



بررسی تجربی رفتار دینامیکی پانل ساندویچی کامپوزیتی با مواد خودترمیم تحت ضربه شاری و تخریب خمش سه نقطه‌ای

نوید جلالیان میرزاپور¹، مهدی یارمحمدتوسکی^{2*}

1- کارشناسی ارشد، طراحی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران
* صندوق پستی 1365/4435، m_yarmohammad@azad.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، رفتار ضربه شاری پانل ساندویچی با لحاظ مواد خودترمیم در آن، مورد بررسی قرار گرفته است. پانل ساندویچی شامل پوسته کامپوزیتی الیاف کربن با چیدمان متقارن (90/0) در قسمت بالا و پایین و هسته جامد از فوم PVC بین آن‌ها می‌باشد. مواد خودترمیم درون لوله‌های نازک شیشه‌ای پر شده و بین لایه‌های کامپوزیت پانل ساندویچی قرار داده شده‌اند. ساخت پانل ساندویچی به روش لایه‌چینی دستی بوده که از اپوکسی برای اتصال لایه‌ها نیز استفاده شده است. مواد خودترمیم دارای سه کسر حجمی 0.5، 1 و 1.5 درصد هستند که در بین لایه‌های کامپوزیتی پانل ساندویچی بکار گرفته شده‌اند. تخریب پانل ساندویچی با لحاظ مواد خودترمیم توسط دستگاه خمش سه نقطه‌ای انجام شده است. پس از تخریب، ترمیم آغاز شده و مدت زمان‌های صفر، سه و هفت روز برای تأثیر مواد خودترمیم پانل ساندویچی در نظر گرفته شده است. نمونه‌ها تحت آزمایش ضربه شاری در مدت زمان‌های مذکور قرار گرفته و تأثیر مواد خودترمیم بر روی رفتار ضربه پانل ساندویچی مورد ملاحظه قرار گرفته است. نتایج تجربی رفتار ضربه شاری پانل ساندویچی با لحاظ مواد خودترمیم بیانگر این است که بیشترین میزان چقرمگی شکست دینامیکی و بازدهی ترمیم متعلق به نمونه با کسر حجمی 1.5 درصد پس از گذشت هفت روز از زمان تخریب در مقایسه با نمونه شاهد می‌باشد. بکارگیری لوله‌های شیشه‌ای خود به‌تنهایی موجب افزایش استحکام سازه ساندویچی به میزان چشمگیری می‌شوند و تعداد لوله‌ها در افزایش استحکام سازه موثر است. با افزایش کسر حجمی و زمان ترمیم، بازدهی ترمیم پانل ساندویچی افزایش می‌یابد.

اطلاعات مقاله

دریافت: 95/11/04
پذیرش: 95/11/25

کلیدواژگان:

پانل ساندویچی
کامپوزیت
مواد خودترمیم
ضربه شاری
کسر حجمی

Experimental Investigation of Dynamic Behavior of Composite Sandwich Panel Using Self-healing Materials under CHARPY impact and 3-point Bending Destruction

Navid Jalalian Mirzapour¹, Mehdi Yarmohammad Tooski^{1*}

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University South Branch, Tehran, Iran
* P.O.B. 11365/4435, Tehran, Iran, m_yarmohammad@azad.ac.ir

Keywords

Sandwich panel
Composite
Self-healing
CHARPY impact
Volume fraction

Abstract

In this research, CHARPY impact behavior of sandwich panel using the self-healing materials is considered. The sandwich panel consists of a PVC solid foam core between Carbon fibers composite faces with lay-up (0/90)_s at the top and down structure. The thin glass tubes are filled by the self-healing materials and put among the composite layers of sandwich panel. The sandwich panel construction is made of handy lay-up, using Epoxy to bond the layers. The self-healing materials with (0.5, 1, 1.5) volume fraction are used among composite layers of sandwich panel. The destruction of sandwich panel using the self-healing materials is carried out by three point bending. After destruction, the healing will be started from zero point then 3 to 7 days have been considered to determine the effect of the self-healing materials of sandwich panel. CHARPY impact test are performed on the specimens at the mentioned time to investigate the effect of the self-healing material on the impact behavior of sandwich panel. The experimental results of CHARPY impact behavior of sandwich panel considering the self-healing materials illustrates that the most dynamic fracture toughness and healing efficiency belong to the specimen with 1.5 volume fraction after 7 days from destruction time comparing the control specimen. Using glass tubes particularly and the quantity of tubes also will be significant effect on increasing the strength of construction. By increasing the volume fraction and the time of healing, the healing efficiency of sandwich panel will be enhanced as well.

Please cite this article using:

Mirzapour, N. and Yarmohammad-Toski, M., "Experimental Investigation of Dynamic Behavior of Composite Sandwich Panel Using Self-healing Materials under CHARPY impact and 3-point Bending Destruction", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 434-442, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1- مقدمه

مواد خودترمیم دسته نسبتاً جدیدی از مواد هوشمند هستند که دارای قابلیت بازگشت کلی یا جزئی می‌باشند. خودترمیمی به عنوان قابلیت یک ماده برای ترمیم (بازیابی/ تعمیر) آسیب‌هایی بصورت خودکار و خودگردان، بدون هیچ‌گونه مداخله خارجی است [1]. بسیاری از ویژگی‌های رایج از قبیل خود تعمیری، ترمیم خودکار و تعمیر خودکار به‌عنوان مشخصات مواد بکار می‌روند. اغلب با بهره‌گیری از مشخصات خودترمیمی در مواد ساخت بشر نمی‌توان به عملکرد خودترمیمی بدون محرک خارجی دست پیدا کرد. بنابراین، خودترمیمی را می‌توان به دو بخش خودگردان (بدون هیچ‌گونه مداخله خارجی) و غیرخودگردان (نیازمند مداخله انسانی/ محرک خارجی) تقسیم کرد [2]. از آنجایی که خودترمیمی ذاتی در مواد ساخت بشر نمی‌تواند عملکرد مناسبی مانند مواد طبیعی داشته باشد، لذا بیشتر تحقیقات در زمینه خودترمیمی با محرک خارجی صورت گرفته است.

محرک خارجی می‌تواند شامل موارد مختلفی مانند تحركات فیزیکی و شیمیایی باشد. انواع مختلف پلیمرها، شامل ترموپلاستیک، ترموست و الاستومرها، قابلیت خودترمیمی یا توانایی ترمیم شدن را از خود نشان داده‌اند که توسط گرمایش ساده مواد تحت دمای ذوب (یا چسبندگی) شان و سپس سرد شدن، صورت می‌گیرد. برای موادی غیر از پلیمرها، از تزریق عامل ترمیمی برای صورت گرفتن این پدیده استفاده می‌شود. لذا تقسیم بندی پدیده خودترمیمی غیرخودگردان به صورت ترمیم بیرونی بر پایه نفوذ یک عامل ترمیم خارجی و ترمیم درونی توسط خود پلیمر انجام می‌شود.

ترمیم بیرونی بر پایه نفوذ یک عامل خارجی انجام می‌گیرد. همانطور که در شکل 1 مشاهده می‌کنید برای یک عامل ترمیم مایع، هنگامی که یک ترک در حال رشد با یکی از کپسول‌های پخش‌کننده یا الیاف شیشه‌ای توخالی مواجه می‌شود، کپسول/ الیاف دچار انفجار یا شکستگی شده و مایع روکش شده مانند مونومر به منطقه ترک‌خورده توسط نیروی موئینگی جریان می‌یابد. کاتالیست در مجاورت پلیمر شروع به یک واکنش پلیمریزاسیون درجا می‌کند که باعث به هم پیوستن ترک‌ها می‌شود. اگرچه حرارت می‌تواند باعث افزایش سرعت فرایند خودترمیمی و در نتیجه افزایش بهره‌وری خودترمیمی گردد. برای یک عامل خودترمیمی جامد، حرارت معمولاً یک عامل ضروری برای خودترمیمی به‌شمار می‌آید. برای این منظور، ابتدا باید این عامل خودترمیمی جامد ذوب گردد، به طوری که عامل خودترمیمی مذاب بتواند به حجم ناحیه شکست توسط نیروی موئینگی نفوذ و سطح شکستگی را پر کند. از آنجا که در این فرایند حرارت خارجی مورد نیاز می‌باشد، از آن به عنوان عامل خودترمیمی غیر مستقل یاد می‌شود [3].

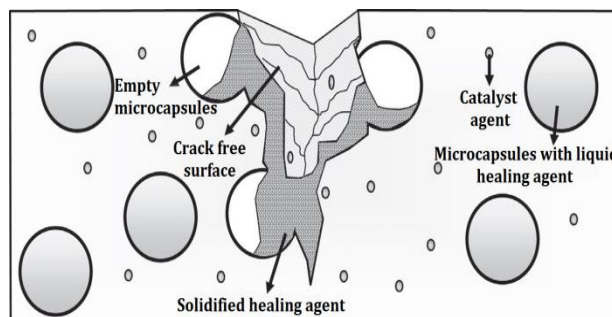


Fig. 1 Microcapsule self-healing system

شکل 1 سیستم خودترمیمی با میکروکپسول‌های جاسازی شده

مواد خودترمیم ذاتی قابلیت دستیابی به مشخصات اولیه خود پس از آسیب- دیدگی مکرر در دمای محیط را دارند. مواد خودترمیم کپسولی نیز قابلیت دستیابی به مشخصات اولیه خود را در سطح ملکولی دارند، از نظر تئوری این کار برای تعداد نامحدودی تکرار بدون هیچ ماده اضافی شیمیایی رخ خواهد داد. اگرچه، تنها آسیب‌هایی با حجم‌های کوچک می‌توانند توسط این روش ترمیم شوند زیرا ماده برای ترمیم نیازمند تماس است و به دلیل وجود سیکل‌های واکنشی این تماس کاهش پیدا کرده و امکان ترمیم مؤثر را از سیستم می‌گیرد. به‌عبارت دیگر، مواد خودترمیم آوندی قابلیت ترمیم چندگانه آسیب‌هایی با حجم‌های بزرگ را دارند زیرا عامل ترمیمی می‌تواند مکرراً در ناحیه آسیب دیده و در طول شبکه‌های فرم یافته، پخش شود. تحقیقات بر یکپارچگی شبکه آوندی نشان داد که مشخصات ماده موجود در هنگام بهینه سازی فرایند ساخت تأثیرگذار نخواهد بود [3].

پانل‌های ساندویچی از دو صفحه نازک، سخت و قوی از جنس مواد متراکم که توسط یک لایه ضخیم از موادی با دانسیته پایین که ممکن است بسیار ضعیف و نرم باشد ساخته می‌شوند. مقایسه پانل ساندویچی با کامپوزیتی که وزن هسته آن تقریباً همسان با وزن صفحات مجاور نشان می‌دهد که سختی خمشی این نوع ساختار از یک صفحه جامد با همان وزن و مواد مشابه با صفحات ساندویچ، بسیار بیشتر است [4]. یکی از دلایل رشد استفاده از ساختارهای ساندویچی بخاطر نرخ بالای سفتی خمشی به وزن این سازه است. در نتیجه، ساختارهای ساندویچی دارای تغییرشکل عرضی کم، نیروهای کمانشی بالا و فرکانس‌های طبیعی بالا نسبت به دیگر ساختارها می‌باشند. بنابراین ساختارهای ساندویچی اغلب دارای وزن سازه‌ای کمتری نسبت به دیگر ساختارها برای یک مجموعه از بارهای محیطی و مکانیکی هستند [5]. تحقیقات اولیه در زمینه پانل‌های ساندویچی به سال 1944 بر می‌گردد که مارگوتری¹ رفتار پانل‌های ساندویچی تحت بارهای فشاری درون صفحه‌ای را مورد بررسی قرار داد. خمش و کمانش صفحات ساندویچی [6,7]، بهینه‌سازی ساندویچ برای نسبت بین عمق هسته و ضخامت پوسته و طراحی و بهینه سازی صفحات کامپوزیتی با کمینه وزن [8-10]، ضربه سرعت پایین روی پانل‌های ساندویچی با هسته فوم پلی‌متاکریلیماید² (PMI) و پوسته‌هایی با الیاف کربن موجی [11-13]، فرورفتگی کوشی- استاتیک و ضربه سرعت پایین [14]، ضربه شاری، ایزود و افتادن وزنه را بر روی پانل ساندویچی با هسته فوم پلی‌اورتان و سطوح کامپوزیتی پلاستیک تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای (GFRP) از جمله تحقیقات انجام گرفته بر روی پانل‌های ساندویچی هستند.

موادی مانند پلیمرها و کامپوزیت‌ها در طول کاربری‌های عادی خود متحمل آسیب و شکست می‌شوند و برطرف کردن این آسیب در طول یک مکانیزم خودترمیم شرایط افزایش طول عمر و استحکام بسیار ماده را فراهم می‌کند. بطور ویژه‌ای مهم است که این مواد برای عمده زمان‌هایی که قابلیت تعمیر وجود ندارد طراحی شده باشند. در دهه 1970 برای اولین بار مواد خودترمیم مورد توجه قرار گرفت. بارگذاری مکانیکی موجب آسیب میکروسکوپی در مقیاس نانو می‌شود. با افزایش بار ترک‌های میکروسکوپی رشد کرده و ترک- های ماکروسکوپی ایجاد می‌شوند که سبب کاهش حد تحمل سازه و بار مفید آن‌ها می‌شود. کاملاً مشهود است که بسیاری از این آسیب‌ها می‌تواند خودترمیم شوند [15,16]. برای اولین بار استفاده از الیاف توخالی توسط

¹ Marguerre

² Poly metha crylimide

کل ظرفیت از دست رفته سازه لازم می‌باشد، که سرانجام می‌تواند افزایش طول عمر سازه‌ها را موجب شود. از این‌رو، تعمیر یا خودترمیمی تنها یک راه منغل بهبود سازه نیست؛ این امر می‌تواند بطور فعال عمر سازه را توسط تعمیر یا مرمت در زمان و مکان مناسب مدیریت کند [31، 32].

همانطور که ملاحظه شد، سازه‌های ساندویچی در معرض آسیب‌های ضربه‌ای در طول عمر خود هستند. همچنین مقاومت به ضربه و حد تحمل سازه ساندویچی همواره به عنوان یک موضوع مهم مورد بررسی بوده است. لذا در این تحقیق رفتار پانل ساندویچی کامپوزیتی تقویت شده با مواد خودترمیم مورد ملاحظه قرار می‌گیرد. آنچه این تحقیق را نسبت به دیگر کارهای انجام شده در این زمینه متمایز می‌سازد شامل دو بخش اساسی می‌گردد.

- استفاده از لوله‌های شیشه‌ای پر شده از مواد خودترمیم در بین لایه‌های کامپوزیتی پانل ساندویچی.

- استفاده از آزمون ضربه شارپی برای بررسی رفتار پانل ساندویچی کامپوزیتی خودترمیم شونده.

در این تحقیق از نمونه‌های پانل ساندویچی کامپوزیتی خودترمیم شونده در ابعاد استاندارد آزمون ضربه شارپی استفاده شده است. نمونه‌ها در سه کسر حجمی 0.5، 1 و 1.5 درصد از مواد خودترمیم ساخته شده‌اند. همچنین متغیرهای بکاررفته شامل دو پارامتر اصلی کسر حجمی و زمان می‌باشند.

2- روش ساخت

نمونه‌های پانل ساندویچی کامپوزیتی خودترمیم شونده با هسته جامد PVC و پوسته کامپوزیتی کربن/اپوکسی با لایه‌چینی دستی متقارن (90/0) در ابعاد 80×10×8 میلی‌متر مکعب ساخته شده است. مواد خودترمیم نمونه‌ها در سه کسر حجمی 0.5 درصد (2 جفت لوله)، 1 درصد (4 جفت لوله) و 1.5 درصد (6 جفت لوله) در بین لایه‌های کامپوزیت مطابق با شکل 2 بکار گرفته شده‌اند. به منظور ساخت زمینه کامپوزیتی پانل ساندویچی کربن/اپوکسی خودترمیم شونده از رزین اپوکسی اپوکیت⁹ 828 و هاردنر مربوطه استفاده شده است. ساختار رزین مورد نظر بر پایه ترکیب پلیمری بیسفنول ای¹⁰ بوده و از ترکیب آن با یک هاردنر اپیکلروهیدرین¹¹، محصول نهایی حاصل می‌شود. به منظور ساخت بخش کامپوزیتی پانل ساندویچی از پارچه کربن تک جهت 230 گرمی (230 گرم بر مترمربع) استفاده شده است. در هر پوسته کامپوزیتی پانل ساندویچی که در دو سمت هسته قرار می‌گیرد از چهار پارچه کربن با لایه‌چینی (0/90/90/0) ساخته شده است. به منظور ساخت بخش خودترمیم شونده نمونه‌ها نیز از لوله‌های موئین شیشه‌ای استفاده شده است. این لوله‌ها از جنس شیشه پیرکس هستند. لوله‌های موئین در کارگاه شیشه‌گری ساخته شده و دارای قطر خارجی بین 300 تا 400 میکرومتر هستند. فوم میانی پانل ساندویچی نیز از جنس پلی‌ونیل-کلراید (PVC) با ضخامت 5 میلی‌متر بکار گرفته شده است. لازم به ذکر است که مواد خودترمیم بکاررفته در لوله‌های موئین شیشه‌ای نیز بصورت یک لوله رزین و یک لوله هاردنر است که در نهایت بصورت زوج لوله به یکدیگر متصل و در بین لایه‌های کامپوزیتی پانل ساندویچی قرار می‌گیرد.

درای¹ و همکارانش جهت افزایش قابلیت تکرار ترمیم به کار گرفته شد و موفقیت محدودی حاصل شد [17-19]. بعدها ماتوکو² و همکارانش الیاف توخالی با قطر بالا را مورد استفاده قرار دادند که آن‌ها هم ناموفق بودند. بعد از آن بلی³ و همکارانش الیافی با قطر کمتر را استفاده کردند که در این سیستم به علت ویسکوزیته بالای رزین، ترک توسط رزین پر نشده و عمل خودگیری به خوبی صورت نمی‌گرفت [20]. باند⁴ و همکارانش فرآیند تولید الیاف توخالی را برای تولید الیاف توخالی بهینه توسعه دادند [21، 22]. در نهایت کامپوزیت خودترمیم شونده با استفاده از الیاف توخالی شیشه‌ای ابداع شده توسط براون⁵ و همکارانش در سال 2003، نسبت به کامپوزیت حاوی میکروکپسول‌های تولید شده توسط هوکر⁶ و همکارانش در سال 2002 از خواص ترمیم‌شوندگی برتری برخوردار بود [23]. علیرغم وجود مشکلاتی در مسیر ساخت کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف توخالی، با توجه به مزایای الیاف توخالی، تولید و توسعه کامپوزیت‌های حاوی الیاف تو خالی مورد توجه بسیاری از محققین و دانشمندان قرار گرفته است. در سال 2008 ویلیامز⁷ و همکارانش تحقیقی در مورد اثر ضربه بر روی استحکام فشاری پانل ساندویچی انجام دادند. آن‌ها از هسته‌های ساندویچی آوندی که توسط پیوند لوله‌های سیلیکونی در کانال‌های پلی‌متاکریلیماید بکاررفته، استفاده کردند. از ایجاد سوراخ‌های ریز به منظور شکل‌دهی کانال‌های عمودی استفاده شد [24]. نادمی و همکاران در سال 2011 طراحی و ساخت یک سیستم کامپوزیتی خودترمیم با استفاده از میکروکپسول‌های شیشه‌ای را مورد ملاحظه قرار دادند که در این تحقیق مشخص شد میزان زیادی از استحکام خمشی از دست‌رفته حین وقوع خرابی در قطعه، با وجود سیستم خودترمیمی در قطعه بازگردانده می‌شود [25]. در سال 2013 عرب و شکوه‌فر شیشه‌سازی دینامیکی مولکولی پلیمر پیوند متقاطع اوره-فرمالدئید برای نانوکامپوزیت‌های خودترمیم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این شیشه‌سازی نشان داد که رشد قابل ملاحظه‌ای در خصوصیات پلیمر پیوند متقاطع بوجود می‌آید [26]. لی و شجاعی⁸ در سال 2013 سیستم خودترمیم زیست‌القایی را پیشنهاد کردند که الیاف SMP به عنوان عامل عایق ترک و ذرات ترموپلاستیک (TPS) نیز به عنوان عامل ترمیمی جامد استفاده شوند [27].

سازه‌ها به منظور پیشگیری از شکست نابهنگام طراحی می‌شوند که برای این هدف می‌توان به بکارگیری ضریب اطمینان بزرگ‌تر از 1 اشاره کرد، اما در هر حال شکست‌های نابهنگام تحت بارگذاری‌های تصادفی، آسیب‌های محیطی، خطاهای طراحی، عیوب ساخت و نواقص نگهداری رخ خواهند داد. سازه‌های ساندویچی در معرض خطر ضربه در محدوده وسیعی از شکل‌ها، اندازه‌ها و سرعت‌ها در طول دوران عمر خود می‌باشد. در ضربات به دلیل آنکه آسیب‌های ایجاد شده به سختی قابل تشخیص است، به‌عنوان بدترین شرایط کاری در نظر گرفته می‌شود. پس از ضربه امکان دارد، کاهش چشمگیری در عملکرد مکانیکی رخ دهد. علاوه بر این، آسیب و تغییر شکل پایدار سازه‌های ساندویچی معمولاً در هنگام برخورد اجسام خارجی رخ می‌دهد [29، 30]. بنابراین، نگهداری پیشگیرانه توسط نظارت فعال (تعمیر) برای بهبود بخش یا

¹ Dry
² Motuku
³ Bley
⁴ Bond
⁵ Brown
⁶ Hucker
⁷ Williams
⁸ Li and Shojaei

⁹ EPOKITE 828
¹⁰ Bisphenol A
¹¹ Epi chlorohydrin



Fig. 3 Damaged specimen using for CHARPY impact test

شکل 3 نمونه تخریب شده آماده آزمون ضربه شاری و 6 جفت لوله خودترمیم 0.5، 1 و 1.5 درصد می باشد. همچنین در مورد متغیر زمان نیز حالت های مختلفی مورد بررسی قرار گرفت تا یک برنامه زمان بندی مناسب بدست آمد. طی آزمون های انجام گرفته مشخص گردید که بهترین زمان برای اثرگذاری مواد خودترمیم با در نظر گرفتن میزان کسر حجمی شان در فواصل زمانی صفر، سه و هفت روز از زمان تخریب می باشد.

4- نتایج

در جداول مربوط به نتایج ملاحظه خواهید نمود که از چقرمگی شکست دینامیکی طبق رابطه (1) استفاده شده است [32].

$$\alpha_k = \frac{\Delta E}{(w \times h)} \quad (1)$$

که در آن α_k چقرمگی شکست دینامیکی برحسب کیلوژول بر مترمربع، ΔE انرژی جذب شده و w و h به ترتیب عرض و ضخامت نمونه می باشند. علت استفاده از این پارامتر، بررسی رفتار دینامیکی پانل ساندویچی بوده و علاوه بر آن با توجه به کارهای انجام شده در این زمینه، پانل های ساندویچی انرژی ضربه پائینی را با توجه به نوع ساختارشان نسبت به آزمون ضربه افتادن وزنه دارند. در حالی که به دلیل سطح مقطع کوچکی که این نوع آزمون نسبت به آزمون ضربه افتادن وزنه دارد، چقرمگی شکست پانل های ساندویچی به میزان قابل توجهی بیشتر می گردد. همچنین با توجه به سوابق کارهای انجام شده در زمینه آزمون ضربه شاری و متغیرهای ذکر شده از نمودارهای چقرمگی شکست دینامیکی نسبت به زمان و کسر حجمی برای بررسی رفتار سازه ساندویچی خودترمیم شونده استفاده شده است. لذا به منظور محاسبه بازدهی اثرگذاری ترمیم از رابطه ی (2) استفاده می شود [33].

$$\eta = \frac{f_H - f_D}{f_T - f_D} \times 100 \quad (2)$$

که در رابطه ی (2)، f پارامتر مورد بررسی که در اینجا همان انرژی جذب شده می باشد و پانویس های H، D و T به ترتیب مربوط به نمونه های ترمیم شده، تخریب شده صفر روز و اولیه بدون تخریب (شاهد) می باشد.

4-1- نمونه شاهد

نمونه های شاهد، فاقد لوله های شیشه ای پر شده از مواد خودترمیم می باشند. این نمونه ها در دو سری مورد بررسی قرار گرفته اند. در یک سری نمونه دچار هیچ گونه تخریبی نشده و تنها آزمون ضربه شاری بر روی آن انجام گرفته است. اما در سری دیگر ابتدا نمونه به میزان تقریبی 1.5 میلی متر تحت آزمون خمش سه نقطه ای قرار گرفته و سپس آزمون ضربه شاری بر روی آن انجام شده است. شکل 4 نمونه های شاهد تحت آزمون ضربه را نشان می دهد. نمونه بالایی که پس از شکست هنوز بهم چسبیده اند مربوط به حالت بدون

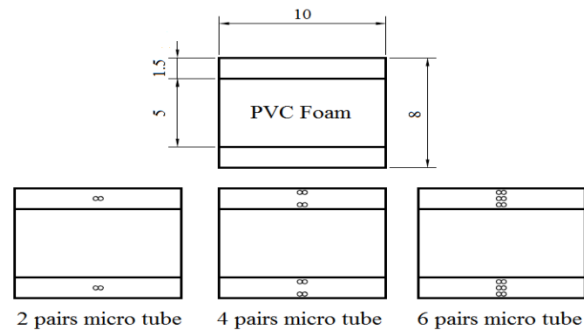


Fig. 2 Schematic of sandwich panels with self-healing micro tube

شکل 2 شماتیکی از نمونه های پانل ساندویچی با لوله های موئین شیشه ای

3- طراحی آزمون

از آنرو که هدف اصلی در این تحقیق بررسی چگونگی اثرگذاری مواد خودترمیم در بهبود رفتار سازه های ساندویچی که تحت ضربه شاری قرار گرفته اند، می باشد. لذا می بایست تمهیدی اندیشید تا مواد خودترمیم پیش از آنکه نمونه تحت ضربه شاری قرار گیرد، از داخل لوله های پر شده خارج گشته تا در مشخصات مکانیکی کامپوزیت های سازه ساندویچی تغییرات لازم را ایجاد نماید.

این رخداد که پیش از ضربه شاری مواد خودترمیم از داخل لوله ها خارج گردند را می توان از دو منظر که در ذیل به آن اشاره می شود، مورد بررسی قرار داد.

- حجم مواد خودترمیم تقویت کننده کامپوزیت سازه ساندویچی.
- مدت زمان اثرگذاری مواد خودترمیم تقویت کننده کامپوزیت سازه ساندویچی.

به این منظور روند انجام آزمون بدین صورت طرح ریزی گردید که برای خارج کردن مواد خودترمیم از داخل لوله ها، نمونه ها دچار تخریب قرار گیرند. برای آنکه این تخریب بطور کنترل شده صورت گرفته تا کمترین آسیب را به نمونه ها وارد نماید و فقط موجب شود تا لوله ها شکسته و مواد خودترمیم به داخل کامپوزیت نشت گردد، از آزمون خمش سه نقطه ای که در ادامه به تشریح آن پرداخته شده، استفاده می گردد. تخریب نمونه های خودترمیم شونده با آزمون خمش سه نقطه ای مطابق با استاندارد ASTM D790 انجام می شود. به منظور کنترل فرایند تخریب سرعت حرکت دماغه بارگذاری 0.5 میلی متر بر دقیقه در نظر گرفته می شود. فرایند تخریب بدین صورت است که نمونه با سرعت فوق تحت خمش سه نقطه ای قرار گرفته و پس از خم شدن تا حدود 2 الی 2.5 میلی متر، بدون اینکه آسیبی به چسب ناحیه اتصال وارد شود (محدوده تغییر شکل الاستیک چسب)، صدای شکستن لوله های حاوی مواد خودترمیم شونده به گوش می رسد. بلافاصله پس از شکستن لوله های موئین، دستگاه متوقف می شود. پس از باربرداری از روی نمونه، نمونه به حالت اولیه خود بازگشته و وارد دوره ترمیم می شود. در شکل 3 یک نمونه تخریب شده و آماده آزمون ضربه شاری را مشاهده می نمایید. آزمون ضربه شاری که در این تحقیق به عنوان هدف اصلی در بررسی رفتار پانل ساندویچی کربن/اپوکسی خودترمیم شونده است، براساس استاندارد EN ISO 179-1 که مربوط به آزمون ضربه شاری برای مواد پلاستیکی می باشد، انجام شده است.

همانطور که ذکر شد سه سری نمونه برای انجام آزمون در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است که با توجه به ابعاد نمونه ها میزان کسر حجمی آنها به ترتیب برای نمونه هایی با 2 جفت لوله خودترمیم، 4 جفت لوله خودترمیم



Fig. 5 Sandwich panel specimens with 2 pairs of self-healing micro tube after CHARPY impact test

شکل 5 نمونه‌های خودترمیم شونده با 2 جفت لوله پس از آزمون ضربه شاری

4-3- نمونه خودترمیم شونده با 4 جفت لوله

همانند حالت قبل پس از گذشت زمان‌های صفر، سه و هفت روز از آسیب دیدگی در دمای محیط، نمونه‌ها تحت آزمون ضربه شاری قرار می‌گیرند. در جدول 2 میزان تغییرات چقرمگی شکست دینامیکی نمونه در فواصل زمانی معین و در شکل 6 تعدادی از نمونه‌های شکسته شده از این سری را پس از آزمون ضربه شاری ملاحظه می‌نمایید. بر اساس آنچه در جدول 2 مشاهده می‌نمایید، چقرمگی شکست دینامیکی مطابق انتظار با گذشت زمان افزایش یافته است. با مقایسه نتایج بدست آمده برای نمونه‌های صفر روز و شاهد با تخریب که هر دو از نظر زمان آزمون ضربه در شرایط یکسانی قرار دارند، ملاحظه می‌شود که قابلیت چقرمگی شکست دینامیکی سازه ساندویچی به میزان 29 درصد رشد داشته است. در این مقایسه به وضوح می‌توان نقش کسر حجمی را در افزایش چقرمگی شکست دینامیکی نمونه مشاهده کرد. زیرا در مدت زمان صفر روز پس از تخریب، ماده خودترمیم در محل آسیب منتشر نشده و هیچ‌گونه نقشی در بالا بردن جذب انرژی نخواهد داشت و این رشد تنها به واسطه وجود 4 جفت لوله شیشه‌ای در کامپوزیت می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که از زمان صفر تا هفت روز پس از تخریب چقرمگی شکست دینامیکی در نمونه‌ها به میزان 21 درصد رشد داشته است. همچنین کسر حجمی از مواد خودترمیم در مدت زمان کوتاهی پس از تخریب بازدهی مناسبی نداشته و برای زمان‌های طولانی‌تر (هفت روز) بهبودی بیشتری را از خود به نمایش می‌گذارند.



Fig. 6 Sandwich panel specimens with 4 pairs of self-healing micro tube after CHARPY impact test

شکل 6 نمونه‌های خودترمیم شونده با 4 جفت لوله پس از آزمون ضربه شاری



Fig. 4 Sandwich panel specimens without self-healing materials (tester) after CHARPY impact test

شکل 4 نمونه‌های فاقد مواد خودترمیم (شاهد) پس از آزمون ضربه شاری

تخریب می‌باشد و نمونه پایینی که از هم جدا شده‌اند مربوط به حالت تخریب شده است. نتایج بدست آمده از آزمون ضربه شاری برای نمونه شاهد بدون تخریب میزان چقرمگی شکست دینامیکی را 41.83 کیلوژول بر مترمربع و برای نمونه شاهد با تخریب نیز 19.38 کیلوژول بر مترمربع نشان می‌دهد.

4-2- نمونه خودترمیم شونده با 2 جفت لوله

پس از گذشت زمان‌های صفر، سه و هفت روز از آسیب‌دیدگی در دمای محیط، نمونه‌ها تحت آزمون ضربه شاری قرار می‌گیرند. در جدول 1 میزان تغییرات چقرمگی شکست دینامیکی نمونه‌ها در فواصل زمانی معین را مشاهده می‌نمایید. از مشاهده نتایج جدول 1 ملاحظه می‌شود که نسبت چقرمگی شکست دینامیکی با گذشت زمان افزایش یافته است. با مقایسه نتایج بدست آمده برای نمونه‌های صفر روز و شاهد با تخریب که هر دو از نظر زمان آزمون ضربه در شرایط یکسانی (آزمون ضربه در همان روز تخریب) قرار دارند، مشاهده می‌شود که میزان چقرمگی شکست دینامیکی کمتر شده است. به این ترتیب می‌توان دریافت که کسر حجمی لوله‌های شیشه‌ای در این سری از نمونه‌ها باعث بالا رفتن چقرمگی شکست دینامیکی نشده است. حتی این اتفاق در نمونه سه روزه نیز دیده می‌شود. پس با مقایسه همین دو حالت می‌توان گفت که در این سری از نمونه‌ها لوله‌های شیشه‌ای تأثیر چندانی بر روی جذب انرژی سازه نداشته و تنها مواد خودترمیم هستند که باعث رشد انرژی جذب شده گردیده‌اند. همچنین نتایج بدست آمده نشان از رشد 60 درصدی بهبود چقرمگی شکست دینامیکی در مدت زمان صفر تا هفت روز را دارد. علاوه بر این نتایج بیان‌کننده بهبودی قابل قبول در مدت زمان‌های کوتاه (سه روز) در این سری از نمونه‌ها می‌باشد که برابر با 28.6 درصد است. در شکل 5 تعدادی از نمونه‌های شکسته شده از نمونه‌های خودترمیم شونده با 2 جفت لوله را پس از آزمون ضربه شاری ملاحظه می‌نمایید.

جدول 1 نتایج آزمون ضربه شاری نمونه خودترمیم شونده با 2 جفت لوله

Table 1 CHARPY impact result of sandwich panel specimens with 2 pairs of self-healing micro tube

زمان ترمیم	صفر روز	سه روز	هفت روز	شاهد	شاهد بدون تخریب
چقرمگی شکست دینامیکی (kJ/m ²)	13.89	17.86	22.22	41.83	19.38

4-5- مقایسه اثربخشی ترمیم نمونه‌های خودترمیم شونده و نمونه شاهد

اکنون پس از بررسی رفتار سازه ساندویچی خودترمیم شونده در مقایسه با نمونه بدون خودترمیمی تخریب شده، به چگونگی رفتار این نمونه‌ها با یکدیگر پرداخته و جنبه‌های مختلف آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا مطابق شکل 8 به مقایسه نمودارهای نیرو- تغییر مکان سه حالت نمونه خودترمیم شونده و نمونه شاهد که در هنگام تخریب نمونه‌ها بدست آمده پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که به دلیل تعدد نمونه‌های آزمایش شده (سه نمونه برای هر حالت)، نمودار بدست آمده میانگینی از نمونه‌های هر حالت می‌باشد. بیشترین نیروی وارده به نمونه‌های 6 جفت لوله و برابر 1060 نیوتن می‌باشد، این مقدار برای نمونه‌های 4 جفت لوله 985 نیوتن و نمونه‌های 2 جفت لوله 930 نیوتن می‌باشد. همچنین بیشترین نیرویی که نمونه شاهد تحمل کرده برابر 325 نیوتن می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لوله‌های شیشه‌ای استحکام نمونه‌ها نیز بطور نسبتاً قابل توجهی رشد داشته است.

از مقایسه نمونه‌های خود ترمیم مختلف می‌توان نتیجه گرفت که با تغییر کسر حجمی و پیش از انتشار مواد خودترمیم در ناحیه آسیب‌دیده و تأثیر آن بر روی رفتار سازه، می‌توان استحکام فشاری و کششی سازه ساندویچی را افزایش داد. همچنین با مقایسه نمودارهای بدست آمده از نمونه‌های خودترمیم شونده با نمودار نمونه بدون خودترمیم می‌توان افزایش چشم‌گیر استحکام سازه ساندویچی را با اضافه شدن لوله‌های شیشه‌ای به سازه مشاهده کرد. همانطور که در شکل 8 ملاحظه می‌شود نمونه شاهد به میزان تقریبی 1.5 میلی‌متر و نمونه‌های حاوی مواد خودترمیم به میزان تقریبی 2.5 میلی-متر تغییر شکل داشته‌اند. مطابق شکل 8، پس از تغییر شکل‌های مذکور منحنی بصورت خط صاف درآمده و پس از اندکی تحمل بار دچار شکست می‌گردد. دلیل اصلی این اختلاف وجود لوله‌های مویین شیشه‌ای است که در نمونه‌های حاوی مواد خودترمیم قرار دارد و موجب می‌شود تا میزان تغییر شکل این نمونه‌ها با نمونه فاقد مواد خودترمیم (شاهد) متفاوت باشد.

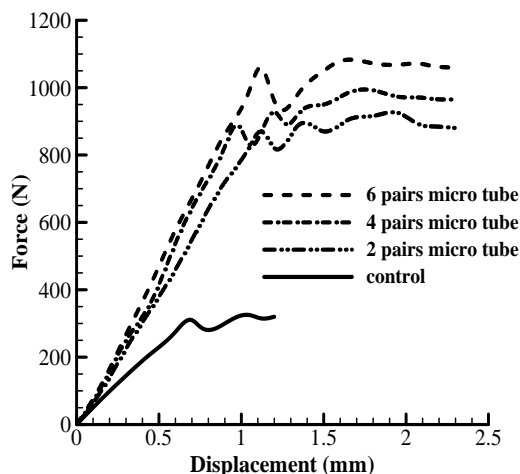


Fig. 8 Comparative force-displacement curves under 3 point bend for 2, 4, 6 pairs self-healing micro tube and damaged (control) specimen

شکل 8 نسبت نیرو- تغییر مکان نمونه‌های خودترمیم شونده با 2، 4 و 6 جفت لوله و شاهد تخریب شده

جدول 2 نتایج آزمون ضربه شاریبی نمونه خودترمیم شونده با 4 جفت لوله

Table 2 CHARPY impact result of sandwich panel specimens with 4 pairs of self-healing micro tube

زمان ترمیم	صفر روز	سه روز	هفت روز	شاهد	شاهد بدون تخریب
چقرمگی شکست	25.00	26.10	30.26	41.83	19.38
دینامیکی (kJ/m ²)					

4-4- نمونه خودترمیم شونده با 6 جفت لوله

در این حالت نیز مانند نمونه‌های خود ترمیم‌شونده با 2 و 4 جفت لوله، پس از گذشت زمان‌های صفر، سه و هفت روز از آسیب دیدگی در دمای محیط، نمونه‌ها تحت آزمون ضربه شاریبی قرار می‌گیرند. در جدول 3 میزان تغییرات چقرمگی شکست دینامیکی نمونه در فواصل زمانی معین و در شکل 7 تعدادی از نمونه‌های شکسته شده از این سری را پس از آزمون ضربه شاریبی مشاهده می‌نمایید. بر اساس نتایج جدول 3، چقرمگی شکست دینامیکی این-بار هم مطابق انتظار با گذشت زمان رو به افزایش است. در این حالت نیز مقایسه نتایج بدست آمده برای نمونه‌های صفر روز و شاهد با تخریب که هر دو از نظر زمان آزمون ضربه در شرایط یکسانی قرار دارند، نشان می‌دهد که چقرمگی شکست دینامیکی سازه ساندویچی دارای رشدی به میزان 51 درصد بوده است. در اینجا نیز به وضوح می‌توان نقش کسر حجمی لوله‌های شیشه‌ای را در افزایش چقرمگی شکست دینامیکی نمونه مشاهده کرد. همچنین در مواد خودترمیم شونده با 6 جفت لوله، نتایج نشان می‌دهد که میزان رشد بهبودی آسیب در مدت زمان صفر تا هفت روز 39.3 درصد می-باشد. این میزان رشد برای مدت زمان صفر تا سه روز 20.7 درصد است که بهبودی مناسبی را نشان می‌دهد.

جدول 3 نتایج آزمون ضربه شاریبی نمونه خودترمیم شونده با 6 جفت لوله

Table 3 CHARPY impact result of sandwich panel specimens with 6 pairs of self-healing micro tube

زمان ترمیم	صفر روز	سه روز	هفت روز	شاهد	شاهد بدون تخریب
چقرمگی شکست	29.26	25.33	40.76	41.83	19.38
دینامیکی (kJ/m ²)					



Fig. 7 Sandwich panel specimens with 6 pairs of self-healing micro tube after CHARPY impact test

شکل 7 نمونه‌های خودترمیم شونده با 6 جفت لوله پس از آزمون ضربه شاریبی

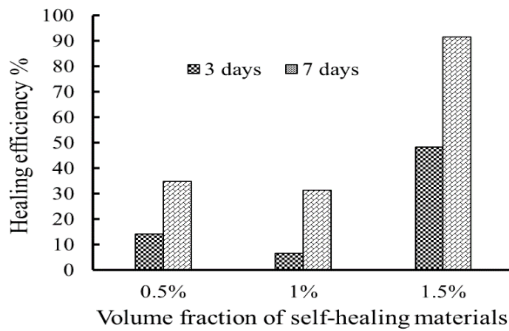


Fig. 10 Healing efficiency of 2, 4 and 6 pairs self-healing micro tube specimens

شکل 10 بازدهی ترمیم نمونه‌های خودترمیم شونده با 2، 4 و 6 جفت لوله



Fig. 11 Specimens after CHARPY impact test: 1st row 2 pairs micro tube, 2nd row 4 pairs micro tube, right of 3rd row 6 pairs micro tube and left 3rd row undamaged (control)

شکل 11 نمونه‌های شکسته شده: ردیف اول 2 جفت لوله، ردیف دوم 4 جفت لوله،

ردیف سوم راست 6 جفت لوله و ردیف سوم چپ شاهد بدون تخریب

در اثر تخریب نمونه و ایجاد ترک در پوسته کامپوزیتی پانل ساندویچی استحکام سازه بدون مواد خودترمیم کاهش یافته و سازه با کمترین مقاومتی دچار شکست می‌شود. اما هنگامی که لوله‌های شیشه‌ای در بین لایه‌های پوسته کامپوزیتی پانل ساندویچی قرار می‌گیرند، علاوه بر آن که پس از تخریب باعث نفوذ در ناحیه آسیب دیده شده و باعث ترمیم ترک می‌گردند اما این لوله‌ها ایجاد ناهمگنی در بین لایه‌های پوسته‌ی کامپوزیت را نیز موجب شده که باعث کاهش استحکام پانل ساندویچی می‌شود.

با توجه به موارد ذکر شده سطوح شکست نمونه‌ها در حالت‌های مختلف تغییر می‌کند. با مقایسه سطح شکست نمونه‌های شاهد با نمونه‌های ترمیم شده مشاهده می‌شود که مطابق با نتایج بدست آمده بویژه آنچه درباره بازدهی ترمیم به آن اشاره شد. نمونه‌های شاهد بدون تخریب با نمونه‌های 6 جفت لوله که دارای کسر حجمی 1.5 درصد می‌باشد شباهت بیشتری دارد. با آنکه در این حالت میزان ناهمگنی در پوسته کامپوزیتی بیشتر از دیگر نمونه‌ها است اما میزان ترمیم و اثرگذاری آن بر رفتار شکست پانل ساندویچی

در نگاه دیگری از نتایج بدست آمده برای میزان چقرمگی شکست دینامیکی نمونه‌ها در مدت زمان صفر روز نسبت به نمونه شاهد تخریب شده شکل 9 با در نظر گرفتن این مطلب که در این حالت هیچ‌گونه ترمیمی توسط مواد خودترمیم صورت نپذیرفته است، می‌توان گفت با آنکه رشد چقرمگی شکست دینامیکی بیشتر در نمونه 6 جفت لوله به میزان 29.26 کیلوژول بر مترمربع و 1.5 برابر نمونه شاهد تخریب شده به میزان 19.38 کیلوژول بر مترمربع اتفاق افتاده است اما با توجه به نزدیکی این نرخ رشد به نمونه 4 جفت لوله که برابر با 25 کیلوژول بر مترمربع و 1.3 برابر نمونه شاهد است، استفاده از حالت 4 جفت لوله نسبت به شش جفت لوله مناسب‌تر می‌باشد. اگر این مقایسه به زمان تعمیر داده شود (هفت روز پس از تخریب)، مطابق با شکل 9 مشاهده می‌شود که نمونه 6 جفت لوله با 40.76 کیلوژول بر مترمربع در مقایسه با نمونه شاهد با تخریب، کمی بیش از 2 برابر افزایش را در چقرمگی شکست دینامیکی نشان می‌دهد. اما نمونه 4 جفت لوله با 30.26 کیلوژول بر مترمربع در این مدت زمان تنها به میزان 1.5 برابر رشد چقرمگی شکست دینامیکی را نسبت به نمونه شاهد از خود نشان می‌دهد.

در نهایت با استفاده از نتایج بدست آمده در جداول 1 تا 3 و رابطه 2 میزان بازدهی ترمیم را بدست آورده می‌شود. همانطور که در شکل 10 مشاهده می‌نمایید، بیشترین بازدهی مربوط به نمونه 6 جفت لوله در مدت زمان هفت روز به میزان 91.5 درصد می‌باشد. علاوه بر آن برای مدت زمان کمتر یعنی سه روز نیز نمونه‌های شش جفت لوله که دارای کسر حجمی 1.5 درصد می‌باشند، اختلاف چشمگیری نسبت به دیگر نمونه‌های بکاررفته در این تحقیق دارند. لذا برای مدت زمان طولانی‌تر، نمونه 6 جفت لوله گزینه مناسب‌تری در مقایسه با دیگر نمونه‌هاست.

4-6- بررسی سطوح شکست نمونه‌ها

با افزایش تعداد لوله‌های شیشه‌ای پر شده از مواد خودترمیم نوع شکست نمونه‌ها نیز با یکدیگر متفاوت شده است. شکل 11 سطح شکست نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که قابل پیش‌بینی بود، با افزایش تعداد لوله‌ها و همچنین توزیع شان در بین تمامی لایه‌ها (در حالت شش جفت لوله) قابلیت جذب انرژی سازه ساندویچی دچار تغییر شده است.

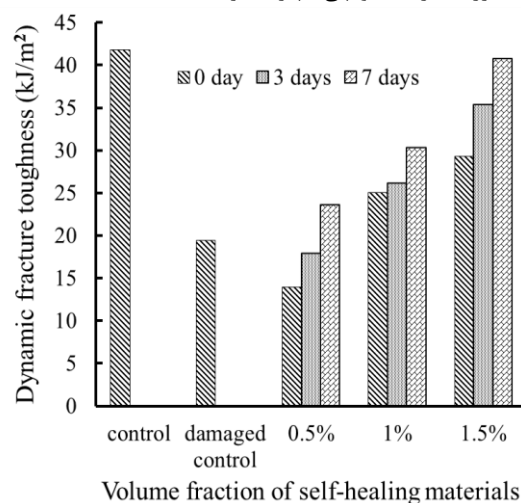


Fig. 9 Dynamic fracture toughness of 2, 4, 6 pairs self-healing micro tube and damaged (control) specimens

شکل 9 چقرمگی شکست دینامیکی نمونه‌های خودترمیم شونده با 2، 4 و 6 جفت لوله و نمونه شاهد

- [5] Vinson, J. R., "Sandwich structure", Appl Mech Rev. Vol. 54, No. 3, 2001.
- [6] Hoff, N. J., "Bending and buckling of rectangular sandwich plates", NACA TN 2225, 1950.
- [7] Marguerre, K., "The optimum buckling load of a flexibly supported plate composed of two sheets joined by a light weight filler when under longitudinal compression", Deutsche Vierteljahrsschrift fur Literaturwissenschaft und Giests Geschichte. DVL (ZWB UM1360/2), 1944.
- [8] Raville, M. E., "Deflection and stresses in a uniformly loaded, Simply supported rectangular sandwich plate", FPL Report 1847, 1955.
- [9] Bijlaard, P. P., "Analysis of elastic and plastic stability of sandwich plates by the method of split rigidities" J Aeronaut Sci, pp. 1-3, 1952.
- [10] Kaechele, L. E., "Minimum weight design of sandwich panels" USAF Project Rand Research Memorandum, RM 1895, AD-133011, 1957.
- [11] Abrate, S., "Impact on composite structures", Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [12] Nettles, A. T., Douglas, M. J., "A comparison of quasi-static testing to low velocity impact testing". In: A. Zureick, A. T. Nettles, Editors. Composites materials: testing, design, and acceptance criteria, ASTM STP 1416. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials International; pp. 116-30, 2002.
- [13] Flores-Johnson, E. A., "Quasi-static indentation and low velocity impact on polymeric foams and CFRP sandwich panels with polymeric foam cores". PhD thesis. School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, The University of Manchester, 2009.
- [14] Lolive, E., Berthelot, J.-M., "Non-linear behaviour of foam cores and sandwich materials, part 2: indentation and three-point bending" J Sandw Struct Mater, 4(4), pp. 297-352, 2002.
- [15] Wool, R. P., "Polymer interfaces: Structure and strength", New York: Hanser Press, 1995.
- [16] Wool, R. P., "Material response and reversible cracks in viscoelastic polymers" Polymer Engineering Science, 18(14), pp. 1056-1061, 1978.
- [17] C. Dry, Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials, *Composites Structures*, Vol. 35, pp. 263-269, 1996.
- [18] Sigdell, E. j., "Clinical Dialysis", Technomic Publishing Company, 1995.
- [19] Stallcup, M., SBIR Program Demonstrated Feasibility of Producing Hollow Isotropic Carbon Fiber, 2001.
- [20] Pezzoti, W., Muller, G., "Strengthening Mechanical in Al2O3-SiC Nano composite" *Comp-utational Material Science*, 22. p.156, 2001.
- [21] Rohatgi, P. K., "Self-healing metals and alloys including structural alloys and self-healing solders", U. S. Patent, No. US /0033721 A1, 2011.
- [22] Dry, C., "Adhesive Liquid Core Optical Fibers for Crack Detection and Repairs in Polymer and Concrete Matrices in Smart Structures and Materials" *Smart Sensing, Processing and Instrumentation*, Proceedings SPIE 2444, W. B. Spillman, Editor, pp. 410413, 1995.
- [23] Edvardsen, C., "Water permeability and autogenously healing of cracks in concrete" *ACI Materials Journal*, 96, pp. 448-454, 1999.
- [24] Williams, H. R., Trask, R. S., Bond, I. P., "Self-healing sandwich panels: Restoration of compressive strength after impact" *Composites Science and Technology*, 68, pp. 3171-3177, 2008.
- [25] Nademi, M., Zamani, J., Mozafari, A., "Design and construction of self-healing composite system using glass microcapsules" 18th Annual international conference of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, ISME 2010. (in Persian فارسی)
- [26] Arab, B., Shokuhfar, A., "Molecular dynamics simulation of cross-linked urea-formaldehyde polymers for self-healing nanocomposites: prediction of mechanical properties and glass transition temperature" *Journal of Molecular Modeling*, Vol. 19, pp. 5053-5062, 2013.

به گونه‌ای است که علاوه بر چقرمگی شکست دینامیکی بسیار نزدیک به نمونه شاهد بدون تخریب از نظر سطح شکست نیز بسیار نزدیکتر از دو نمونه دیگر می‌باشد. این نتیجه نیز خود برهانی بر اثبات بهینه بودن و نزدیک بودن رفتار نمونه‌های 6 جفت لوله با نمونه شاهد تخریب نشده و فاقد مواد خودترمیم می‌باشد.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نمونه‌های پانل ساندویچی کامپوزیتی کربن/ اپوکسی خودترمیم شونده در ابعادی مطابق با استاندارد آزمون ضربه شاریبی ساخته شد. پوسته کامپوزیتی با لایه‌چینی دستی متقارن (90/0) و رزین اپوکسی 828 ساخته شد. با توجه به اهداف مورد نظر در این تحقیق نمونه‌ها در سه حالت با کسر حجمی 0.5 درصد (2 جفت لوله)، 1 درصد (4 جفت لوله) و 1.5 درصد (6 جفت لوله) از مواد خودترمیم که ترکیبی از رزین اپوکسی و هاردنر اپیکلروهیدرینی می‌باشد، ساخته شده است. پس از تخریب نمونه‌ها توسط آزمون خمش سه نقطه‌ای، آزمون ضربه شاریبی با توجه به مشخصات مواد خودترمیم در سه مدت زمان صفر، سه و هفت روز از زمان تخریب انجام گرفت. در نهایت نتایج بدست آمده از این آزمایش‌ها با نمونه بدون مواد خودترمیم (شاهد) با تخریب و بدون تخریب مقایسه شد، که شرح آن در ذیل می‌آید.

- بکارگیری لوله‌های شیشه‌ای خود به تنهایی موجب افزایش استحکام پانل ساندویچی در مقایسه با نمونه شاهد می‌شود.

- تعداد لوله‌ها نیز در افزایش استحکام پانل ساندویچی موثر بوده بطوری که نمونه 6 جفت لوله بالاترین تحمل نیرو را از خود نشان می‌دهد.

- در مدت زمان صفر روز از تخریب نمونه 2 جفت لوله در مقایسه با نمونه شاهد تخریب شده چقرمگی شکست دینامیکی کمتری را دارد اما دو نمونه 4 و 6 جفت لوله مقادیر بیشتری را از خود نشان می‌دهد. این امر بیان کننده آن است که ترمیم انجام شده در مقایسه با ناهمگنی ایجاد شده در اثر قرارگیری لوله‌ها در بین لایه‌های کامپوزیت در نمونه دو جفت لوله کافی نمی‌باشد.

- در مدت زمان سه و هفت روز پس از تخریب نمونه 6 جفت لوله در مقایسه با نمونه‌های 2 و 4 جفت لوله چقرمگی شکست دینامیکی بیشتری از خود نشان می‌دهد که نشان می‌دهد می‌توان از ناهمگنی ایجاد شده در مقایسه با ترمیم چشم‌پوشی کرد.

- نمونه 6 جفت لوله در بازدهی ترمیم بین تمامی نمونه‌ها بالاترین میزان را به اندازه 91.5 درصد برای مدت زمان هفت روز و 48.3 درصد برای مدت زمان سه روز دارد.

- نحوه شکست نمونه‌ها نیز نشان می‌دهد که نزدیک‌ترین حالت در بین تمامی نمونه‌ها به نمونه کنترلی (شاهد) نمونه 6 جفت لوله می‌باشد.

6- مراجع

- [1] Abrate, S., "Impact on composite structures", Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [2] Ghosh, S. K., "Fundamentals, design strategies, and applications" *Self-healing Materials*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009.
- [3] Li, G., Meng, H., "Recent Advances in Smart Self-healing Polymers and Composites: Overview of crack self-healing", Elsevier Ltd. 2015.
- [4] Allen, H. G., "Analysis and design of structural sandwich panels", The University Southampton, Pergamon Press, 1969.

- [27] Shojaei, A., Li, G., Voyiadjis, G. Z., "Cyclic viscoplastic-viscodamage analysis of shape memory polymers fibers with application to self-healing smart materials" *Journal of Applied Mechanics*, 80, 2013.
- [28] Li, G., Shojaei, A., "A viscoplastic theory of shape memory polymer fibres with application to self-healing materials" *Proc. R. Soc. A* 468, 2319-2346, 2012.
- [29] Gibson, L. J., Ashby, M. F., "Cellular solids: structure and properties", Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [30] Li, G., "Shape memory polymer based structures" *Self-Healing Composites*, John Wiley & Sons, Inc., West Sussex, UK, 2014.
- [31] Wool, R. P., "Self-healing materials: a review" *Soft Matter* 4, pp. 400-418, 2008.
- [32] Srivastava, V. K., "Impact behaviour of sandwich GFRP-foam-GFRP composites" *International Journal of Composite Materials*, 2(4):63-66, 2012.
- [33] Lee, J., Bhattacharyya, D., Zhang, M.Q., Yuan, Y. C., "Mechanical properties of a self-healing fibre reinforced epoxy composites" *Composites Part B* 78, pp. 515-519, 2015.