچه در بررسی نمونه‌های پیرسازی شده با هسته بالسا به چشم می‌خورد ایجاد تخریب قابل توجه در هسته بالسا بوده که میزان این نوع تخریب و محل آن با توجه به نوع پوسته و همچنین نحوه اعمال شرایط محیطی در نمونه‌های مورد مطالعه متفاوت است. با توجه به شکل‌های 12 (ب-ب) و 12 (ج-ج) هیچ‌گونه نشانه‌ای از چگالش هسته بالسا در نمونه‌های GE/B/SF و GE/B/OF ملاحظه نمی‌گردد، امری که در نمونه‌های GE/B/DF چنانکه در شکل 12 (الف-الف) مشخص است به شکل قابل توجهی رخ داده است. به نظر می‌رسد پیرسازی در آب توانسته تا حد زیادی خواص مکانیکی هسته بالسا را تحت‌الشعاع قرار داده و با تخریب انسجام ساختاری آن به بروز آسیب‌های وسیع در ساختار این ماده دامن زده باشد. همان‌گونه که در شکل‌های 12 (ب-ب) و 12 (ج-ج) می‌توان ملاحظه نمود، حالات خرابی غالب در نمونه‌های ساندویچی پیرسازی شده با هسته بالسا و پوسته‌های کامپوزیتی شامل تورق کامپوزیت/هسته در پوسته تحتانی به‌صورت وسیع و همچنین شکست برشی هسته بخصوص در نمونه‌های با لبه‌های محافظت نشده است.

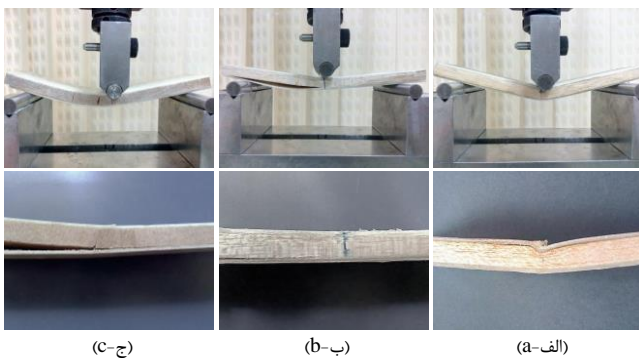
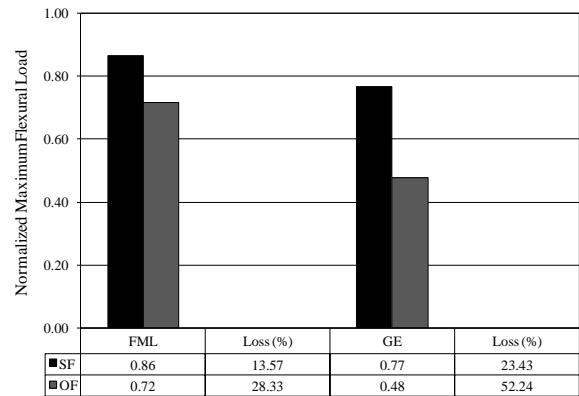


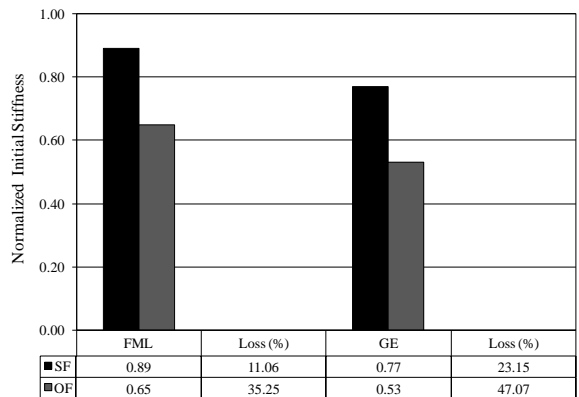
Fig. 12 Failure modes in sandwich structures with balsa core and glass/epoxy composite skin for specimens: (a) GE/B/DF, (b) GE/B/SF and (c) GE/B/OF specimens during and after 3PB testing.

شکل 12 حالات تخریب در ساختارهای ساندویچی با هسته بالسا و پوسته کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی برای نمونه‌های: (الف) GE/B/DF (ب) GE/B/SF (ج) GE/B/OF حین و پس از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای.

به‌منظور انجام یک مقایسه مناسب، مقادیر نرمال شده خواص خمشی نمونه‌های پیرسازی شده (خیس) نسبت به نمونه‌های مرجع (خشک) انجام شد که در شکل 11 قابل مشاهده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، جذب آب اثری منفی بر رفتار خمشی هر دو نوع سیستم ساندویچی داشته است. اگرچه، تأثیر مخرب پیرسازی رطوبتی در نمونه‌های کامپوزیتی GE نسبت به FML به مراتب بیشتر است.



(الف-الف)



(ب-ب)

Fig. 11 Degradation of (a) maximum flexural load and (b) initial flexural stiffness for sandwich specimens with balsa core and FML and GE composite skins after aging in water for 100 days.

شکل 11 کاهش (الف) بار خمشی بیشینه و (ب) سفتی خمشی اولیه برای نمونه‌های ساندویچی با هسته بالسا و پوسته FML و کامپوزیت GE پس از پیرسازی در آب به مدت 100 روز.

کاهش نیروی خمشی بیشینه و سفتی خمشی در نمونه‌های GE/B/SF نسبت به نمونه‌های خشک با همین جنس پوسته، به ترتیب 23.43٪ و 23.15٪ است. نمونه‌های FML/B/SF نسبت به نمونه‌های GE/B/SF رفتار مناسب‌تری در حفظ خواص خمشی داشته و به ترتیب 13.57٪ و 11.06٪ کاهش در مقادیر نیروی خمشی بیشینه و سفتی خمشی از خود نشان دادند. کاهش نیروی خمشی بیشینه و سفتی خمشی در نمونه‌های با لبه باز GE/B/OF نسبت به نمونه‌های خشک به ترتیب 52.24٪ و 47.07٪ و برای نمونه‌های FML/B/OF برابر با 28.33٪ و 35.25٪ است.

بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان کاهش خواص خمشی در نمونه‌های ساندویچی با پوسته FML (به خصوص در حالت لبه‌های آب‌بند شده) بسیار کمتر از نمونه‌های با پوسته GE بوده و در صورت آب‌بندی کامل این نمونه‌ها (از ناحیه لبه‌های آزاد) حفظ مناسب‌تر خواص خمشی نیز میسر خواهد بود.

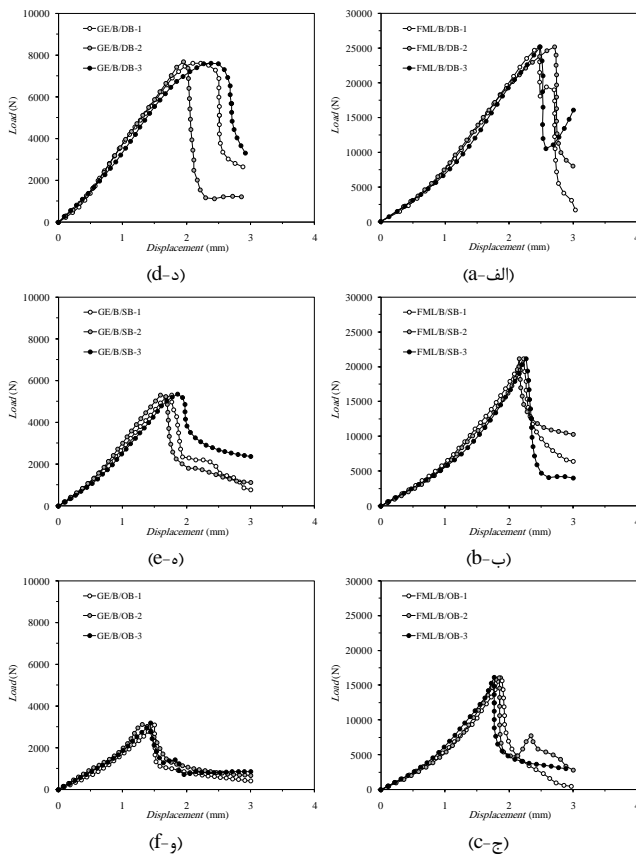


Fig. 14 Load-displacement curve for sandwich specimens with balsa core (a) FML/B/DF (b) FML/B/SF (c) FML/B/OF (d) GE/B/DF (e) GE/B/SF (f) GE/B/OF under buckling test by axial compressive load.

شکل 14 نمودار بار-جابجایی برای نمونه‌های ساندویچی با هسته بالسا (الف) GE/B/SF (ب) FML/B/DF (ج) FML/B/SF (د) FML/B/OF (ه) GE/B/DF (و) GE/B/SF (و) GE/B/OF تحت آزمون کمانش با بار فشاری محوری.

مقادیر بار بیشینه کمانشی در جدول 4 ارائه شده است. همان‌گونه که از این جدول مشاهده می‌گردد نیروی کمانشی بیشینه در نمونه‌های ساندویچی سالم با پوسته چندلایه الیافی فلزی 25213.11 نیوتن است که حدود 230٪/ بیشتر از نمونه‌های ساندویچی متناظر با پوسته‌های کامپوزیتی GE است.

جدول 4 نتایج آزمون کمانش تحت بار فشاری محوری برای نمونه‌های ساندویچی با هسته بالسا

Table 4 Results of buckling test under axial compressive load for balsa core sandwich specimens

بار کمانشی بیشینه (نیوتن)	کد نمونه
25213.11 ± 10	FML/B/DB
21143.64 ± 21	FML/B/SB
161.1.25 ± 19	FML/B/OB
7646.06 ± 33	GE/B/DB
5322.76 ± 30	GE/B/SB
3133.91 ± 18	GE/B/OB

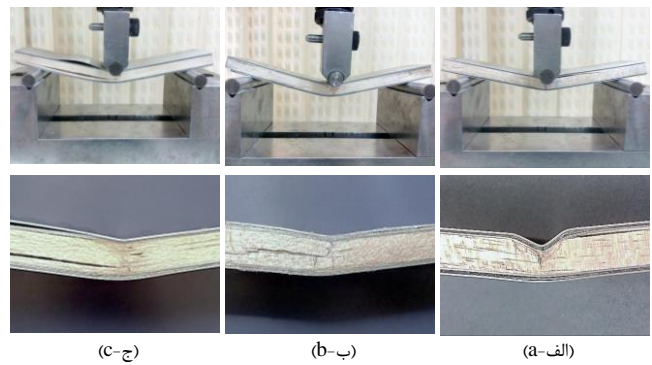


Fig. 13 Failure modes in sandwich structures with balsa core and fiber metal laminate skin for specimens: (a) FML/B/DF, (b) FML/B/SF and (c) FML/B/OF specimens during and after 3PB testing.

شکل 13 حالات تخریب در ساختارهای ساندویچی با هسته بالسا و پوسته چندلایه الیافی فلزی برای نمونه‌های: (الف) FML/B/DF (ب) FML/B/SF (ج) FML/B/OF حین و پس از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای.

تصاویر نشان داده شده در شکل‌های 13 (ب-ب) و 13 (ج-ج) نشانگر کاهش میزان خمش موضعی در نمونه‌های پیرسازی شده با هسته بالسا و پوسته‌های چندلایه الیافی فلزی نسبت به حالت قبل از پیرسازی است. در عوض میزان تورق فلز/کامپوزیت در نمونه‌های پیرسازی شده با هسته بالسا به خصوص FML/B/OF به طرز قابل توجهی نسبت به نمونه‌های خشک (FML/B/DF) افزایش داشته است که نشانه‌ای از تأثیر منفی پیرسازی رطوبتی بر خواص سطح مشترک فلز/کامپوزیت می‌باشد. البته بر خلاف نمونه‌های با پوسته GE به سبب وجود تغییر شکل پلاستیک در پوسته‌های FML حتی پس از پیرسازی نیز مقادیر محدودی از چگالش هسته در نمونه‌های پیرسازی شده کاملاً مشهود است. کاهش میزان تورق فلز/کامپوزیت در نمونه‌های FML/B/SF نسبت به نمونه‌های FML/B/OF گویای ضرورت محافظت حاشیه‌های پیرامونی این ساختارها در حالت عملیاتی می‌باشد. چرا که عملاً پوسته‌های بیرونی و درونی در معرض شرایط محیطی بوده که بنا به آنچه پیش از این گفته شد میزان تأثیرپذیری محیطی FMLها به سبب الگوی خاص ساختاری و بهره‌گیری از لایه‌های محافظتی آلومینیومی بسیار اندک است.

3-4- رفتار کمانشی

از آنجایی که رفتار کمانشی ساختارهای ساندویچی توسط عیوب کوچک نیز به صورت مؤثری تحت تأثیر قرار می‌گیرد، انتظار می‌رود که زوال ناشی از رطوبت بتواند به شدت قابلیت تحمل بار المان‌های سازه‌ای دریایی تحت بارهای فشاری را کاهش دهد. بنابراین در این بخش، آزمون فشار در حالت لبه‌ای¹ به منظور ارزیابی کیفیت سیستم‌های ساندویچی طراحی شده در مواجهه با بارگذاری‌های فشاری در محیط‌های مرطوب بر روی نمونه‌ها اعمال گردید که نتایج آن به صورت نمودارهای بار-جابجایی در شکل 14 نشان داده شده است. در کل، هر دو نوع ساختار ساندویچی در مواجهه با بارگذاری فشاری محوری یک رفتار نسبتاً مشابه تا نقطه بیشینه بار فشاری از خود بروز دادند. همچنین افت محسوس رفتار کمانشی هر دو نوع ساختار ساندویچی پس از پیرسازی رطوبتی نیز از نمودارهای بار-جابجایی کاملاً قابل مشاهده است. از سویی، تأثیر اساسی جایگزین نمودن لایه‌های کامپوزیتی GE با FML چه در حالت سالم و چه پس از پیرسازی نیز کاملاً مشهود می‌باشد.

¹ Edgewise compression test

به منظور ایجاد درک مناسب‌تر از ماهیت مکانیسم شکست و ارتباط آن با پاسخ ساختاری سیستم‌های مختلف ساندویچی تصاویری از نمونه‌ها پس از آزمون کمانش تحت فشار محوری تهیه شده است، که در شکل‌های 16 و 17 قابل مشاهده است. بررسی حالات تخریب در نمونه‌های ساندویچی با هسته بالسا نشان می‌دهد که رفتار کمانشی دو نوع نمونه تا حدی به یکدیگر نزدیک است.

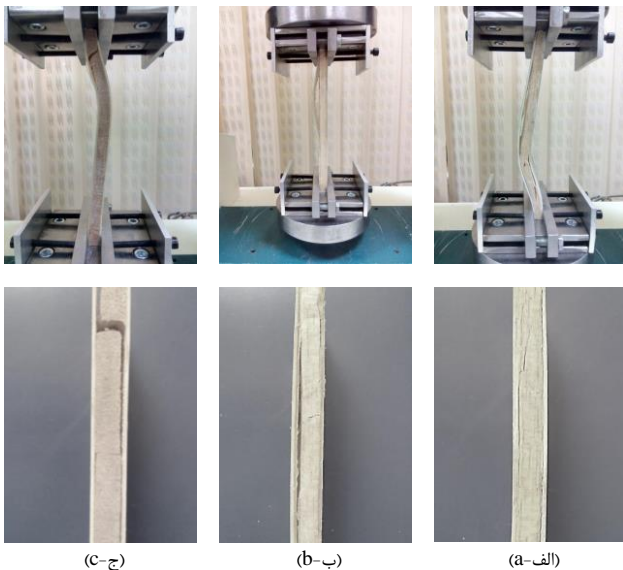


Fig. 16 Failure modes in sandwich structures with balsa core and GE composite skin for specimens: (a) GE/B/DB, (b) GE/B/SB and (c) GE/B/OB specimens during and after buckling test under axial compressive load.

شکل 16 حالات تخریب در ساختارهای ساندویچی با هسته بالسا و پوسته کامپوزیت GE برای نمونه‌های: (الف) GE/B/DB (ب) GE/B/SB (ج) GE/B/OB حین و پس از آزمون کمانش تحت بار فشاری محوری.

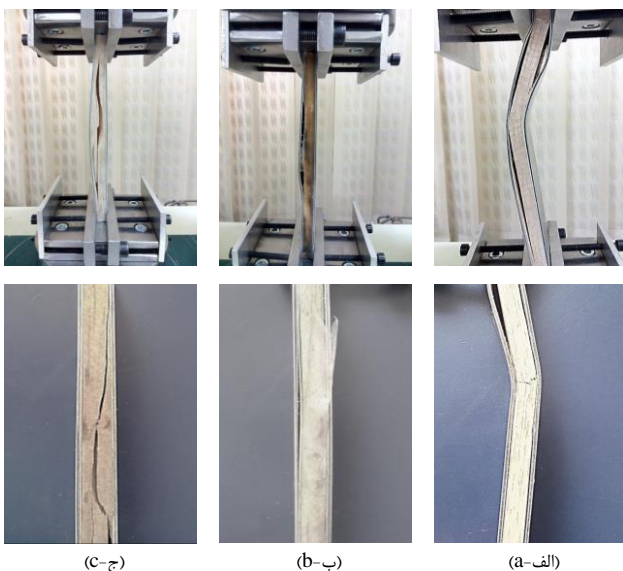


Fig. 17 Failure modes in sandwich structures with balsa core and FML skin for specimens: (a) FML/B/DB, (b) FML/B/SB and (c) FML/B/OB specimens during and after buckling test under axial compressive load.

شکل 17 حالات تخریب در ساختارهای ساندویچی با هسته بالسا و پوسته FML برای نمونه‌های: (الف) FML/B/DB (ب) FML/B/SB (ج) FML/B/OB حین و پس از آزمون کمانش تحت بار فشاری محوری.

بنابر آنچه گفته شد، به کارگیری FML تأثیری شگرف در بهبود رفتار کمانشی ساختارهای ساندویچی دریایی مبتنی بر چوب بالسا دارد که می‌تواند در طراحی المان‌های تقویتی تحت فشار نظیر دیواره‌های آب‌بند¹ در شناورها مورد توجه قرار گیرد. در شناورهای دریایی جهت تأمین پایداری دیواره‌های آب‌بند معمولاً از تعدادی تقویتی در راستای عمود بر دیواره‌ها استفاده می‌شود، که علاوه بر تحمیل وزن اضافی و پیچیدگی اجرا، در حجم قابل‌دسترسی محدودیت‌هایی را ایجاد می‌کند. با تغییر پوسته از ماده کامپوزیتی GE به FML و تأمین رفتار کمانشی عالی، کاهش این المان‌های تقویتی و حتی سبک‌سازی کل ساختار از طریق استفاده از هسته‌های بالسا با ضخامت کمتر نیز میسر خواهد بود.

به منظور انجام یک مقایسه مناسب، مقادیر نرمال شده بیشینه بار کمانشی نمونه‌های پیرسازی شده (خیس) نسبت به نمونه‌های مرجع (خشک) انجام شد که در شکل 15 قابل مشاهده است. با توجه به این شکل، جذب آب اثری منفی بر رفتار کمانشی هر دو نوع سیستم ساندویچی داشته است. اگرچه، تأثیر مخرب آن در نمونه‌های GE نسبت به FML به مراتب بیشتر است. کاهش بار کمانشی بیشینه در نمونه‌های GE/B/SB و FML/B/SB نسبت به نمونه‌های خشک با همین نوع هسته به ترتیب 36.14٪ و 16.14٪ است. همچنین کاهش بار کمانشی بیشینه در نمونه‌های بالسا با لبه باز GE/B/OB و FML/B/OB نسبت به نمونه‌های خشک به ترتیب 59.01٪ و 30.39٪ است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان کاهش بار کمانشی بیشینه نیز مشابه خواص خمشی در نمونه‌های ساندویچی با پوسته FML بسیار کمتر از چندلایه‌های GE بوده و در صورت آب‌بندی کامل این نمونه‌ها (از ناحیه لبه‌های آزاد) همین مقدار نیز قابل کنترل خواهد بود. البته باید توجه داشت که به عنوان یک قاعده کلی می‌توان گفت، پیرسازی در آب اثر مخرب‌تری بر خواص کمانشی نسبت به خواص خمشی داشته است. این امر به ماهیت پاسخ ساختاری نمونه‌های ساندویچی به نوع بارگذاری بستگی دارد که در بارگذاری خمشی تقریباً هسته نقشی در تحمل بارهای نرمال نداشته، اما در بارگذاری فشاری محوری هم هسته و هم پوسته و هم سطح مشترک هسته/پوسته به صورت مؤثر در تحمل بارهای فشاری مشارکت دارند.

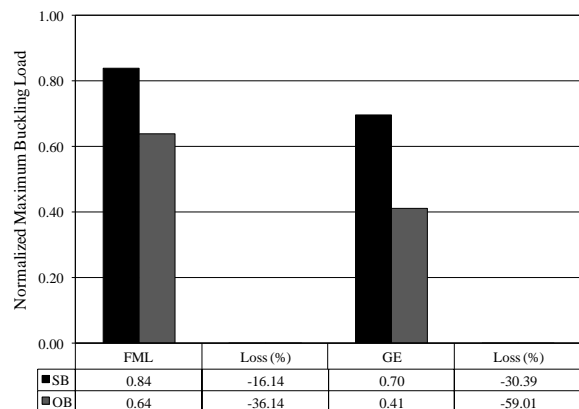


Fig. 15 Degradation of maximum buckling load for sandwich specimens with balsa core, FML and GE composite skins after aging in water for 100 days.

شکل 15 کاهش بار کمانشی بیشینه برای نمونه‌های ساندویچی با هسته بالسا، پوسته‌های FML و کامپوزیت GE پس از پیرسازی در آب به مدت 100 روز.

¹ Watertight bulkheads

- حداکثر میزان جذب آب برای نمونه‌های بالسا با پوسته GE و FML با لبه‌های آب‌بندی‌شده و دارای آسیب مصنوعی به ترتیب 106.71٪ و 83.32٪ ثبت گردید. کاهش حساسیت نمونه‌های با پوسته FML به جذب آب ناشی از آسیب به لایه‌های فلزی مجاور هسته مرتبط است که نظیر یک سد غیرقابل نفوذ در برابر ورود آب به هسته عمل نموده‌اند.
- با جایگزینی کامپوزیت‌های متداول الیاف شیشه/اپوکسی (GE) با چندلایه‌های الیافی فلزی (FML)، تأثیر چشمگیری در افزایش خواص خمشی ساختارهای ساندویچی با هسته بالسا رخ داد. افزایش سفتی خمشی اولیه و بیشینه نیروی خمشی ناشی از این جایگزینی به ترتیب برابر با 107٪ و 39٪ تعیین شد.
- کاهش بار خمشی بیشینه و سفتی خمشی ناشی از پیرسازی رطوبتی در نمونه‌های با هسته بالسا و پوسته GE با لبه‌های آب‌بند به ترتیب 23.43٪ و 23.15٪ و برای نمونه‌های با پوسته FML به ترتیب 13.57٪ و 11.06٪ تعیین گردید. کاهش بار خمشی بیشینه و سفتی خمشی در نمونه‌های با هسته بالسا و پوسته GE با لبه باز نسبت به نمونه‌های خشک به ترتیب 52.24٪ و 47.07٪ و برای نمونه‌های با پوسته FML برابر با 28.33٪ و 35.25٪ ثبت شد.
- میزان کاهش خواص خمشی در نمونه‌های ساندویچی با پوسته FML (به خصوص در حالت لبه‌های آب‌بند شده) به مراتب کمتر از نمونه‌های با پوسته کامپوزیتی GE بود.
- نیروی کمانشی بیشینه در نمونه‌های ساندویچی با پوسته FML و هسته بالسا 230٪ بیش از نمونه‌های ساندویچی متناظر با پوسته‌های GE است. بنابراین به‌کارگیری FML تأثیری چشمگیری در بهبود رفتار کمانشی ساختارهای ساندویچی دریایی مبتنی بر چوب بالسا دارد.
- کاهش بار کمانشی بیشینه در نمونه‌های ساندویچی پیرسازی شده با پوسته GE و FML با لبه‌های آب‌بند نسبت به نمونه‌های خشک با همین نوع هسته به ترتیب 36.14٪ و 16.14٪ است. همچنین کاهش بار کمانشی بیشینه در نمونه‌های پیرسازی با پوسته GE و FML و لبه‌های غیر آب‌بند نسبت به نمونه‌های خشک به ترتیب 59.01٪ و 30.39٪ تعیین گردید.

نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به عنوان گام‌های اولیه در به‌کارگیری مواد نوین در طراحی و ساخت شناورهای دریایی آتی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین به منظور حصول اطمینان از تکافوی الزامات طراحی در کاربردهای واقعی، بررسی سایر خواص مکانیکی نظیر استحکام ضربه‌ای و خستگی در شرایط نزدیک‌تر به محیط دریایی نظیر مهنمکی برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد.

6- مراجع

- [1] Malekzadeh-Fard, K. Azarnia, A. H. and Zolghadr, N., "Analytical modeling to predict dynamic response of Fiber-Metal Laminated Panel subjected to low velocity impact", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 331-342, 2018.
- [2] Rashiddadash, S. Sadighi, M. and 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. and 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] Najafi, M. and Eslami-Farsani, R., "Introducing novel sandwich panels based on of cork/polyurethane foam hybrid core and

همان‌گونه که در شکل 16 (الف-a) و 17 (الف-a) می‌توان ملاحظه نمود تخریب در دو نوع نمونه شامل جدایش پوسته هسته و برش طولی و عرضی در هسته است. همچنین کمانش موضعی نمونه‌های با پوسته FML در شکل 17 (الف-a) مشهود است. در نمونه‌های GE خشک که سفتی پوسته آن کمتر از پوسته FML است میزان جدایش پوسته از هسته تا حدی بیشتر است. علاوه بر این به سبب جدایش پوسته از هسته و عدم تحمل بار بیشتر از سوی نمونه‌ها، هیچ‌گونه شکست پوسته در هیچ‌یک از دو نمونه دیده نشد.

همان‌گونه که در شکل 16 می‌توان ملاحظه نمود مقادیر وسیعی از جدایش هسته/پوسته در دو نمونه GE/B/SB و GE/B/OB رخ داده که نشانگر نفوذ آب به ناحیه سطح مشترک هسته/پوسته بوده و منجر به تضعیف خواص این منطقه و در ادامه زوال خواص کمانشی کل ساختار ساندویچی شده است. علاوه بر این در نمونه‌های GE/B/OB وجود ترک‌های عمیق عرضی در نواحی مختلف هسته ناشی از تضعیف خواص برشی هسته به سبب جذب آب بوده است که طبعاً به تسلیم ساختار پیش از تحمل مقادیر قابل توجه بار انجامیده است (شکل 16 ج-c).

نکته قابل توجه در شکل 17 وقوع تورق در ناحیه کامپوزیت/فلز در پوسته دو نوع نمونه FML/B/SB و FML/B/DB پس از تحمل مقادیر قابل توجهی بار است. البته به سبب تأثیر منفی جذب بر نمونه‌های FML/B/SB میزان تغییر شکل کمانشی قابل تحمل برای این نمونه کمتر از نمونه‌های سالم است و همچنین تورق کامپوزیت/فلز در پوسته مقادیر بیشتری داشته و جدایش پوسته/هسته در این نمونه‌ها وسیع‌تر از نمونه‌های سالم است (شکل 17 (الف-a) و 17 (ب-b)). از سویی همان‌گونه که در شکل 17 (ج-c) قابل مشاهده است، در نمونه‌های FML/B/OB به سبب تضعیف خواص برشی هسته به سبب پیرسازی رطوبتی، نمونه‌ها پیش از تحمل مقادیر قابل توجه بار در ناحیه هسته دچار شکست‌های بسیار عمیق و وسیع شده و به علت عدم تحمل بار کمانشی قابل توجه توسط پوسته حتی تورق فلز/کامپوزیت در این نمونه‌ها بسیار محدود رخ داد.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، خواص مکانیکی و دوام محیطی دو نوع ساختار ساندویچی برای کاربردهای دریایی مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، دوام محیطی ساختارها توسط آزمون پیرسازی 100 روزه در آب و همچنین ارزیابی خواص مکانیکی توسط آزمون خمش سه‌نقطه‌ای و کمانش تحت بار فشاری محوری تعیین گردید. ساختار نوع 1 متشکل از پوسته کامپوزیتی از جنس الیاف شیشه/اپوکسی (GE) و هسته بالسا و ساختار نوع 2 متشکل از پوسته‌ای از جنس چندلایه الیافی فلزی (FML) و هسته بالسا بود. همچنین به رغم تفاوت اندک و غیر قابل اجتناب در ضخامت دو نوع پوسته GE و FML، سعی گردید با یک پیش‌بینی اولیه در طراحی نمونه‌ها (مبتنی بر چگالی مواد، تعداد لایه‌های الیاف شیشه و ضخامت لایه‌ها)، نمونه‌هایی با وزن واحد سطح تقریباً یکسان حاصل گردد. بر این اساس مقایسه دو نوع ساختار با توجه به یکسان بودن نسبی وزن آن‌ها منطقی خواهد بود. برخی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش به شرح ذیل می‌باشد:

- نمونه‌های چوب بالسا پس از گذشت زمان 100 روز پیرسازی در آب به سطح اشباع 1180٪ می‌رسد.
- سطح حداکثر جذب آب برای نمونه‌های بالسا با پوسته کامپوزیتی GE و FML غوطه‌ور شده در آب با لبه‌های آزاد به ترتیب 138.24٪ و 115.22٪ تعیین گردید.

- Sandwich Structures & Materials, Vol. 22, No. 6, pp. 1709-1742, 2020.
- [21] Sabzikar Boroujerdy, M. Dariushi, S. and Sadighi, M., "Bending Properties of Sandwich Beams with Fiber Metal Laminate Face Sheet", In Persian, Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 25, No. 5, pp. 375-382, 2013.
- [22] Legrand, V. TranVan, L. Jacquemin, F. and Casari, P., "Moisture-uptake induced internal stresses in balsa core sandwich composite plate: Modeling and experimental", Composite Structures, Vol. 119, pp. 355-364, 2015.
- [23] ASTM C393. (2011), Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- [24] ASTM C364. (2011), Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- composite grid structure for marine applications", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 3, pp. 1064-1075, 2020.
- [5] Shir Mohammadi, M. and Naim, J., "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. 22-41, 2014.
- [6] Newaz, G., Mayeed, M. and Rasul, A., "Characterization of balsa wood mechanical properties required for continuum damage mechanics analysis", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, Vol. 230, No. 1, pp. 206-218, 2016.
- [7] Fathi, A. Wolff-Fabris, F. Altstadt, V. and Gatzi, R. "An investigation on the flexural properties of balsa and polymer foam core sandwich structures: Influence of core type and contour finishing options", Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol.15, No. 5, pp.487-508, 2013.
- [8] Tagarielli, L. V. Deshpande, V. S. and Fleck, N. A., "The dynamic response of composite sandwich beams to transverse impact", International Journal of Solids and Structures, Vol. 44, No. 7, pp. 2442-2457, 2007.
- [9] Atas, C. and Sevim, C., "On the impact response of sandwich composites with cores of balsa wood and PVC foam", Composite Structures, Vol.93, No. 1, pp.40-48, 2010.
- [10] Wang, H. Ramakrishnan, K. R. and Shankar, K., "Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores", Materials and Design, Vol.99, pp.68-82, 2016.
- [11] Najafi, M. Ansari, R. and 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.
- [12] Najafi, M. Darvizeh, A. and 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.
- [13] <https://www.passagemaker.com/technical/core-moisture>, available in 17, February 2022.
- [14] Sadler, R. L. Sharpe, M. Panduranga, R. and Shivakumar, K., "Water immersion effect on swelling and compression properties of Eco-Core, PVC foam and balsa wood", Composite Structures, Vol. 90, No. 3, pp. 330-336, 2009.
- [15] Najafi, M. Ansari, R. and Darvizeh, A., "Experimental study of the influence of mixing method of nanoclay on mechanical properties of polymer composites and fiber metal laminates", In Persian, Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 7, No. 2, pp. 63-80, 2017.
- [16] Najafi, M. Ansari, R. and Darvizeh, A., "Investigating the Effects of Surface Treatment and Nanoparticles Addition on Mechanical Properties of FMLs Using the Response Surface Methodology", In Persian, Journal of Mechanical Engineering, Vol. 48, No. 3, pp. 329-338, 2018.
- [17] Abdollahi Azghan, M. Fallahnejad, M. Zamani, A and Eslami-Farsani, R., "Investigation the flexural behavior of fiber metal laminates containing glass and Kevlar fibers subjected to thermal cycling", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 3, pp. 981-988, 2020.
- [18] Najafi, M. Ansari, R. and Darvizeh, A., "Effect of Different Environmental Conditions on Impact Properties of FMLs Hybridized with Nanoclay", In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 12, pp. 193-203, 2018.
- [19] Najafi, M. Ansari, R. and Darvizeh, A., "Environmental Effects on Mechanical Properties of Glass/Epoxy and Fiber Metal Laminates, Part I: Hygrothermal Aging", Mechanics of Advanced Composite Structures, Vol. 4, No. 3, pp. 187-196, 2017.
- [20] Najafi, M. Darvizeh, A. and Ansari, R., "Characterization of moisture effects on novel agglomerated cork core sandwich composites with fiber metal laminate facesheets", Journal of