



Utilizing Acoustic Emission for Studying Scaling and Layup Configuration Effect on Behavior of Glass/Epoxy Composite Materials Under Low-Velocity Impact

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Fotouhi S.^{1*},
Khoshnavan Azar MR.²
Fotouhi M.³

How to cite this article

Fotouhi S, Khoshnavan Azar MR, Fotouhi M. Utilizing Acoustic Emission for Studying Scaling and Layup Configuration Effect on Behavior of Glass/Epoxy Composite Materials Under Low-Velocity Impact. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(11):719-728.

¹Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³School of Engineering, University of Glasgow, Glasgow, UK

*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Phone: -

Fax: -

fotouhi.sakineh24@gmail.com

Article History

Received: 24 January, 2021

Accepted: 19 June, 2021

ePublished: 10 September, 2021

ABSTRACT

Composite structures under impact loading are prone to a variety of damage mechanisms such as delamination, fiber breakage, or matrix cracking. It is proven that the impact-induced damage mechanisms of composite materials are dependent on scaling (in-plane and out-of-plane) and layup configurations. The present study has investigated the effect of scaling and layup configurations on the failure mechanisms of composite materials under low-velocity impact force using acoustic emission, C-scan, and CT-scan tools. For this purpose, four samples with quasi-isotropic configurations of [45m/0m/90m/-45m]_ns were manufactured, then they were loaded and acoustic signals were recorded. The three IS (m=1, n=2), PS (m=2, n=2), and SS (m=1, n=4) samples were investigated based on D62624/D6264M ASTM standard test and the R (m=1, n=2) sample had half of the in-plane dimension of them. The variables m and n vary according to the design plan. The obtained acoustic emission data were analyzed using the sentry function, then C-Scan and CT-scan were utilized for damages' size and location. It was proven that scaling and layup configuration affect the type and intensity of damage mechanisms as well as mechanical behavior of the laminated composites. Overall, the samples with thinner laminas have a smaller damaged area. Furthermore, damages mostly happen in the lower half but near the symmetric line of the samples. Besides, the acoustic emission method is shown as an indicator of scaling and layup configuration effects in glass/epoxy composite materials under low-velocity impact.

Keywords Composite Materials, Configuration, Scaling, Impact, Acoustic Emission, C-scan

CITATION LINKS

[1] Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector. [2] Scale Effect on Impact Performance of Unidirectional Glass Fiber Reinforced Epoxy Composite Laminates. [3] Clustering of interlaminar and intralaminar damages in laminated composites under indentation loading using Acoustic Emission. [4] Liouville-Green approximation: An analytical approach to study the elastic waves vibrations... [5] The effect of microvoid gap width on microbond pull-out test results. [6] Effect of ply thickness on damage mechanisms of composite laminates... [7] A comparative study on glass and carbon fibre reinforced laminated composites... [8] Microstructure and texture assessment of Al-Mn-Fe-Si (3003) aluminum alloy... [9] Effect of laminate configuration and impactor's mass on the initial impact damage... [10] Experimental Investigation of the Damage Progression in the Filament-Wound Composite... [11] Study of the filament wound glass/polyester composite damage behavior... [12] Shear strengthening of reinforced concrete beam using natural fibre reinforced polymer laminates. [13] Supervised and non-supervised AE data classification of nanomodified CFRP during DCB tests. [14] Prediction of delamination growth in carbon/epoxy composites... [15] Post-impact damage characterization of hybrid configurations of jute/glass polyester laminates using acoustic emission and IR thermography. [16] Acoustic emission characterization of the temperature effect on falling weight impact damage in carbon/epoxy laminates. [17] Damage propagation in CFRP laminates subjected to low velocity impact and static indentation. [18] Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. [19] Hexcel pre-preg data sheet. [20] Acoustic Emission based on sentry function to monitor the initiation of delamination in composite materials. [21] Exploring the Energetics of Cell Movement via Finite Element Analysis. [22] Fatigue residual strength of circular laminate graphite-epoxy composite plates damaged by transverse load. [23] Prediction of impact force and duration due to low-velocity impact on circular composite laminates.

استفاده از آزمون نشر آوایی برای مطالعه تأثیر ابعاد و لایه‌چینی بر رفتار مواد کامپوزیتی شیشه/اپوکسی در اثر نفوذ شبه استاتیکی جسم صلب

سکینه فتوحی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

محمدرضا خوشروان آذر

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

محمد فتوحی

دانشکده هوافضا، دانشگاه گلاسگو، گلاسگو، اسکاتلند

چکیده

سازه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری ضربه، مستعد انواع مکانیزم‌های خرابی از قبیل جدایش بین لایه‌ای، شکست الیاف و یا ترک ماتریس می‌باشند. مطالعات نشان می‌دهد که خرابی سازه‌های کامپوزیتی در اثر ضربه، وابسته به ابعاد (اعم از درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای) و چینی لایه‌ها می‌باشند. تحقیق حاضر با استفاده از روش نشر آوایی سی‌اسکن و سی‌تی‌اسکن به بررسی تأثیر ابعاد و چینی لایه‌ها بر خرابی صفحات کامپوزیتی در اثر ضربه سرعت پایین پرداخته است. بدین منظور چهار نمونه با ساختار شبه همسانگرد با لایه‌چینی $4s/60/0/-60/4s$ و $604/04/-604s$ تحت بارگذاری نفوذ شبه استاتیکی با استفاده از روش نشر آوایی انجام گرفت^[3]. نتایج نشر آوایی نشان داد که افزایش ضخامت تک لایه‌های مواد کامپوزیتی منجر به کاهش شکست الیاف و کمتر شدن رفتار ترد آن‌ها می‌گردد. علاوه بر آن، به دلیل ترک‌خوردگی کمتر ماتریس، اندازه ناحیه خرابی ایجادشده کوچک‌تر خواهند بود. از آنجا که افزایش ضخامت تک لایه‌ها بدین معنی است که تعداد لایه‌های مجاور با زوایای یکسان بیشتر هستند، تعداد جدایش بین لایه‌ای نیز در آن‌ها کمتر است. اما به دلیل بالا بودن نرخ آزادسازی انرژی، ترک‌خوردگی ماتریس در مواد کامپوزیتی با تک لایه‌های ضخیم‌تر افزایش می‌یابد و منجر به افزایش ناحیه خرابی می‌گردد^[4-6]. از سوی دیگر، افزایش ضخامت کلی (تعداد لایه‌های بیشتر) مواد کامپوزیتی منجر به افزایش رفتار ترد در هنگام شکست، افزایش اندازه ناحیه خرابی و افزایش تعداد خرابی‌های جدایش بین لایه‌ای می‌گردد^[4,7]. در مواد کامپوزیتی با ضخامت کلی کمتر (تعداد لایه‌های کمتر)، سطح زیرین (سطحی که به آن ضربه وارد نشده است) آسیب بیشتری می‌بیند درحالی‌که در ضخامت‌های بالاتر، سطح رویی آسیب‌پذیرتر بوده و به آسیب‌های موضعی حساس‌تر هستند^[8]. مطالعه نتایج پیشین همچنین نشان داده‌اند که نحوه‌ی چیدمان لایه‌ها و جنس الیاف نیز بر پاسخ ضربه مواد کامپوزیتی تأثیر می‌گذارد^[4,7]. نحوه‌ی چیدمان لایه‌ها حتی بیشتر از ضخامت لایه‌ها روی خرابی‌های ناشی از ضربه تأثیر می‌گذارد و محل شروع خرابی را تغییر می‌دهد^[9]. در مطالعات ذکرشده، تأثیر ابعاد و لایه‌چینی به صورت پراکنده و اغلب با استفاده از مشاهده چشمی و یا تصاویر سی‌اسکن بررسی شده است. این در حالی است که بسیاری از خرابی‌های ایجادشده در مواد کامپوزیتی به راحتی با چشم قابل

کلیدواژه‌ها: کامپوزیت، لایه‌چینی، ابعاد، ضربه، نشر آوایی، سی‌اسکن

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵

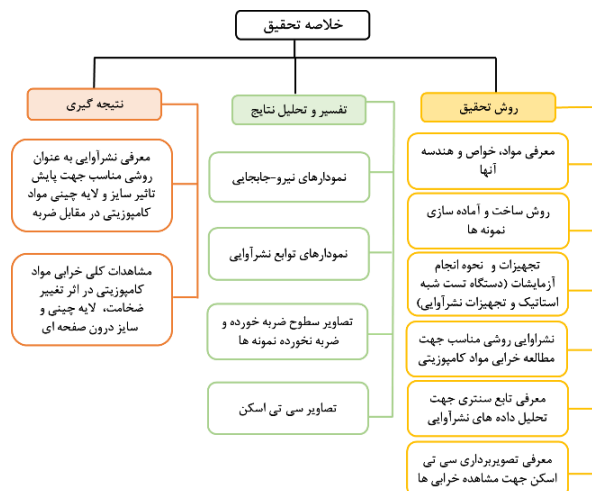
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۹

*نویسنده مسئول: fotouhi.sakineh24@gmail.com

۱- مقدمه

امروزه سازه‌های کامپوزیتی به دلیل نسبت استحکام به وزن بسیار بالایی که نسبت به مواد پر کاربرد دیگری همچون فلزات دارند، کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوایی، کشتی‌رانی، اتومبیل و ساخت‌وساز دارند. به عنوان مثال در هواپیمای ایرباس مدل ۳۵۰A، حدود ۵۳ درصد اجزای بدنه از مواد کامپوزیتی ساخته شده است^[1]. مواد کامپوزیتی از ترکیب فیزیکی یک یا چند نوع الیاف با رزین تشکیل می‌گردند. به دلیل تفاوت خواص مواد

تشکیل‌دهنده، مواد کامپوزیتی تحت بارگذاری‌های مختلف مستعد خرابی‌هایی از قبیل جدایش بین لایه‌ای، ترک‌خوردگی ماتریس و یا شکست الیاف هستند. یکی از بارگذاری‌های شایع که به بدنه سازه‌های کامپوزیتی وارد می‌شود ضربه است که ممکن است طی فرآیند ساخت، مونتاژ و استفاده اتفاق بیفتد. بنابراین مطالعه‌ی رفتار مواد کامپوزیتی در اثر ضربه امری ضروری می‌باشد. همانند بسیاری از سازه‌های صنعتی، مطالعه‌ی رفتار سازه‌های کامپوزیتی بر روی مدل‌هایی با ابعاد واقعی امری دشوار و هزینه‌بر می‌باشد، بنابراین در آزمایش‌ها اغلب از ابعاد کوچک‌تر این سازه‌ها استفاده می‌گردد. مطالعاتی وجود دارند که نشان می‌دهند مکانیزم‌های خرابی در مواد کامپوزیتی با ابعاد مختلف در اثر ضربه متفاوت به نظر می‌آیند و لزوماً نمی‌توان برای پیش‌بینی رفتار سازه‌ی اصلی از ابعاد کوچک‌تر استفاده کرد^[2]. برخی مطالعات نشان داده‌اند که ابعاد سازه‌های کامپوزیتی و نحوه‌ی لایه‌چینی آن‌ها روی خرابی‌های ایجادشده و شدت آن‌ها تأثیر می‌گذارند. به عنوان مثال مطالعه‌ای روی مواد کامپوزیتی با الیاف کربن و با لایه‌چینی $4s/60/0/-60/4s$ و $604/04/-604s$ تحت بارگذاری نفوذ شبه استاتیکی با استفاده از روش نشر آوایی انجام گرفت^[3]. نتایج نشر آوایی نشان داد که افزایش ضخامت تک لایه‌های مواد کامپوزیتی منجر به کاهش شکست الیاف و کمتر شدن رفتار ترد آن‌ها می‌گردد. علاوه بر آن، به دلیل ترک‌خوردگی کمتر ماتریس، اندازه ناحیه خرابی ایجادشده کوچک‌تر خواهند بود. از آنجا که افزایش ضخامت تک لایه‌ها بدین معنی است که تعداد لایه‌های مجاور با زوایای یکسان بیشتر هستند، تعداد جدایش بین لایه‌ای نیز در آن‌ها کمتر است. اما به دلیل بالا بودن نرخ آزادسازی انرژی، ترک‌خوردگی ماتریس در مواد کامپوزیتی با تک لایه‌های ضخیم‌تر افزایش می‌یابد و منجر به افزایش ناحیه خرابی می‌گردد^[4-6]. از سوی دیگر، افزایش ضخامت کلی (تعداد لایه‌های بیشتر) مواد کامپوزیتی منجر به افزایش رفتار ترد در هنگام شکست، افزایش اندازه ناحیه خرابی و افزایش تعداد خرابی‌های جدایش بین لایه‌ای می‌گردد^[4,7]. در مواد کامپوزیتی با ضخامت کلی کمتر (تعداد لایه‌های کمتر)، سطح زیرین (سطحی که به آن ضربه وارد نشده است) آسیب بیشتری می‌بیند درحالی‌که در ضخامت‌های بالاتر، سطح رویی آسیب‌پذیرتر بوده و به آسیب‌های موضعی حساس‌تر هستند^[8]. مطالعه نتایج پیشین همچنین نشان داده‌اند که نحوه‌ی چیدمان لایه‌ها و جنس الیاف نیز بر پاسخ ضربه مواد کامپوزیتی تأثیر می‌گذارد^[4,7]. نحوه‌ی چیدمان لایه‌ها حتی بیشتر از ضخامت لایه‌ها روی خرابی‌های ناشی از ضربه تأثیر می‌گذارد و محل شروع خرابی را تغییر می‌دهد^[9]. در مطالعات ذکرشده، تأثیر ابعاد و لایه‌چینی به صورت پراکنده و اغلب با استفاده از مشاهده چشمی و یا تصاویر سی‌اسکن بررسی شده است. این در حالی است که بسیاری از خرابی‌های ایجادشده در مواد کامپوزیتی به راحتی با چشم قابل



شکل ۱) خلاصه‌ای از روند تحقیق حاضر

جدول ۱) خواص مکانیکی مواد مورد آزمایش

شیشه اپوکسی	ماده
۴۷/۷	(GPa) E11
۱۲/۳	(GPa) E22
۵/۱۷	(GPa) G12
۰/۸	(N/mm) G11c
۰/۲۸	ν_{12}
۱۹۰	چگالی (g/m ³)
۰/۱۵۵	ضخامت لایه (mm)
۳/۸۷	کرنش گسیختگی (Strain to failure) (%)

گیگا پاسکال و چگالی آن ۱۸۰ گرم بر مترمربع می‌باشد که در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

ساختار شبه همانسگرد با زوایای ۰، ۹۰، و $\pm 45^\circ$ مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده است. شکل ۲ همچنین ابعاد و ضخامت هر نمونه و همچنین قطر ضربه زننده را نشان می‌دهد. ابعاد سه نمونه IS، PS و SS بر اساس استاندارد ASTM D6264/D6264M می‌باشد [18] و ابعاد R نصف ابعاد درون صفحه‌ای سه نمونه‌ی قبلی را داراست. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، نمونه‌ها با لایه-چینی مورد نظر روی صفحه‌ای آلومینیومی که با لایه محافظ (Release Film) پوشش داده شده است قرار می‌گیرند (جهت جدایی بهتر از لایه‌ی آلومینیومی). برای جلوگیری از بیرون زدگی و اتلاف رزین در حین پخت، نمونه‌ها با نوار درزگیر احاطه می‌گردند. روی سطح دیگر نمونه‌ها، دوباره لایه‌ی محافظ و به دنبال آن صفحه‌ی سیلیکونی قرار داده می‌شود (صفحه‌ی سیلیکونی جهت دستیابی به سطح باکیفیت مناسب استفاده می‌گردد). روی صفحه‌ی سیلیکونی لایه‌ی تنفس (Breather) قرار می‌گیرد و سپس با استفاده از کیسه خلأ پوشانده می‌شود. در این میان برای مهر و موم کیسه خلأ و جلوگیری از نفوذ هوا و یا افت فشار، نمونه‌ها به مدت حدوداً ۱۰ ساعت در حداقل فشار ۱۴ - Psi (یک بار)، مطابق شکل ۴ و شکل ۳ قرار می‌گیرند.

رویت نیستند و نیاز به بهره‌گیری بیشتری از تجهیزات غیر مخرب است.

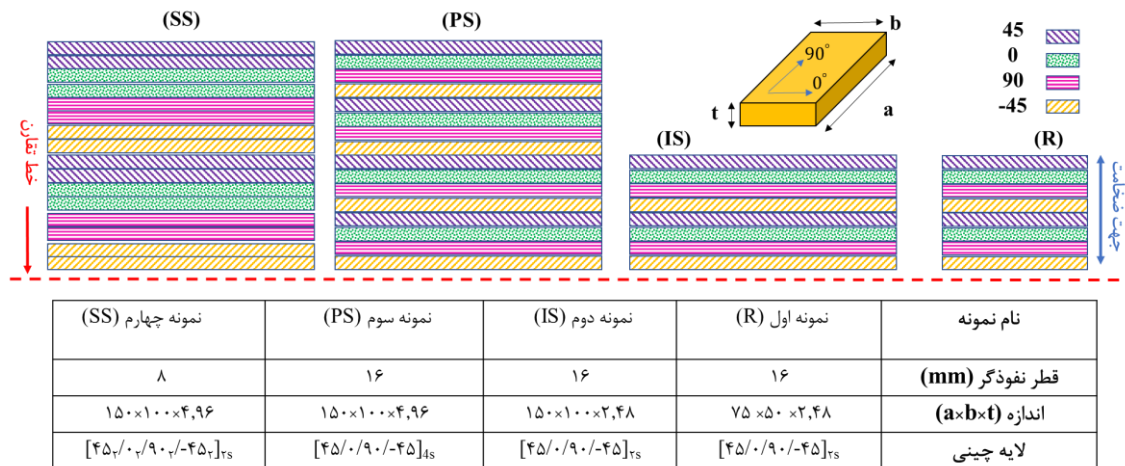
روش نشر آوایی از جمله روش‌های غیر مخرب است که کاربرد وسیعی در تشخیص مکانیزم‌های خرابی مواد کامپوزیتی تحت بارگذاری‌های مختلف دارد [10-14]. برای مثال، خواص خمشی پس از بارگذاری ضربه روی کامپوزیت با ماتریس اپوکسی و الیاف کف و شیشه بررسی شد و داده‌های نشر آوایی آن‌ها در حین آزمون خمش ثبت شد. آزمایش‌ها روی دو لایه‌چینی مختلف (که در یکی الیاف شیشه به صورت پراکنده و در دیگری به صورت دو پوسته در دو طرف الیاف کفی هستند) انجام شد. نتایج سفتی و مدول خمشی بالا ولی رفتار تردتری را برای لایه‌چینی ساندویچی نشان داد. امواج نشر آوایی نیز نشان دادند که تعداد پالس‌های نشر آوایی برای نمونه ساندویچی پایین‌تر از دیگری بود و این به دلیل تمرکز محل خرابی در نواحی خاصی از آن است درحالی‌که در نمونه دیگر نواحی بیشتری دچار خرابی می‌شوند [15]. در پژوهشی دیگر نیز کامپوزیت کربن اپوکسی با دو لایه چینی متفاوت در دماهای مختلف تحت ضربه قرار گرفت و از روش نشر آوایی جهت بررسی رفتار خمشی پس از ضربه استفاده شد. در نهایت، بازه فرکانسی و بازه مجموع پالس‌های نشر آوایی مشخصی را برای هر کدام از مکانیزم‌های خرابی نشان دادند و با تغییر لایه چینی نیز تغییر یافتند [16].

در مورد تأثیر ابعاد و لایه‌چینی، مطالعات جامعی با استفاده از روش نشر آوایی بر روی مواد کامپوزیتی و مخصوصاً با الیاف شیشه انجام نشده است و اغلب آنها مرتبط با تحلیل آنها پس از بارگذاری ضربه بود. لذا تحقیق حاضر برای اولین بار با استفاده از روش نشر آوایی به صورت جامعی تأثیر ابعاد درون و برون صفحه-ای و همچنین چیدمان لایه‌ها را بر رفتار کامپوزیت‌های شیشه اپوکسی تحت بارگذاری شبه استاتیکی بررسی می‌نماید. طی بارگذاری ضربه، زمان کافی جهت بررسی دقیق و امکان متوقف کردن آزمایش وجود ندارد. مطالعات نشان داده‌اند که رفتار مواد کامپوزیتی در اثر بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه سرعت پایین مشابه یکدیگر هستند [15-17]. بنابراین، در این مطالعه بارگذاری شبه استاتیکی به عنوان جایگزین مناسب جهت مطالعه رفتار مواد کامپوزیتی در اثر ضربات سرعت پایین استفاده شده است. شکل ۱ خلاصه‌ای از تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- آزمایش‌های تجربی

مواد مورد استفاده از الیاف پیش آغشته شیشه نوع S با رزین اپوکسی ۸۵۸۲ ساخت شرکت هگزول (Hexcel) می‌باشد. ضخامت هر لایه‌ی پیش آغشته معادل ۰/۱۵۵ میلی‌متر، مدول یانگ تخمینی ماده (با استفاده از قوانین ترکیبی مواد کامپوزیتی) ۴۷/۷

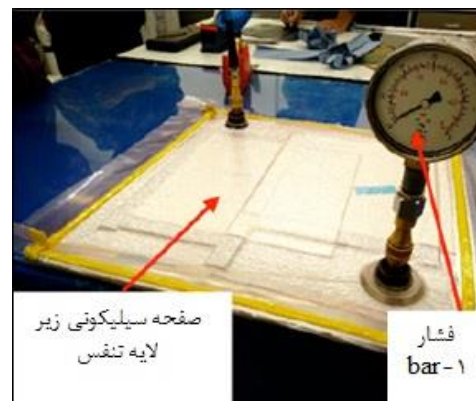
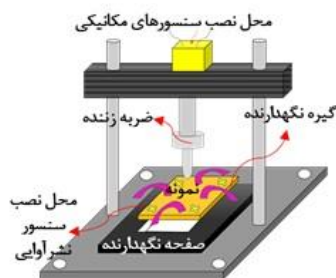


شکل ۲) شماتیک از لایه چینی مواد کامپوزیتی و مشخصات آن‌ها

وسط صفحه‌ی نگه‌دارنده برای حالت‌های استاندارد به ابعاد ۱۲۵×۷۵ و برای نمونه‌ی اول با ابعاد ۶۲/۵×۳۲/۵ الی است. این آزمون بر اساس استاندارد (ASTM) D6264/D6264M و با استفاده از دستگاه INSTRON۸۸۷۲ با نیروسنج به ظرفیت ۲۵ کیلو نیوتن انجام شده است که خود دستگاه و شماتیک از آن در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. آزمایش با کنترل جابجایی و با سرعت یک میلی‌متر بر دقیقه انجام و در حین آزمایش‌ها نمودارهای نیرو-جابجایی برای هر کدام از آن‌ها ثبت شده است. لازم به ذکر است که جنس نفوذگر از فولاد سخت شده (steel hardened) بود که دارای قطر ۸ میلی‌متر برای نمونه‌ی R و ۱۶ میلی‌متر برای نمونه‌های دیگر بود (که در شکل ۲ نیز قابل مشاهده است). از هر نمونه دو عدد آزمون



شکل ۳) شماتیک از آماده سازی نمونه‌ها قبل از اتوکلاو و برش صفحات پیش آغشته جهت لایه چینی

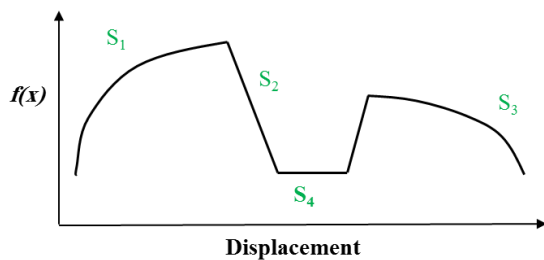


شکل ۴) مهر موم نمونه‌ها و تخلیه هوای داخل آن‌ها

در ادامه نمونه‌ها جهت پخت در دستگاه اتوکلاو در دما و فشار توصیه شده برای رزین ۸۲۵۲/اپوکسی با توجه به دستورالعمل سازنده اتوکلاو و پخت انجام می‌گیرد. در این پژوهش نمونه‌ها با توجه به راهنمای سازنده [19] در دو مرحله ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه‌ای به ترتیب با دماهای ۱۱۰°C و ۱۸۰°C اتوکلاو شدند. در نهایت نمونه‌های آماده با ابعاد مورد نظر برش داده شده و برای انجام آزمون استفاده شده‌اند. نمونه‌ها پس از آماده سازی و برش، با شرایط لبه آزاد و توسط چهار گیره‌ی لبه پلاستیکی به صفحه‌ی نگه‌دارنده جهت انجام آزمون شبه استاتیک گیر داده می‌شوند (شکل ۵).



شکل ۵) نما و شماتیک از تجهیزات آزمایش نفوذ شبه استاتیک و نحوه قرارگیری نمونه و حسگرهای نشر آوایی



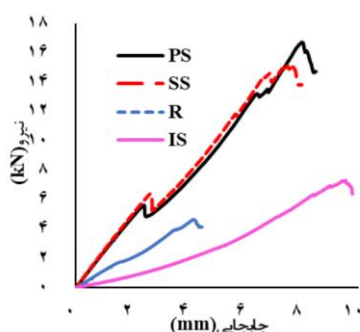
شکل ۶) توابع چهارگانه اصلی برای بیان تابع سنتری

که خرابی خاصی را نشان نمی‌دهد، ب) تابع با افت ناگهانی $S_2(x)$ که نشانگر خرابی قابل توجهی است، ج) تابع ثابت $S_3(x)$ که بیانگر این است که ماده در حال مقاومت کردن در برابر توسعه خرابی-هاست د) تابع کاهشی $S_4(x)$ که نشان می‌دهد ماده در برابر توسعه خرابی مقاومت زیادی نکرده و با توسعه خرابی در حال از دست دادن ظرفیت تحمل نیرو است [22].

۳- تفسیر و تحلیل نتایج

همان طور که در شرح آزمایش‌ها گفته شد، از هر نمونه ابتدا یک مورد تا شکست نهایی تحت بارگذاری قرار می‌گیرد که شکل ۷ نمودار نیرو جابجایی هر چهار نمونه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که بارگذاری هنگام مشاهده اولین شکست الیاف در سطح پایینی (ضربه نخورده) متوقف شده است. در نمونه‌های PS و SS پس از طی ناحیه کشسان (اولین ناحیه که رفتار خطی دارد) افت نیرویی ملاحظه می‌شود که نشان از شروع جدایش بین لایه‌ای و گسترش آن می‌باشد که منجر به تغییر سفتی (stiffness) ماده کامپوزیتی می‌شود [7]. به دلیل تغییر سفتی، ماده کامپوزیتی رفتار غیرخطی دارد تا به افت بار دوم می‌رسد.

پس از افت بار دوم، با افت و خیزهایی به بیشینه نیرو رسیده و سرانجام رفتار نزولی دارد. پس از افت بار اول، نمونه‌ها رفتار غیرخطی نشان می‌دهند که در طی آن ترک ماتریسی و جدایی بین لایه‌ای بیشتر شده و خرابی‌های دیگری مانند شکست الیاف نیز اتفاق می‌افتند. نمونه R نیز بعد از جابجایی حدوداً ۱/۷ میلی‌متر رفتار غیرخطی دارد ولی افت نیرو در آن قابل توجه نیست. نمونه IS افت نیرویی نداشته و دارای رفتاری غیرخطی می‌باشد. این



شکل ۷) نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری شبه استاتیکی

شده است. نمونه اول تا شکست نهایی بارگذاری شد تا رفتار کلی هر کدام به دست بیاید. سپس با استفاده از نمودار کلی به دست آمده، نقطه توقف اصلی برای مشاهده مکانیزم‌های خرابی و ارتباط آن با افت نیروهای به وجود آمده در نمودار نیرو-جابجایی مشخص شده است. این نقطه بلافاصله پس از مشاهده افت بار دوم در کلیه نمونه‌ها انتخاب شده و در آن نقطه آزمایش متوقف شده و تصاویر صفحات ضربه خورده و نخورده (بالا و پایین) تهیه شده است. همچنین جهت بررسی دقیق‌تر خرابی‌ها، پس از انجام آزمایش‌ها نیز از تصاویر سی‌تی‌اسکن (CT-scan) بهره‌گیری شده است.

علاوه بر داده‌های مکانیکی، جهت ثبت داده‌های نشر آوایی، چهار حسگر نشر آوایی برای پایش فرایند در فاصله مشخصی از نفوذگر بر روی قطعه مورد آزمایش نصب شدند که در شکل ۵ قابل ملاحظه می‌باشد. حسگرها داده‌ها را با نرخ ۲۰ Hz در نرم‌افزار Instron (Wave Matrix Software) دریافت نموده‌اند. برای ثبت داده‌های نشر آوایی در حین آزمایش‌ها، از سیستم نشر آوایی با نرم‌افزار Mistras و سیستم PCI-2 استفاده می‌شود. از چهار حسگر پیزوالکتریک تک‌کریستال با محدوده بهینه کاری ۲۰-۹۰۰ kHz استفاده خواهد شد. دستگاه روی کمینه فرکانس ۵ MHz و آستانه ۶۰ dB تنظیم می‌گردند.

۲-۲- تابع سنتری

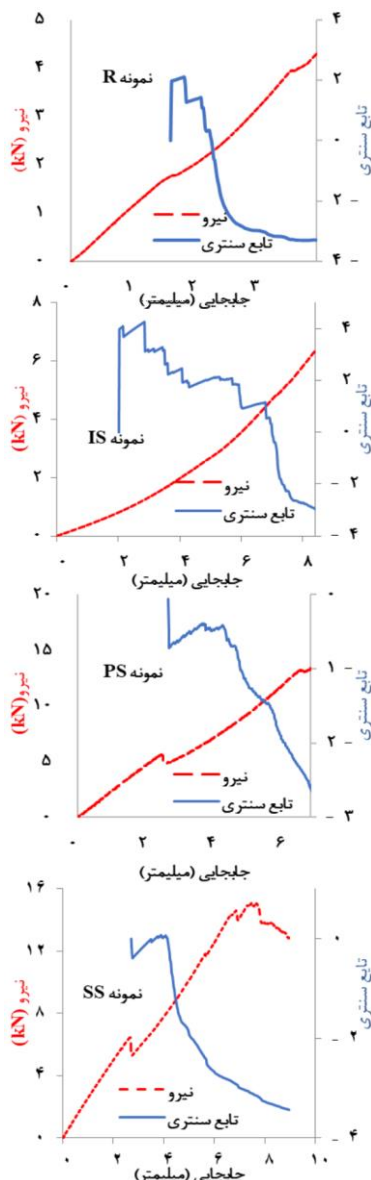
داده‌های نشر آوایی دریافت شده با استفاده از تابع سنتری تحلیل شده‌اند. تابع سنتری اطلاعات مکانیکی و نشر آوایی را یک جا جمع می‌کند و اطلاعاتی در خصوص میزان پیشروی آسیب در کامپوزیت‌ها در اثر بارهای مختلف در مواد کامپوزیتی را ارائه می‌دهد [20]. تابع سنتری $f(x)$ به صورت لگاریتم نسبت انرژی مکانیکی به انرژی نشر آوایی تعریف می‌شود (معادله ۱):

$$f(x) = \ln \left(\frac{E_s(x)}{E_a(x)} \right) \quad (1)$$

که در آن $f(x)$ تابع سنتری بوده و x متغیر آزمایش (اغلب جابجایی و یا کرنش)، $E_s(x)$ انرژی کرنشی و $E_a(x)$ انرژی سیگنال‌های نشر آوایی می‌باشد. جهت محاسبه انرژی کرنشی از مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی استفاده شده است (معادله ۲) که در آن x جابجایی در هر نقطه و $P(x)$ نیروی معادل آن می‌باشد [21]. در مورد این مسئله چون نمودار نیرو-جابجایی رفتار غیرخطی دارد، از نیروی تجمعی (حاصل جمع نیروهای ما قبل هر نقطه استفاده شده است. انرژی نشر آوایی نیز توسط دستگاه نشر آوایی به دست آمده است.

$$E_s(x) = \frac{1}{2} P(x)x \quad (2)$$

با توجه به خرابی‌های ایجاد شده در نمونه و مقاومت نمونه در مقابل گسترش این خرابی‌ها، اغلب تابع سنتری در طول آزمایش به وسیله ترکیبی از چهار تابع عبارت‌اند از: الف) تابع افزایشی $S_1(x)$ بیان می‌گردد. این چهار تابع عبارت‌اند از: الف) تابع افزایشی $S_1(x)$



شکل ۹) نمودارهای نیرو-جابجایی و توابع سنتری برای نمونه‌های کامپوزیتی (انرژی جذب‌شده در نقطه افت بار اول و افت بار دوم در نقاط مربوطه نوشته شده است)

همان طور که شکل ۹ نشان می‌دهد در اولین جابجایی که افت نیرو اتفاق می‌افتد، تابع‌های سنتری آشکار می‌شوند که نشانگر شروع خرابی هستند. نمونه‌های R و SS سرعت گسترش خرابی بالاتری دارند چرا که شیب قسمت نزولی نمودار تابع سنتری در شکل ۹ برای این نمونه‌ها تندتر است. برای نمونه‌ی IS، تابع سنتری افت اولیه شدیدی ندارد ولی افت و خیزهای بعدی بیشتری دارد که نشان از شروع و گسترش متفاوت مکانیزم‌های خرابی در این نمونه نسبت به نمونه‌های دیگر است که در نمودارهای نیرو-جابجایی نیز این تفاوت مشاهده شد.

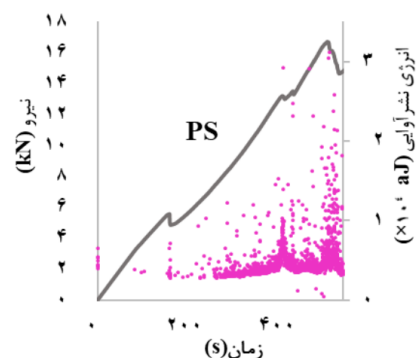
از جمله عواملی که در مطالعه مواد کامپوزیتی تحت ضربات سرعت پایین و یا نفوذ شبه استاتیک بررسی می‌گردد، انرژی جذب‌شده توسط آن‌ها می‌باشد. هر چه انرژی جذب‌شده بالا باشد، قطعه رفتار

نشان می‌دهد که شروع و گسترش خرابی‌ها به صورت تدریجی و نه به صورت ناگهانی اتفاق می‌افتد. دلیل این رفتار در رابطه با نمونه IS به دلیل بیش از حد کوچک بودن نسبت ضخامت به ابعاد درون صفحه‌ای آن است. چرا که اگر نمونه‌ها به صورت جرم و فنر مدل شوند، معادله ۳ را خواهیم داشت (با صرف‌نظر از جابجایی-های موضعی در اثر تنش تماسی هرتزین) [23].

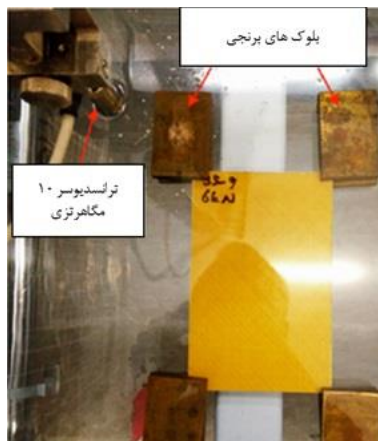
$$F = k_{bs}w_0 + k_mw_0^3 \quad k_{bs} \approx \frac{h^3}{b^2} \quad k_m \approx \frac{h}{b^2} \quad (3)$$

در معادله‌ی ۳، F نیرو، w_0 جابجایی عمودی وسط نمونه h ضخامت و b عرض آن را نشان می‌دهند و k_{bs} مدول خمشی و k_m مدول غشایی هستند. این معادله نشان می‌دهد که به دلیل کوچک بودن ضخامت به ابعاد درون صفحه‌ای، اثرات مدول غشایی در تمامی نمونه قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. اما مسئله‌ای که در مورد نمونه‌ی IS صادق است، پایین بودن بیش از اندازه مدول خمشی آن است که آن را به مدول غشایی نزدیک‌تر می‌کند و بنابراین اثر مدول غشایی فاحش‌تر می‌گردد. در نتیجه رفتار غیرخطی بیشتری نشان می‌دهد که نمودارهای نیرو-جابجایی نیز این موضوع را تأیید می‌کنند.

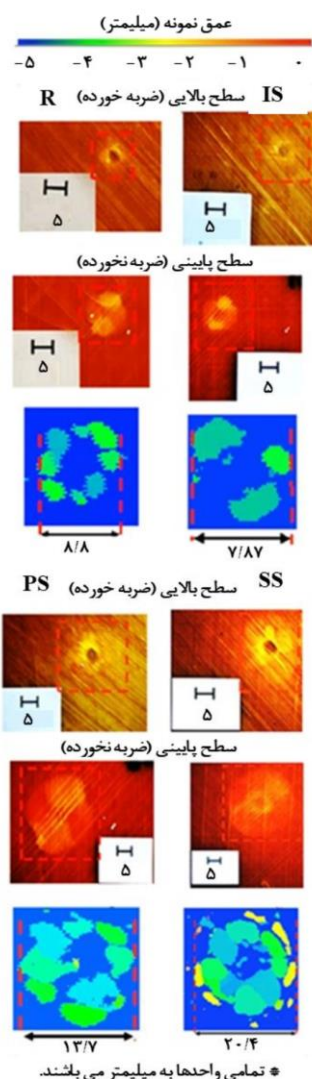
شکل ۸ رفتار کلی انرژی نشر آوایی برای یک ماده کامپوزیتی را در مقابل پاسخ به بارگذاری شبه استاتیک نشان می‌دهد. این نمودار داده‌های تجربی بوده و مربوط به نمونه PS در تحقیق حاضر است. همان طور که شکل ۸ نشان می‌دهد، انرژی نشر آوایی به طور قابل‌توجهی در دو نقطه‌ی افت بار اول و دوم واکنش نشان داده و بیشتر می‌شود. شکل ۹ نمودارهای توابع سنتری را در مقابل نمودار نیرو-جابجایی برای تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد. برای مقایسه‌ی علمی‌تر، نمودارهای شکل ۹ بازه‌های جابجایی را برای اندکی پس از افت بار دوم نشان می‌دهد تا از تأثیر خطای چشمی که جهت توقف نهایی نیروی اعمال‌شده به نمونه‌ها (شکل ۷) استفاده شد، جلوگیری گردد. جهت پایش گسترش خرابی‌ها، داده‌های نشر آوایی با بهره‌گیری از تابع سنتری تحلیل‌شده‌اند. همان طور که در بخش روش تحقیق توضیح داده شد، تابع سنتری اطلاعات مکانیکی و نشر آوایی را به یکدیگر مرتبط می‌کند و میزان پیشروی آسیب در مواد کامپوزیتی را ارائه می‌دهد.



شکل ۸) رفتار کلی یک ماده کامپوزیتی در اثر بارگذاری شبه استاتیک (نمودار مربوط به نمونه PS در تحقیق حاضر است)



شکل ۱۰) نمای بالا از مخزن سی اسکن و نحوه قرارگیری نمونه در آن



شکل ۱۱) تصاویر چشمی و سی اسکن از نمونه‌ها پس از آزمون

جدول ۳) مقایسه اندازه خرابی در نمونه‌های مختلف

R	IS	PS	SS	قطر خرابی (mm)
12.8	16.5	65.7	33.1	
128.7	213.8	3390.1	360.5	مساحت خرابی (mm ²)

بهتری در مقابل این نوع بارگذاری‌ها دارد. از این رو انرژی جذب شده در نقطه افت بار اول و جایی که نیرو در آن بیشینه مقدار را دارد در جدول ۲ آورده شده‌اند. نمونه‌ی R در هر دو مورد کمترین انرژی جذب شده را داشت که با توجه به ابعاد نمونه منطقی است. نمونه‌ی R حدود ۵ برابر، نمونه‌های IS و SS بالای ۶ برابر و نمونه‌ی PS نیز بالای ۹ برابر افزایش جذب انرژی را در بیشینه بار نشان دادند. نمونه PS با اینکه در افت بار اول انرژی کمتری نسبت به SS جذب کرده است، ولی در بیشینه نیرو انرژی جذب آن بالاتر از نمونه‌ی SS شده است. این نشان از نیاز بیشتر به مطالعه‌ی تأثیر ضخامت تک لایه‌ها روی انرژی جذب شده می‌باشد.

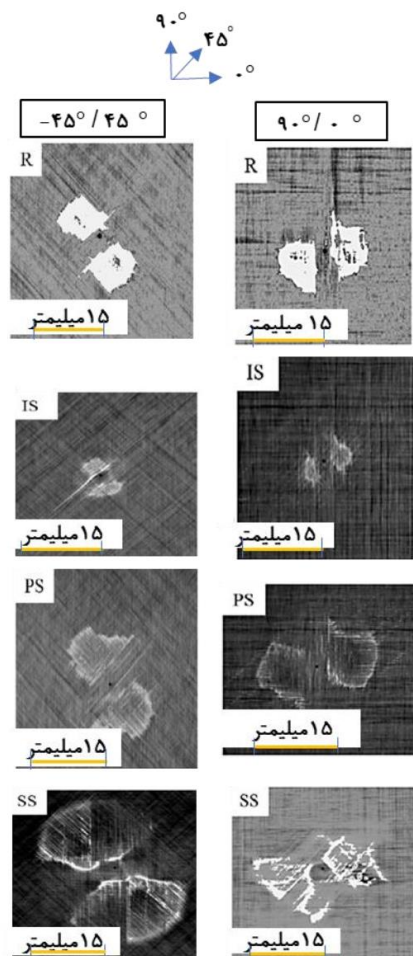
نکته قابل توجه دیگری با توجه به جدول ۲ این است که نمونه IS جابجایی نهایی بالاتری از باقی نمونه‌ها داشت که این نشان از انعطاف بالا و رفتار نرم‌تر آن است. بنابراین، مقایسه نمونه‌ی IS با نمونه‌های SS و PS نشان می‌دهد که هر چه ضخامت ماده کامپوزیتی بیشتر باشد، رفتار نرم‌تری خواهد داشت.

تصاویری که پس از پایان هر آزمایش از سطوح ضربه خورده و سطوح ضربه نخورده تهیه شده‌اند نشان می‌دهند که هنگام افت بار دوم، هر سه نوع مکانیزم خرابی (ترک خوردگی ماتریس، جدایش بین لایه‌ای و شکست الیاف) در تمامی نمونه‌ها ولی با شدت متفاوت اتفاق افتاده‌اند (شکل ۱۱). در سطوح بالایی تمامی نمونه‌ها شکست الیافی رخ نداده و خرابی‌های ترک ماتریس و جدایی بین لایه‌ای بیشتر در مجاور ناحیه ضربه خورده متمرکز است. ناحیه‌های خرابی با یک کادر قرمز روی تصاویر مشخص شده‌اند. اما از آنجایی که به صورت چشمی مشاهده‌ی اندازه دقیق‌تر خرابی امکان‌پذیر نیست، تصاویر سی اسکن (C-scan) تهیه شده‌اند. برای تهیه تصاویر سی اسکن، نمونه‌ها داخل مخزن سی اسکن قرار می‌گیرند. منتهی برای اینکه امواج التراسونیک برخوردکننده به کف مخزن و سطح نمونه‌ها توسط نرم افزار مربوط به دستگاه سی اسکن (نرم افزار شرکت USL) قابل تشخیص باشند، نمونه‌ها از هر چهار گوشه مانند شکل ۱۰ بین بلوک‌های برنجی قرار می‌گیرند.

تصاویر سی اسکن به دست آمده در شکل ۱۱ آورده شده‌اند. ناحیه‌های خرابی با فرض اینکه دایره‌ای شکل هستند، با اندازه‌گیری قطر حدودی از روی تصاویر سی اسکن در شکل ۱۱ محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۲) مقادیر جابجایی و انرژی جذب شده برای نمونه‌های کامپوزیتی در نزدیکی افت بار اول و دوم

بار بحرانی اول		پیشینه بار	
انرژی جابجایی (میلی متر)	انرژی جذب شده (N.m)	انرژی جابجایی (میلی متر)	انرژی جذب شده (N.m)
ویژه (N.m/kg)	ویژه (N.m)	ویژه (N.m/kg)	ویژه (N.m)
R	۱/۴۳	۱۲۷/۱۳	۴/۱۵
IS	-	۴/۹۳	۳۰/۶۷
PS	۲/۴۲	۶/۷۷	۷۴/۲۳
SS	۲/۶۸	۸/۶۱	۹۴/۴۰



شکل ۱۲) نمونه‌ای از تصاویر سی‌تی‌اسکن از نمونه‌ها پس از آزمون (از دو لایه پایینی با اختلاف ۹۰ درجه)

اینکه اغلب خرابی‌های بزرگ در لایه‌های زیرین ولی بسیار نزدیک‌تر به مرکز تقارن اتفاق می‌افتند.

۴- نتیجه‌گیری

تأثیر ابعاد و لایه‌چینی با طراحی چهار نمونه کامپوزیت شیشه/اپوکسی، با استفاده از روش نشر آوایی بررسی گردید. همچنین پس از اتمام آزمون‌ها تصاویر سی‌اسکن و سی‌تی‌اسکن از نمونه‌ها تهیه شد. به طور کلی نمودارهای نیرو-جابجایی نشان دادند که نمونه‌های با ضخامت بالاتر (SS و PS)، پس از طی ناحیه کشسان، افت بار قابل‌توجهی را نشان می‌دهند که نشان از شدت شروع خرابی در آن‌هاست. از سوی دیگر، نمونه IS (نمونه با کوچک‌ترین نسبت ضخامت به ابعاد درون صفحه‌ای)، به دلیل اثرات مدول غشایی افت نیرو ندارد و دارای شروع و رشد مکانیزم‌های خرابی تدریجی و رفتار نیرو-جابجایی غیرخطی می‌باشد.

از سوی دیگر، مقایسه نتایج نمودارهای نیرو-جابجایی و نشر آوایی نشان دادند که روش نشر آوایی قابلیت آشکارسازی خرابی در کامپوزیت‌ها را دارد. به این ترتیب که هر چه خرابی شدیدتری در نمونه‌ها اتفاق می‌افتد، داده‌های نشر آوایی انرژی بیشتری را نشان

با توجه به تصاویر سی‌اسکن، در تمامی نمونه‌ها اطراف ناحیه‌ای که زیر بارگذاری قرار دارد جدایش بین لایه‌ای دیده نمی‌شود و این با نتایج مطالعات قبلی نیز همخوانی دارد^[4,7]. همچنین با توجه به مقادیر جدول ۳ و تصاویر سی‌اسکن، بزرگ‌ترین خرابی در نمونه PS اتفاق افتاده و در نمونه‌های R و IS کمترین مقدار را دارد. در نمونه IS نسبت به نمونه R، با اینکه قطر نفوذگر دو برابر است ولی اندازه ناحیه خرابی تقریباً نزدیک هم می‌باشند. این نشان می‌دهد که هر چه ضخامت نمونه نسبت به ابعاد درون صفحه‌ای کمتر باشد، حساسیت نسبت به آسیب‌های موضعی کمتر است^[8]. این مطلب با مقایسه‌ی نمونه‌ی IS با دو نمونه‌ی PS و SS (با ابعاد درون صفحه‌ای یکسان) نیز تأیید می‌شود چرا که اندازه‌ی خرابی IS با اختلاف چشمگیری پایین‌تر از آن‌هاست.

مقایسه نمونه‌های PS و SS نیز برای مشاهده‌ی تأثیر ضخامت تک لایه‌ها و نوع لایه‌چینی قابل توجه است. زیرا با وجود ضخامت، ابعاد برون صفحه‌ای و قطر نفوذگر یکسان، اختلاف قطر خرابی قابل‌توجهی دارند (حدود دو برابر). پس علاوه بر ضخامت مواد کامپوزیتی، ضخامت تک لایه‌ها و در واقع نحوه لایه‌چینی اهمیت بسزایی در اندازه خرابی به وجود آمده دارد. به این ترتیب هر چه ضخامت لایه‌های تشکیل‌دهنده نازک‌تر می‌شود، با وجود اینکه اصولاً لایه‌های بیشتری درگیر خرابی می‌شوند (به دلیل افزایش تعداد لایه‌های مجاور با زوایای متفاوت)، منتهی اندازه‌ی ناحیه خرابی کمتر می‌شود.

تفاوت رنگ‌ها در تصاویر سی‌اسکن بیانگر عمق‌های مختلف در راستای ضخامت نمونه هستند و نشان می‌دهند که بزرگ‌ترین خرابی‌ها اغلب در لایه‌های نزدیک به مرکز تقارن اتفاق می‌افتند. محل بزرگ‌ترین خرابی در نمونه‌های نازک (R و IS با ضخامت ۲/۴۸ میلی‌متر) در ضخامت حدود ۱/۵ میلی‌متر و در نمونه‌های SS و PS (با ضخامت ۴/۹۶) تقریباً ۳/۵ و ۳ میلی‌متر است. با توجه به مشاهدات سی‌اسکن و چشمی، در لایه‌های رویی خرابی‌ها در مجاور ناحیه ضربه خورده متمرکز بوده و اندازه کوچک‌تری دارند. اما جهت اطمینان از اندازه خرابی در لایه‌های پایین‌تر، تصاویر سی‌تی‌اسکن تهیه شده‌اند (شکل ۱۱ و شکل ۱۲). تصاویر سی‌تی‌اسکن از دو تا از پایین‌ترین بین لایه‌هایی که اختلاف جهت ۹۰ درجه باهم دارند، گرفته شده است. به این دلیل که بزرگ‌ترین جدایش بین لایه‌ای بین لایه‌های با اختلاف زاویه‌ی ۹۰ درجه در مواد کامپوزیتی اتفاق می‌افتد^[4,7]. با توجه به مقیاسی که در تصاویر سی‌تی‌اسکن گذاشته شده است، اندازه قطر خرابی در لایه‌های پایینی نمونه‌های R و IS بسیار کوچک‌تر از بیشینه اندازه خرابی در تصاویر سی‌اسکن می‌باشند. در مورد نمونه‌های PS و SS نیز قطر خرابی از حدود ۳۰ میلی‌متر بیشتر نیست. این در حالی است که تصاویر سی‌اسکن و بررسی چشمی، قطر خرابی را برای هر کدام به ترتیب ۳۳/۱ و ۶۵/۷ میلی‌متر نشان داده‌اند. نتیجه

damage mechanisms of composite laminates under repeated loading. FME Transactions. 2020;48(2):287-93.

7- Fotouhi M, Damghani M, Leong MC, Fotouhi S, Jalalvand M, Wisnom MR. A comparative study on glass and carbon fibre reinforced laminated composites in scaled quasi-static indentation tests. Composite Structures. 2020;245:112327.

8- Martins JP, Carvalho AL, Padilha AF. Microstructure and texture assessment of Al-Mn-Fe-Si (3003) aluminum alloy produced by continuous and semicontinuous casting processes. Journal of Materials Science. 2009;44(11):2966-76.

9- Choi HY, Wang HS, Chang FK. Effect of laminate configuration and impactor's mass on the initial impact damage of graphite/epoxy composite plates due to line-loading impact. Journal of Composite Materials. 1992;26(6):804-27.

10- Beyaoui M, Boussetta H, Laksimi A, Walha L, Haddar M. Experimental Investigation of the Damage Progression in the Filament-Wound Composite by the Acoustic Emission Technique. In International Conference Design and Modeling of Mechanical Systems. Springer, Cham. 2017: 1235-1243.

11- Boussetta H, Beyaoui M, Laksimi A, Walha L, Haddar M. Study of the filament wound glass/polyester composite damage behavior by acoustic emission data unsupervised learning. Applied Acoustics. 2017;127:175-83.

12- Alam MA, Al Riyami K. Shear strengthening of reinforced concrete beam using natural fibre reinforced polymer laminates. Construction and Building Materials. 2018;162:683-96.

13- Fallahi N, Nardoni G, Heidary H, Palazzetti R, Yan XT, Zucchelli A. Supervised and non-supervised AE data classification of nanomodified CFRP during DCB tests. FME Transactions. 2016;44(4):415-21.

14- Mohammadi R, Saeedifar M, Toudeshky HH, Najafabadi MA, Fotouhi M. Prediction of delamination growth in carbon/epoxy composites using a novel acoustic emission-based approach. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2015;34(11):868-78.

15- De Rosa IM, Santulli C, Sarasini F, Valente M. Post-impact damage characterization of hybrid configurations of jute/glass polyester laminates using acoustic emission and IR thermography. Composites Science and Technology. 2009;69(7-8):1142-50.

16- Boominathan R, Arumugam V, Santulli C, Sidhartha AA, Sankar RA, Sridhar BT. Acoustic emission characterization of the temperature effect on falling weight impact damage in carbon/epoxy laminates. Composites Part B: Engineering. 2014;56:591-8.

17- Aoki Y, Suemasu H, Ishikawa T. Damage propagation in CFRP laminates subjected to low velocity impact and static indentation. Advanced Composite Materials. 2007;16(1):45-61.

18- Test S. Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. 2018.

19- "Hexcel pre-preg data sheet." <https://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Pre-preg?IC=Epoxy#>.

می‌دهند. تحلیل داده‌های نشر آوایی با استفاده از تابع سنتری نشان داد که تابع سنتری برای نمونه‌ی SS شیب نزولی بیشتری از نمونه‌ی PS دارد. بنابراین، ایجاد و گسترش خرابی‌ها در نمونه SS با سرعت بالاتری اتفاق می‌افتند (هر چند که ابعاد درون صفحه‌ای و ضخامت کلی یکسان دارند).

بررسی چشمی و تصاویر سی اسکن نیز نشان دادند که اندازه خرابی در نمونه‌ی PS (یا بیشترین ضخامت تک لایه) بسیار بزرگتر از سه نمونه دیگر است. نمونه IS نیز با اینکه ابعاد درون صفحه‌ای و قطر نفوذگر با دو نمونه ضخیم‌تر (SS و PS) یکسان است، ولی اندازه خرابی بسیار کمتری از آن‌ها دارد. بررسی چشمی هر چهار نمونه نشان داد که هر چه ضخامت کلی نمونه نسبت به ابعاد درون صفحه‌ای کمتر باشد، حساسیت کمتری نسبت به آسیب‌های موضعی دارد. تلفیق نتایج سی اسکن و سی‌تی اسکن نیز نشان داد که اغلب، بزرگ‌ترین اندازه خرابی‌ها در لایه‌های زیرین نزدیک‌تر به صفحه تقارن اتفاق می‌افتند.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله از پروژه دکتر سکیه فتوحی با عنوان "مطالعه‌ی پارامترهای موثر بر مکانیزم‌های خرابی ماده کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری شبه استاتیک با استفاده از نشر آوایی" استخراج شده است.

تعارض منافع: هیچ تعارض منافعی بین عوامل مشارکت کننده وجود ندارد.

سهم نویسندگان: تمامی نویسندگان سهم مساوی در مقاله دارند.

منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع

- 1- Bachmann J, Hidalgo C, Bricout S. Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review. Science China Technological Sciences. 2017;60(9):1301-17.
- 2- Shen Y, Jiang B, Li Y. Scale Effect on Impact Performance of Unidirectional Glass Fiber Reinforced Epoxy Composite Laminates. Materials. 2019;12(8):1319.
- 3- Saeedifar M, Najafabadi MA, Zarouchas D, Toudeshky HH, Jalalvand M. Clustering of interlaminar and intralaminar damages in laminated composites under indentation loading using Acoustic Emission. Composites Part B: Engineering. 2018;144:206-19.
- 4- Singhal A, Sahu SA, Chaudhary S. Liouville-Green approximation: An analytical approach to study the elastic waves vibrations in composite structure of piezo material. Composite Structures. 2018;184:714-27.
- 5- Chou CT, Gaur U, Miller B. The effect of microvoid gap width on microbond pull-out test results. Composites science and technology. 1994;51(1):111-6.
- 6- Ali HT, Fotouhi S, Akrami R, Pashmforoush F, Pavlovic A, Fotouhi M. Effect of ply thickness on

- 20- Davijani AB, Hajikhani M, Ahmadi M. Acoustic Emission based on sentry function to monitor the initiation of delamination in composite materials. *Materials & Design*. 2011;32(5):3059-65.
- 21- Gul AM. Exploring the Energetics of Cell Movement via Finite Element Analysis (Doctoral dissertation, Lehigh University).
- 22- Minak G, Morelli P, Zucchelli A. Fatigue residual strength of circular laminate graphite-epoxy composite plates damaged by transverse load. *Composites Science and Technology*. 2009;69(9):1358-63.
- 23- Shivakumar KN, Elber W, Illg W. Prediction of impact force and duration due to low-velocity impact on circular composite laminates. 1985:674-680.