



Estimating the Residual Strength of Polyurethane Foam Core Sandwich Panels with Fiber Glass- Polyester Skin Using Acoustic Emission

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Zakizadeh A.M.¹ MSc,
Hamzeloo S.R.*¹ PhD,
Refahi Oskouei A.¹ PhD

How to cite this article

Zakizadeh A.M, Hamzeloo S.R, Refahi Oskouei A. Estimating the Residual Strength of Polyurethane Foam Core Sandwich Panels with Fiber Glass- Polyester Skin Using Acoustic Emission. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(3):587-596.

ABSTRACT

Today, application of polymeric composites and sandwich panels has increased in the industry due to their lower weight to volume ratio and also better mechanical properties in comparison with metals used in automotive and marine industries in diverse structures. Detection of failure initiation and examination of failure mechanism in composites, especially for sandwich, panels are state of art. In this research, the Acoustic Emission (AE), as a non-destructive testing method, was applied to estimate the residual strength of the polyester/glass fiber sandwich panel with polyurethane foam with 3 different lay-up techniques. Sandwich panels were placed in 3 different energy levels under a low velocity impact and, then, with a three-point bending test, their bending strength was evaluated using the acoustic Emission. By simultaneously analyzing the acoustic data and examining the force-displacement diagrams obtained from the bending test and their correlation, the remained strength of the sandwich panels, priorly damaged by impacts of different energy levels, is estimated. For this purpose, the accumulated acoustic energy during bending and strain energy from the force-displacement diagrams have been used to calculate the recently presented Sentry function of pre-damaged samples to compare with a virgin case without previous defect. The results show that there is a direct relationship between Sentry function data as a new indicator of residual strength and accumulated energy of acoustic data that contains the effects of various failure mechanisms. In the largest destroyed sample with fiber layout of 90 and 45 degrees with respect to bending direction containing a maximum pre-impact of 60 Jules, the highest strength drop was up to 27% compared to the virgin sample.

Keywords Acoustic Emission; Sandwich Panel Composite; Remaining Strength; Pre-damage Impact, Bending

¹Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Shahid Rajaei Teacher Training University, Lavizan, Tehran, Iran.
Phone: +98 (21) 22970052
Fax: +98 (21) 22970056
rehamzeloo@sru.ac.ir

Article History

Received: April 05, 2018
Accepted: April 21, 2018
ePublished: March 01, 2019

CITATION LINKS

[1] single-edge-notched laminated composites based on the high amplitude acoustic emission events [2] Acoustic emission characteristics of mode I delamination in glass/polyester composites [3] Interlaminar fracture characterization in composite materials by using acoustic emission [4] Study of residual tensile strength in drilled composite laminates by acoustic emission [5] Mechanical behavior and acoustic emission technique for detecting damage in sandwich structures [6] Damage monitoring of aluminum sheet repaired with fiber metal laminate patch by acoustic emission [7] Analysis and detection of failure in aluminum/E-glass prepreg interface with acoustic emission [8] Investigation of initiation and evolution of delamination in glass/epoxy laminated composites using acoustic emission method [9] Characterization of indentation damage resistance of hybrid composite laminates using acoustic emission monitoring [10] Damage evaluation and residual strength prediction of CFRP laminates by means of acoustic emission techniques [11] The Science and Engineering of Materials [12] E-Glass Fibre

تخمین استحکام باقی مانده ساندویچ پانل‌های پلیمری الیاف شیشه- پلی‌استر با هسته فوم پلی‌اورتان به کمک آکوستیک امیشن

امیرمحمد زکی زاده MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

سیدرضا حمزه‌لو PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

امیررفاهی اسکویی PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

امروزه کاربرد کامپوزیت‌های پایه پلیمری و ساندویچ پانل‌ها به علت وزن پایین‌تر و خواص مکانیکی بهتر نسبت به فلزات در صنایع مختلفی مانند خودروسازی و صنایع دریایی رو به افزایش است. تشخیص شروع شکست و بررسی مکانیزم شکست در کامپوزیت‌ها و به خصوص ساندویچ پانل‌ها از موارد به روز تحقیق است. در این پژوهش از روش آزمون غیرمخرب آکوستیک امیشن برای تخمین استحکام باقی مانده ساندویچ پانل کامپوزیتی پلی‌استر/الیاف شیشه با فوم پلی‌اورتان با سه نوع لایه‌چینی مختلف استفاده شده است. نمونه‌های ساندویچی تحت ضربه سرعت پایین در سه سطح انرژی مختلف قرار گرفته و سپس با استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای استحکام خمشی آنها با بهره‌گیری از آکوستیک امیشن مورد ارزیابی قرار گرفته است. با تحلیل همزمان داده‌های آکوستیک و نمودارهای نیرو- جابه‌جایی در آزمون خمش و ارتباط آنها، تخمین استحکام باقی مانده‌ای از ساندویچ پانل‌هایی که از ضربات با انرژی‌های مختلف دچار پیش‌آسیب شده‌اند، به دست آمده است. بدین منظور از انرژی انباشته آکوستیک حین خمش و تابع سنتری به دست آمده از نمودارهای نیرو- جابه‌جایی استفاده شده و با مقایسه با نمونه سالم و بدون پیش‌عیب صحت‌گذاری شده است. بررسی نتایج تجربی آزمون خمش ارتباط دقیق مابین داده‌های تابع سنتری به عنوان شاخص جدید استحکام باقی مانده و انرژی انباشته داده‌های آکوستیک که حاوی اثرات مکانیزم‌های مختلف شکست است را نشان داد. در مقایسه با نمونه با لایه چینی ترکیبی عمود بر هم ۹۰ درجه و زاویه‌دار ۴۵ درجه با حداکثر پیش‌ضربه ۶۰٪، ۲۷٪ را نشان داد. بیشترین افت استحکام معادل ۲۷٪ را نشان داد.

کلیدواژه‌ها: آکوستیک امیشن، کامپوزیت ساندویچ پانل، استحکام باقی مانده، پیش‌آسیب ضربه، خمش

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۲/۰۱

*نویسنده مسئول: rehamzeloo@sru.ac.ir

۱- مقدمه

ساندویچ پانل‌ها به خاطر وزن سبک، استحکام خمشی بالا و خواص مقاوم در برابر خستگی، بیش از ۴۰ سال است که در صنعت هوافضا و از چندی پیش به عنوان سازه‌های مقاوم در ساختمان‌ها به کار گرفته شده‌اند. وجود هسته‌هایی از خانواده پلیمری مانند پلی‌اورتان، پلی‌استایرن و غیره که دارای ساختار سلولی هستند، باعث شده است تا ساندویچ پانل‌ها به عنوان جاذب انرژی نیز عمل کنند. در مواردی که بارگذاری پیوسته با مقادیر نیروی بالایی وجود دارد، می‌توان از ساندویچ پانل‌های پلیمری استفاده نمود. به همین دلیل تخمین استحکام باقیمانده ساندویچ پانل‌ها برای تحمل تنش‌ها و بارگذاری‌های پیوسته از اهمیت بالایی برخوردار است. در این ارتباط مطالعات زیادی برای به دست آوردن استحکام باقیمانده روی سازه‌های کامپوزیتی و ساندویچ پانل‌ها با روش‌های مختلف تجربی، شبیه‌سازی عددی و غیره به انجام رسیده است. از آنجایی

که در کار حاضر، هدف مطالعه ارتباط بین داده‌های آکوستیک با داده‌های مکانیکی و استحکام باقیمانده در این قطعات بوده، لذا به مطالعه کارهای انجام شده قبلی در این حوزه بیشتر پرداخته شد که در زیر به این پژوهش‌ها اشاره شده است:

وو و چوی در سال ۲۰۰۷ با هدف مطالعه آنالیز فرآیند شکست در کامپوزیت‌های چندلایه چاک‌دار با لایه‌چینی‌های متفاوت از آکوستیک امیشن استفاده کرده‌اند. نتایج آنها نشان داد که مسیر نهایی ترک اصلی با جهت‌گیری الیاف منطبق است [1].

رفاهی/اسکویی و احمدی در سال ۲۰۱۰، رشد جدایش بین‌لایه‌ای را در نمونه شیشه/پلی‌استر تحت بارگذاری مود I بررسی نمودند. با استفاده از تبدیل فوریه مشخص شد که در لحظه آغاز رشد جدایش بین‌لایه‌ای، سیگنال‌های آکوستیک امیشن دارای محدوده فرکانسی ۲۵۰-۱۲۵ کیلوهرتز بوده که متناظر با ترک خوردگی ماتریس است. اما با آغاز رشد جدایش بین‌لایه‌ای، محدوده فرکانسی ۳۲۰-۲۵۰ و ۴۵۰-۳۵۰ کیلوهرتز بوده است که متناظر با جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف هستند [2].

سیلورساید و همکاران در سال ۲۰۱۳ از روش آکوستیک امیشن و المان محدود برای تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی استفاده نمودند که تحت بارگذاری مود I، II و مود ترکیبی I و II قرار داشتند. نتایج حاصل از روش آکوستیک امیشن، حد پایین مقادیر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای را ارائه می‌دهد [3].

ظریف‌کریمی و همکاران در سال ۲۰۱۴، پایش استحکام کاهش یافته قطعات کامپوزیتی سوراخ شده توسط روش آکوستیک امیشن را مطالعه کردند. طبق نتایج، نرخ پیشروی به عنوان مهم‌ترین عامل شناسایی شد و محدوده فرکانسی شکست ماتریس ۱۲۵-۶۲/۵ کیلوهرتز، لغزش الیاف ۲۵۰-۳۱۲/۵ کیلوهرتز و شکست الیاف ۳۷۵-۳۱۲/۵ کیلوهرتز محاسبه شد [4].

بن‌آمر و همکاران در سال ۲۰۱۴، رفتار مکانیکی و تکنیک آکوستیک امیشن به منظور تشخیص عیوب در ساندویچ پانل‌ها را مطالعه کردند. دو عدد ساندویچ پانل با لایه‌چینی‌های مختلف به عنوان پوسته و جنس فوم از PVC با چگالی ۶۰ و ۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب ساخته شده‌اند. به منظور ایجاد عیب در نمونه‌ها فوم‌ها تحت تعداد مختلف برش‌های زاویه‌دار قرار گرفتند، به نحوی که چگالی عیوب در آنها متفاوت بود. در این بین از آزمون آکوستیک نیز برای تشخیص و مشخصه‌بندی محل عیوب در دو نوع ساندویچ پانل حین بارگذاری خمش چهار نقطه استفاده شد [5].

احمدی نجف‌آبادی و همکاران در سال ۲۰۱۵ پایش خرابی ورق آلومینیوم 2024-T3 ترمیم شده با وصله چندلایه‌ای فلز الیاف با آکوستیک امیشن را بررسی کردند. آنها نمونه‌ها را به ۴ دسته با توجه به زاویه ترک صفر و ۴۵ درجه (حالت ترمیم شده و نشده) تقسیم‌بندی کردند. با استفاده از مجموع انرژی امواج آکوستیک امیشن، شروع و رشد بحرانی جدایش شناسایی شده است [6].

احمدی نجف‌آبادی و همکاران در سال ۲۰۱۴ آنالیز و پایش شروع خرابی در اتصالات آلومینیوم/کامپوزیت با استفاده از آکوستیک امیشن را انجام دادند و تشخیص لحظه شروع خرابی، نیروی بحرانی و به تبع آن چقرمگی شکست محاسبه شد و مدل‌سازی براساس مقادیر چقرمگی شکست به دست آمده صورت پذیرفت [7].

سعیدی‌فر و همکاران در سال ۲۰۱۷ به ایجاد جدایش بین‌لایه‌ای و پیش‌بینی منحنی رشد آن در چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با روش آکوستیک امیشن پرداختند. نتایج حاصل نشان‌دهنده عملکرد مطلوب روش آکوستیک امیشن در بررسی



شکل (۱) نمای کلی ساندویچ پانل‌ها به همراه فرآیند ساخت

۲-۲- طرح لایه‌چینی و نحوه کدگذاری نمونه‌ها

همان طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، ساندویچ پانل‌ها دارای ۴ نوع لایه‌چینی با نام‌های S1، S2 و S3 هستند که در اینجا S مخفف نمونه است. در بخش‌های بعد در آزمون ضربه روی هر یک از نمونه‌ها ضربه با انرژی ۲۰، ۳۸ و ۶۰ ژول اعمال می‌شود، لذا برای هر یک از نمونه‌ها نحوه کدگذاری به شرح S1-20، S2-38، S3-60 و غیره است که قسمت اول هر کد بیانگر نوع لایه‌چینی و قسمت دوم بعد از خط تیره بیانگر مقدار انرژی ضربه وارد شده به نمونه است.

۲-۳- آزمون ضربه

آزمایش ضربه سرعت پایین با استفاده از دستگاه سقوط آزاد وزنه انجام شد که نمای کلی آن در شکل ۲ آمده است و در این آزمون از سنبه ضربه‌زننده سرکروی با قطر ۱۶ میلی‌متر استفاده شد. همان طور که گفته شد، ساندویچ پانل‌ها بعد از ساخت اولیه به ابعاد ۲۰ در ۲۰ سانتی‌متر برش داده می‌شوند و با فیکسچرهایی با ابعاد ۳۰ در ۳۰ سانتی‌متر و ابعاد فضای باز ۱۵ در ۱۵ سانتی‌متر توسط گیره در موقعیت خود ثابت نگه داشته می‌شوند. بدین منظور سه نوع انرژی ضربه با مقادیر مختلف ۲۰، ۳۸ و ۶۰ ژول برای هر یک از سه نمونه از هر نوع لایه‌چینی مختلف (۳ نوع لایه‌چینی) تعیین شد، یعنی در مجموع ۹ آزمون ضربه صورت گرفت.



شکل (۲) دستگاه آزمون ضربه به همراه مهارکردن قطعه توسط فیکسچر و کلمپ

۲-۴- آزمون خمش

بعد از آزمون ضربه و ایجاد آسیب دیدگی در نمونه‌ها برای تخمین استحکام خمشی نمونه‌ها، ساندویچ پانل‌ها تحت بارگذاری خمش سه نقطه قرار داده شدند. در ابتدا برای اعمال بهتر گشتاور خمشی به قطعات که در ابتدا به صورت مربعی بودند، به صورت مستطیلی به ابعاد ۷ سانتی‌متر در ۲۰ سانتی‌متر برش زده شدند. بعد از برش، نمونه‌ها مطابق با شکل ۳ روی تکیه‌گاه (فک)‌های ثابت دستگاه خمش قرار داده شدند. در این آزمایش از دستگاه انیورسال مجهز به سیستم بال اسکرو که عملکرد آن به صورت جابه‌جایی ثابت و ماکزیمم تناژ آن ۵ تن بوده، استفاده شده است. بعد از تنظیم قطعات روی تکیه‌گاه دستگاه خمش، سنبه خمش، بار خمشی را با نرخ پیشروی ۱۰ میلی‌متر/دقیقه بر نمونه وارد می‌کند و در عین حال

رفتار آغاز، گسترش خرابی بین‌لایه‌ای و پیش‌بینی منحنی رشد جدایش بین‌لایه‌ای در نمونه‌های کامپوزیتی است [8].
سورس کومار و همکاران در سال ۲۰۱۷، مشخصه مقاومت در برابر ضربات کامپوزیت‌های هیبریدی با استفاده از پایش سیگنال‌های آکوستیک امیشن را بررسی کردند. همچنین از تابع سنتری برای بررسی آسیب اعمال شده در نمونه استفاده کردند که در نهایت نتایج نشان داد ترکیب شیشه و الیاف کربن موجب بهبود استحکام برشی بین‌لایه‌ای در یک حد مناسب نسبت به سایر پیکره‌بندی‌ها می‌شود [9].

همان طور که در پیشینه تحقیقات مشاهده شد، روش غیرمخرب آکوستیک ابزاری مفید برای تشخیص و بررسی مکانیزم‌های مختلف شکست در نمونه‌های کامپوزیتی بوده، اما پژوهش‌های شایان ذکری در مورد تخمین استحکام باقیمانده و بررسی آسیب ساندویچ پانل‌های پلیمری از طریق آزمون غیرمخرب آکوستیک امیشن صورت نگرفته است. بدین منظور در این مقاله سعی شده است تا از طریق روش آکوستیک امیشن و بررسی آسیب بتوان به تخمین استحکام باقیمانده ساندویچ پانل پلیمری شیشه/پلی‌استر با فوم پلی‌اورتان در خمش پرداخته شود.

در این پژوهش ساندویچ پانل‌هایی با ۳ نوع لایه‌چینی مختلف و از هر نوع ۴ عدد (جمعاً ۱۲ نمونه) تهیه شده و از هر نوع لایه‌چینی یک نمونه سالم باقی مانده است و برای سه نمونه دیگر به منظور ایجاد پیش‌عیب در آنها، آزمون‌های ضربه با مقادیر انرژی ۲۰، ۳۸ و ۶۰ ژول اعمال شد. بعد از آزمون پیش‌ضربه، نمونه‌ها تحت بارگذاری خمشی سه نقطه (به همراه جانمایی سنسورهای آکوستیک روی نمونه‌ها) قرار گرفته‌اند و مقایسه مقادیر خواص خمشی و استحکام باقیمانده نمونه‌ها از دو دیدگاه لایه‌چینی‌های یکسان و مقادیر انرژی‌های مختلف پیش‌ضربه و همچنین مقادیر انرژی‌های پیش‌ضربه یکسان و لایه‌چینی‌های مختلف با بررسی داده‌های سنسورهای آکوستیک و داده‌های مکانیکی انجام خواهد شد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- فرآیند ساخت ساندویچ پانل‌ها

در این بخش تعداد نمونه‌ها، جنس هسته، لایه‌ها و نحوه لایه‌چینی هر نمونه ساندویچ پانل شرح داده می‌شود. در ابتدا مطابق با شکل ۱، سه نمونه ساندویچ پانل با ابعاد ۴۰ در ۴۰ سانتی‌متر که لایه‌های دو طرف ساندویچ پانل با رزین پلی‌استر به عنوان فاز زمینه و تقویت شده با الیاف شیشه به صورت لایه‌گذاری دستی روی صفحات قالب کامپوزیت ساخته شد و جنس هسته وسط نیز از فوم پلی‌یورتان بود.

۳ عدد ساندویچ پانل ۴۰ در ۴۰ سانتی‌متر با ۳ نوع لایه‌چینی مختلف نشان داده شده در جدول ۱ در اختیار قرار گرفته شد. در مرحله بعد هر یک از نمونه‌های ۴۰ در ۴۰ سانتی‌متر به ۴ عدد ۲۰ در ۲۰ سانتی‌متر برش زده شد. علت این برش‌ها به دلیل نیاز به ۴ عدد نمونه از هر ۳ نوع لایه‌چینی متفاوت برای آزمون ضربه با انرژی‌های متفاوت است که در مجموع ۱۲ نمونه کامپوزیتی ساندویچ پانل به دست آمد.

جدول (۱) طرح لایه‌چینی با زوایای مختلف برای نمونه‌های ساندویچ پانل

کد نمونه	طرح لایه‌گذاری					
S1	۰	۹۰	۰	۹۰	هسته	۰
S2	۰	۹۰	۰	۹۰	هسته	۰
S3	۰	۹۰	۰	۹۰	هسته	۰

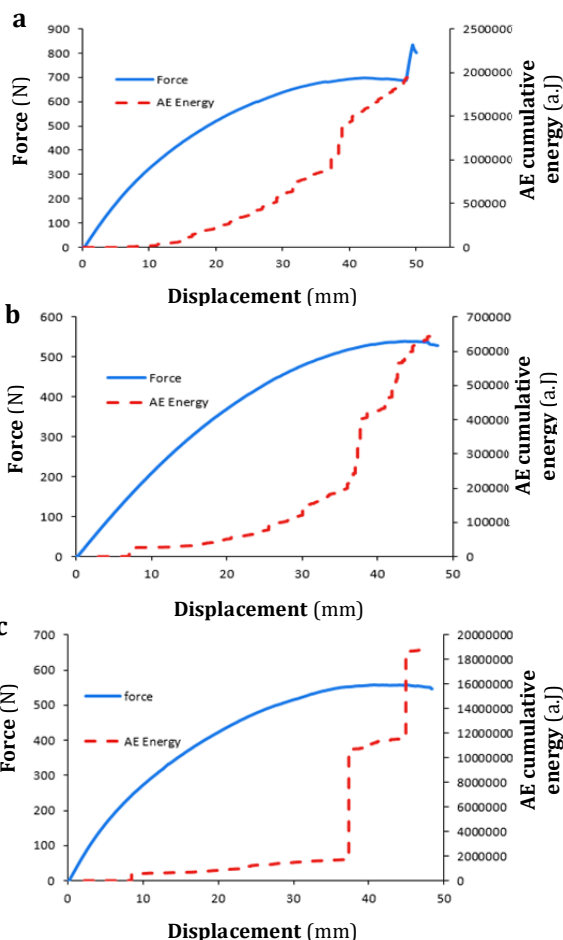
نشان می‌دهد و برای مطالعه کامپوزیت‌ها در کارکردهای مختلف از جمله توصیف پیشرفت خرابی در بارگذاری‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تابع به صورت لگاریتم طبیعی نسبت انرژی کرنشی (E_s) به انرژی انباشته آکوستیک (E_a) در جابه‌جایی ثابت (X) مطابق با رابطه ۲ بیان می‌شود [10]:

$$f(x) = \ln\left(\frac{E_s}{E_a}\right) \quad (2)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نمودارهای نیرو- جابه‌جایی و انرژی آکوستیک تجمعی- جابه‌جایی برای نمونه‌های ساندویچ پانل

در این بخش نمودار نیرو- جابه‌جایی و انرژی آکوستیک تجمعی نمونه‌های S1 با پیش‌آسیب‌های ناشی از ضربه‌های متفاوت ارائه شده است. در نمودار ۲- a در نمونه S1-20، ماکزیمم نیروی خمشی به ۷۰۰ نیوتون نیز می‌رسد، اما این بیشینه نیرو برای نمونه‌های S1-38 و S1-60 به مقدار ۵۵۰ نیوتون رسیده است که این امر نشان از کاهش استحکام خمشی نمونه در اثر نیروی ضربه پیشین دارد. همچنین مقدار انرژی آکوستیک انباشته در نمونه‌های S1-20 و S1-38 کمتر از نمونه S1-60 است که این موضوع نیز نشان‌دهنده آن بوده که در نمونه پیش‌آسیب‌دیده با انرژی ضربه ۶۰ ژول در اثر بارگذاری خمشی، مکانیزم‌های آسیب بیشتری (به علت استحکام کمتر و آسیب‌دیدگی‌های از قبل الیاف در این نمونه ناشی از آزمون ضربه) فعال شده است.

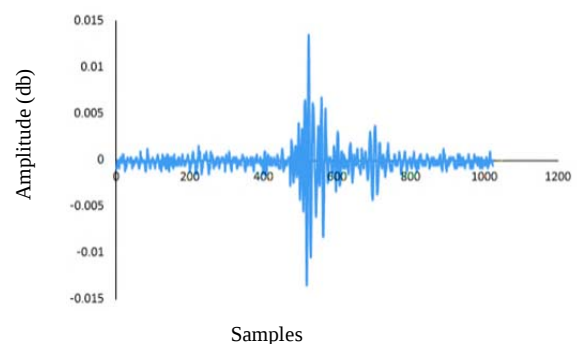


نمودار (۲) نمودار نیرو- جابه‌جایی و انرژی آکوستیک تجمعی نمونه‌های ساندویچ پانل S1: (a) S1-20، (b) S1-38، (c) S1-60

سنسورهای آکوستیک که در وسط اضلاع عرضی مستطیل نمونه و به فاصله تقریبی ۱۰ سانتی‌متر از هم قرار داشتند، جاسازی شدند و سیگنال‌های صوتی را دریافت کردند (شکل ۳). در نمودار ۱، نمونه سیگنال صوتی دریافت‌شده توسط سنسور آکوستیک از نمونه S1-20 در لحظه ۳۴/۰۵ ثانیه از شروع آزمون خمش نمایش داده شده است.



شکل (۳) یکی از نمونه ساندویچ پانل‌ها حین بارگذاری خمشی



نمودار (۱) نمونه سیگنال آکوستیک دریافت‌شده حین آزمون خمش از ساندویچ پانل

برای ثبت داده‌های آکوستیک امیشن حین آزمایش‌ها، از سیستم آکوستیک امیشن دوکاناله به همراه نرم‌افزار AEWIn و سیستم PCI-2 با نرخ داده‌برداری ۴۰ MS/sec استفاده شد. از دو سنسور پیزوالکتریک تک‌کریستال با پهنای باند وسیع به نام پیکو، محصول کمپانی پک استفاده شد. فعالیت‌های شناسایی‌شده توسط سنسور به وسیله پیش‌تقویت‌کننده با ضریب ۴۰ دسی‌بل تقویت شدند. در تمامی مراحل آزمون خمش، سه نقطه از آزمون شکست نوک مداد به منظور تعیین موقعیت مناسب برای سنسورها استفاده شد.

۲-۵- روش تحلیل داده‌های آکوستیک

در این بخش روابط مورد استفاده برای تحلیل داده‌های آکوستیک ارائه می‌شود.

۲-۵-۱- انرژی تجمعی آکوستیک

یکی از پارامترهای موج که می‌تواند معیار مناسبی برای تخمین مقدار آسیب واردشده به قطعات باشد، انرژی تجمعی آکوستیک به دست‌آمده از هر نمونه سیگنال دریافتی است.

$$E_{ai} = \sum_{n=1}^i (e_i) \quad (1)$$

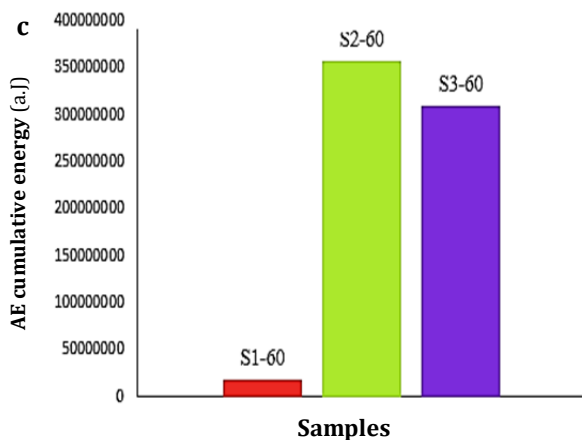
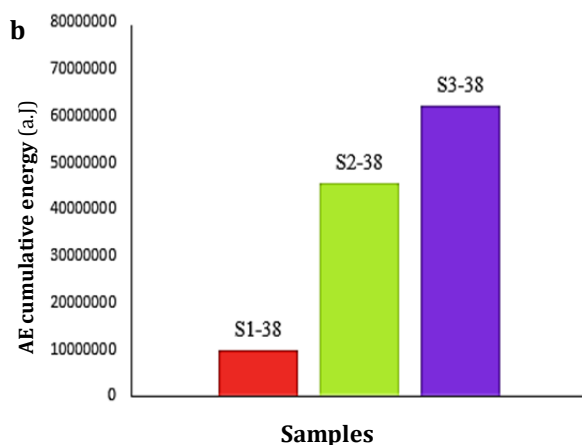
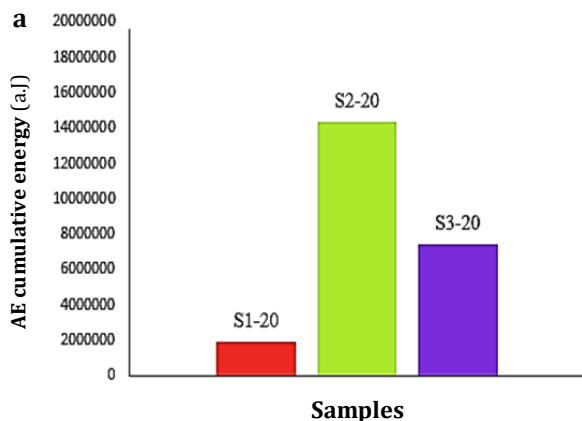
در این رابطه e_i انرژی آکوستیک در یک نمونه سیگنال دریافتی در یک زمان خاص است.

۲-۵-۲- تابع سنتری

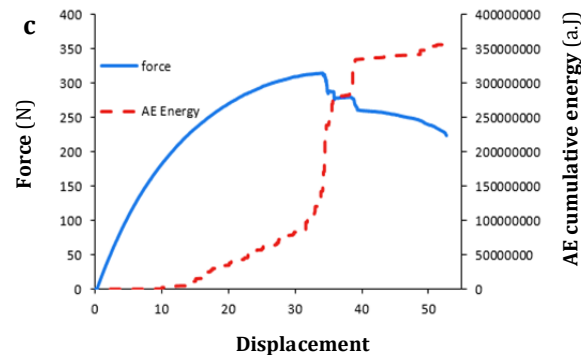
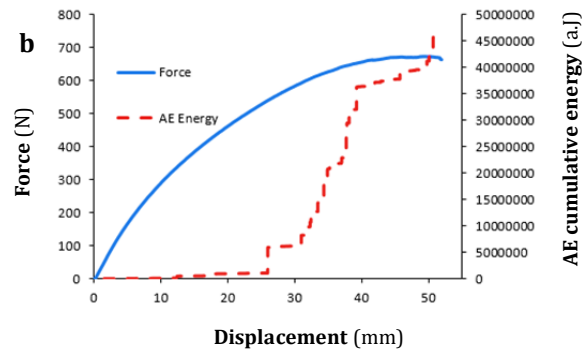
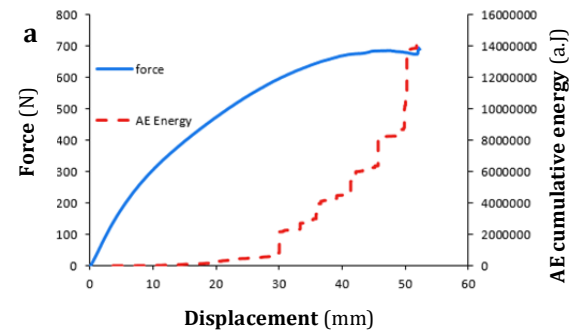
تابع سنتری $f(x)$ ، تابع سنتری تعادل پیوسته‌ای را بین انرژی کرنشی ذخیره‌شده و انرژی آکوستیک آزادشده مربوط به خرابی

تخمین استحکام باقی‌مانده ساندویچ پانل‌های پلیمری الیاف شیشه-پلی‌استر با هسته فوم... ۵۹۱

S3-20 و S3-38 به بیشینه نیروی بیشتری (۴۵۰ نیوتون) رسیده و می‌توان از این امر نتیجه گرفت که آزمون ضربه‌ای که موجب تخریب نمونه‌ها شده، تا حدی موجب افزایش استحکام خمشی ساندویچ پانل‌ها شده است. علت این امر را می‌توان به نوع الیاف به‌کاررفته مرتبط دانست، به‌نحوی که در این الیاف شیشه E-Glass در اثر ضربه وارده کار سختی یا کرنش سختی قبلی به وجود آمده و به‌علت میزان خاصیت مومسانی این الیاف، این کرنش سختی موجب تردی آنها نشده و فقط باعث افزایش استحکام کششی (در خمش) برای آنها شده است^[11].



نمودار ۴) مقدار انرژی آکوستیک انباشته برای نمونه‌ها با انرژی پیش‌ضربه یکسان- لایه‌چینی‌های مختلف ۲۰، ۳۸ و ۶۰ ژول؛ (a) ۲۰ ژول، (b) ۳۸ ژول، (c) ۶۰ ژول

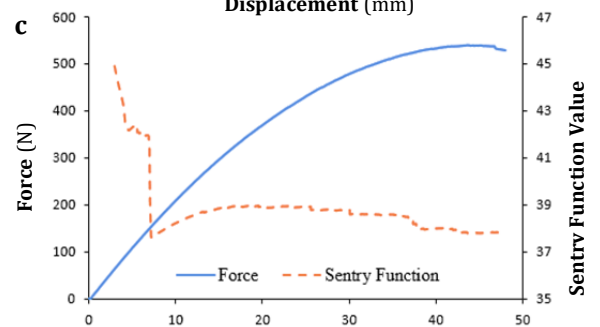
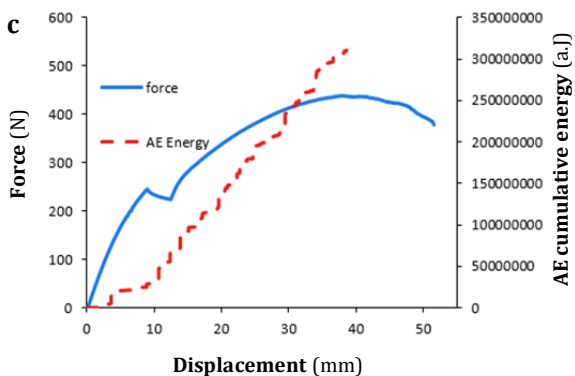
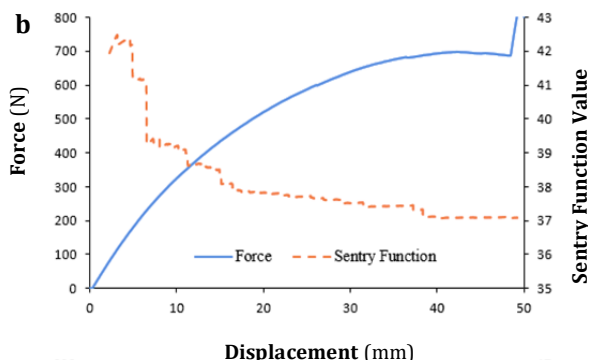
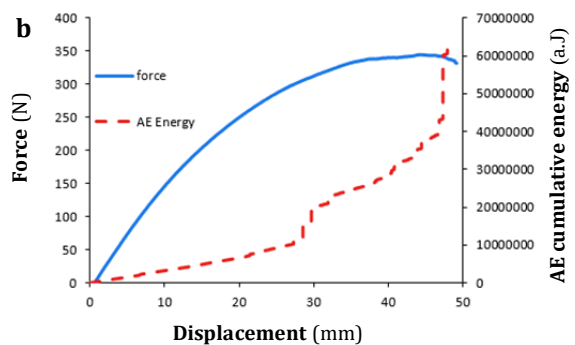
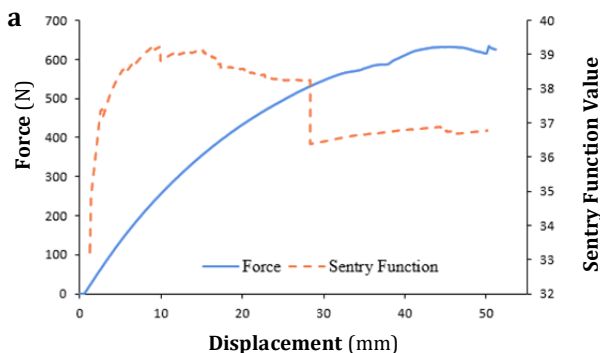
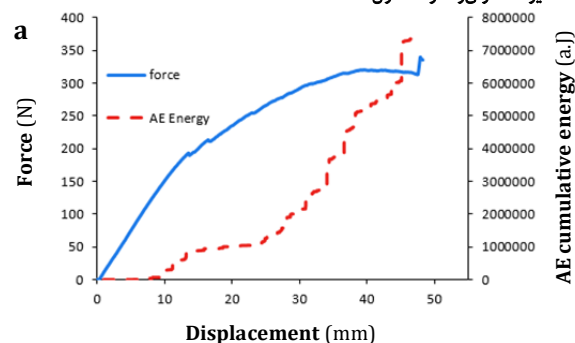


نمودار ۳) نمودار نیرو- جابه‌جایی و انرژی آکوستیک تجمعی نمونه‌های ساندویچ پانل S2: (a) S2-20، (b) S2-38، (c) S2-60

در نمودار ۳ نیز نمودار نیرو- جابه‌جایی و انرژی آکوستیک تجمعی این بار برای نمونه‌های با لایه‌چینی S2 برای انرژی‌های پیش‌ضربه متفاوت آورده شده است. طبق نمودار ۴، در نمونه‌های S2-20 و S2-38 ماکزیمم نیرو تا ۷۰۰ نیوتون نیز می‌رسد (S2-38 قدری پایین‌تر از ۷۰۰ نیوتون)، ولی این ماکزیمم نیرو برای نمونه S2-60 حداکثر به ۳۳۰ نیوتون می‌رسد که باز هم نشانگر افت استحکام خمشی در نمونه‌های آسیب‌دیده است. همچنین انرژی آزادشده آکوستیک در نمونه S2-60 به مراتب بالاتر از نمونه‌های با پیش‌ضربه ۲۰ و ۳۸ ژول بوده که بیانگر وقوع مکانیزم‌های شکست بیشتر در نمونه است.

در نمودار ۵، نمودار نیرو- جابه‌جایی و انرژی آکوستیک تجمعی برای نمونه‌های با لایه‌چینی S3 برای مقادیر پیش‌ضربه مختلف با هم مقایسه شده‌اند. انرژی آکوستیک آزادشده در نمونه‌های S3-38 و S3-60 به مراتب بالاتر از S3-20 بوده که نشانگر وقوع مکانیزم‌های بیشتر شکست در این نمونه‌های آسیب‌دیده (به‌علت کاهش استحکام خمشی در اثر ضربه) نسبت به نمونه‌های سالم‌تر است. در نمونه S3-60، انرژی تجمعی روند صعودی خود را از همان ابتدا آغاز می‌کند. همان‌طور که در نمودار ۵ مشاهده می‌شود، منحنی نیروی خمشی نمونه S3-60 نسبت به نمونه‌های

دچار روند افزایشی قابل ملاحظه‌ای می‌شوند که بعد از رخداد عیبی بزرگ در نمونه‌ها همانند شکست رزین یا شکست فوم است. مابقی بارگذاری خمشی توسط الیاف شیشه تحمل می‌شود و در نمونه S1 چیدمان الیاف شیشه به‌علت موازی و هم‌راستایی با جهت بارگذاری خمشی، تحت حداکثر نیرو و تنش کششی قرار می‌گیرد و از آنجایی که الیاف شیشه دارای استحکام کششی بالایی نسبت به استحکام در برش است^[12]، لذا در نمونه‌های S1 این نوع لایه‌چینی باعث افزایش استحکام خمشی و ظرفیت انرژی کرنشی و صعودی شدن تابع سنتری می‌شود.



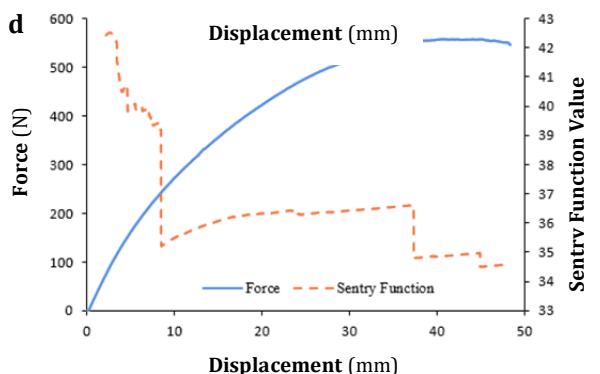
نمودار ۵) نمودار نیرو- جابه‌جایی و انرژی آکوستیک تجمعی نمونه‌های ساندویچ پانل S3: (a) S3-20، (b) S3-38، (c) S3-60

۳-۲- مقایسه میزان انرژی تجمعی آکوستیک آزاد شده نمونه‌های ساندویچ پانل در آزمون خمشی

در این بخش به میزان انرژی تجمعی آکوستیک آزاد شده نمونه‌ها پرداخته شده است و با این معیار بود که هر چه انرژی آزاد شده کمتر باشد، نشان از بروز مکانیزم‌های شکست کمتر و در نتیجه استحکام بالاتر قطعاً دارد. با مقایسه نمودارهای ۴ متوجه می‌شویم که میزان انرژی تجمعی آکوستیک آزاد شده از کمترین به بیشترین به ترتیب متعلق به نمونه‌های S1، S2 و S3 بوده و بدین معناست که نمونه S1 کمترین مکانیزم شکست و نمونه S2 بیشترین آسیب و مکانیزم شکست را داشته است. همچنین استحکام بیشتر S3 نسبت به S2 به‌علت مقدار کمتر انرژی آکوستیک آزاد شده بهتر مشهود است.

۳-۳- ترسیم تابع سنتری برای تمامی نمونه‌های تحت آزمون خمشی

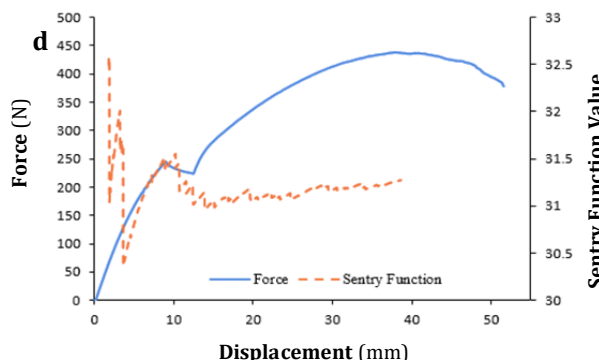
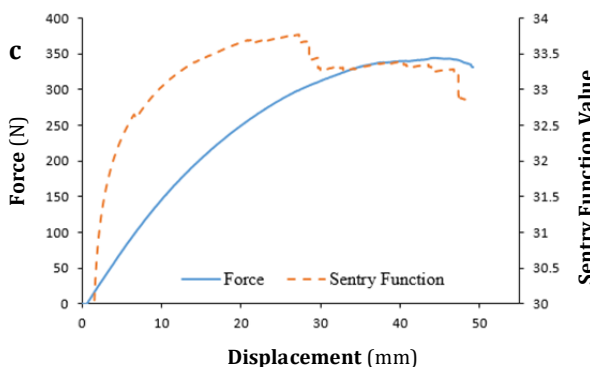
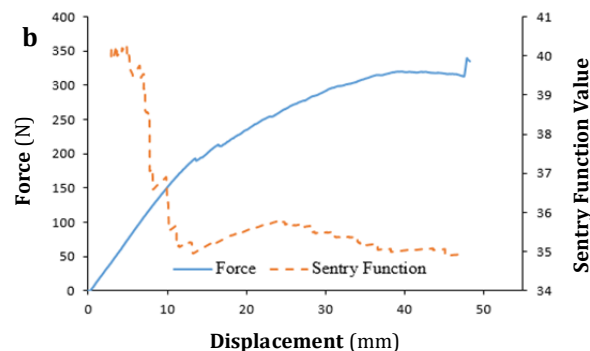
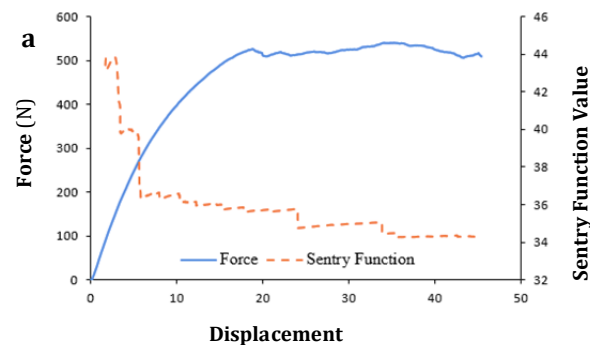
در این بخش به ترسیم نمودار تابع سنتری به کمک رابطه ۲ برای تمامی نمونه‌ها و مقایسه آنها با یکدیگر پرداخته می‌شود. همان طور که در نمودار ۶ قابل مشاهده است، تابع سنتری در موارد a، c و d که تقریباً روند مشابه به هم دارند، پس از افت ناگهانی



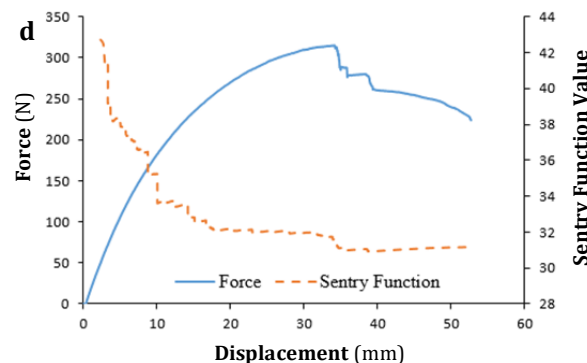
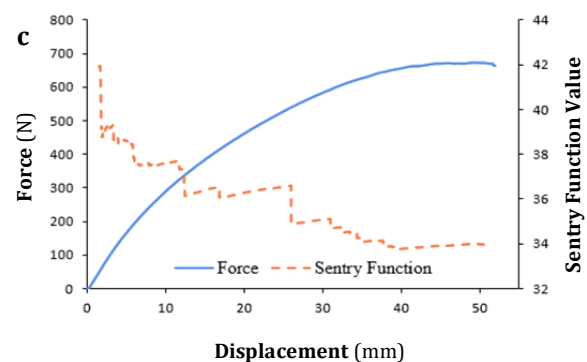
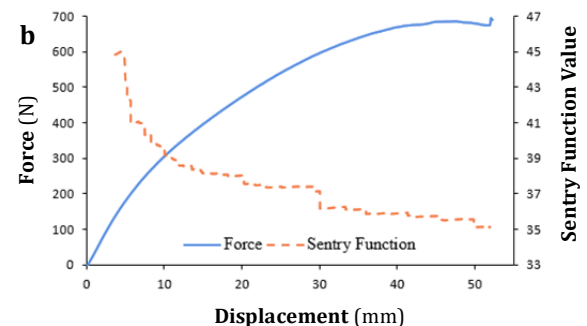
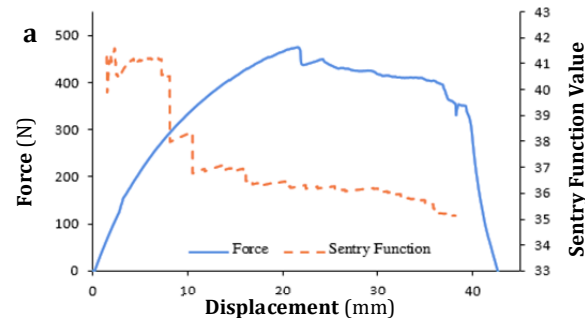
نمودار ۶) نمودار نیرو- جابه‌جایی به همراه مقادیر تابع سنتری برای نمونه‌های ساندویچ پانل با لایه‌چینی S1: (a) S1-0، (b) S1-20، (c) S1-38، (d) S1-60

تخمین استحکام باقی‌مانده ساندویچ پانل‌های پلیمری الیاف شیشه-پلی‌استر با هسته فوم... ۵۹۳

در نمودار ۸- b، نمونه S3-20 در نمودار تابع سنتری بعد از افت ناگهانی، روند صعودی و ذخیره انرژی کرنشی قابل مشاهده است. در نمونه S3-38، نمودار تابع در همان ابتدای جابه‌جایی روند صعودی و سپس ثابتی داشته، اما مقادیر عددی تابع در محدوده پایین‌تری نسبت به موارد a و b قرار دارد که حاکی از استحکام پایین‌تر قطعه است. در مورد نمونه S3-60، نمودار تابع سنتری در ابتدا دارای افت بسیار ناگهانی و سپس روند افزایشی و ثابت بوده، اما محدوده مقادیر تابع به علت استحکام پایین ناشی از آسیب‌های ضربه قبلی پایین‌تر از دیگر نمونه‌ها در نمودار ۸ است.



نمودار ۸ نمودار نیرو- جابه‌جایی به همراه مقادیر تابع سنتری برای نمونه‌های ساندویچ پانل با لایه چینی S3: (a) S3-0، (b) S3-20، (c) S3-38، (d) S3-60



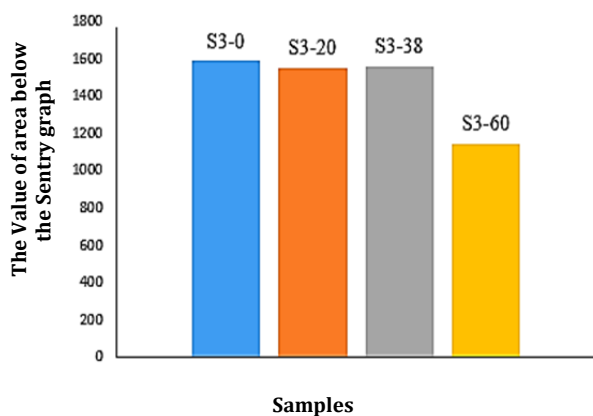
نمودار ۷ نمودار نیرو- جابه‌جایی به همراه مقادیر تابع سنتری برای نمونه‌های ساندویچ پانل با لایه چینی S2: (a) S2-0، (b) S2-20، (c) S2-38، (d) S2-60

در نمودار ۷، برای نمونه‌های S2 توابع سنتری در موارد b و d تقریباً مشابه به هم هستند، با این تفاوت که در مورد d نسبت به b تابع سنتری در جابه‌جایی ۵ تا ۵۰ میلی‌متر در هر قسمت در محدوده ۳ عدد پایین‌تر قرار دارد. مقادیر پایین‌تر تابع سنتری می‌تواند نشان‌دهنده استحکام کمتر قطعه باشد. نمودار ۷- c (ضربه ۳۸ ژول) نسبت به نمودار ۷- b (ضربه ۲۰ ژول) دارای افت‌های ناگهانی بیشتری بوده که بیانگر رخداد آسیب‌های بیشتر است و به علاوه تابع در محدوده عددی پایین‌تری حتی نسبت به S1-20 در نمودار ۶- b قرار دارد.

۳-۴- محاسبه مساحت زیر نمودار تابع سنتری نمونه‌ها و مقایسه

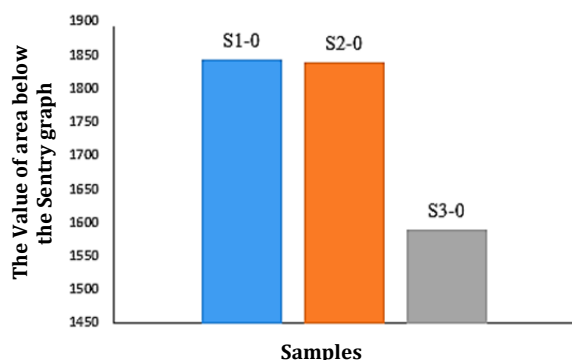
آنها با هم

در این بخش، مساحت تابع سنتری برای نمونه‌های با لایه‌چینی یکسان ولی با پیش‌آسیب ضربه متفاوت ارایه شده است. با مشاهده نمودارهای ۱۱-۹، در تمامی حالت‌ها قابل تشخیص بود که نمونه‌هایی که پیش‌آسیب ناشی از آزمون ضربه آنها دارای انرژی بیشتری است، دارای مقادیر تابع سنتری پایین‌تر و به تبع آن مساحت زیر نمودار کمتری هستند و علت آن را می‌توان با مراجعه به فرمول ۲ دریافت که مقدار تابع سنتری رابطه مستقیمی با انرژی کرنشی و برعکس رابطه معکوسی با میزان انرژی آکوستیک آزاد شده دارد و در نمونه‌های با آسیب بیشتر، ظرفیت جذب انرژی کرنشی در نمونه افت پیدا می‌کند و با اعمال بارگذاری خمشی، مکانیزم‌های شکست بیشتر و در نهایت انرژی آکوستیک بالاتری آزاد می‌شود، لذا مقادیر تابع سنتری و مساحت زیر نمودار برای نمونه‌های آسیب‌دیده کمتر می‌شود و می‌توان به این نتیجه رسید که هر چه مساحت زیر نمودار تابع سنتری نسبت به بقیه بیشتر باشد، نشان از استحکام بالاتر قطعه خواهد داشت و با افزایش آسیب ضربه، مساحت زیر نمودار و استحکام باقیمانده قطعه کاهش می‌یابد. نمونه‌های آسیب‌دیده با ضربه ۲۰ ژول تقریباً ۲ الی ۴٪ نسبت به نمونه‌های سالم، افت استحکام دارند و این مقدار افت استحکام برای نمونه‌های آسیب‌دیده با ضربه ۶۰ ژول برای نمونه‌های S1 و S2 نسبت به نمونه بدون پیش‌آسیب، ۱۰٪ و در نمونه S3 ۲۷٪ است.

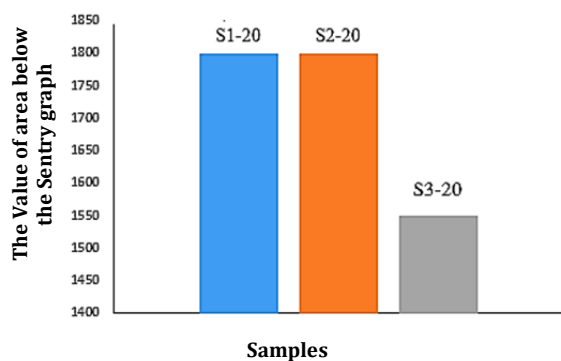


نمودار ۱۱) مقدار مساحت زیر نمودار تابع سنتری برای نمونه‌های آسیب‌دیده با لایه‌چینی S3

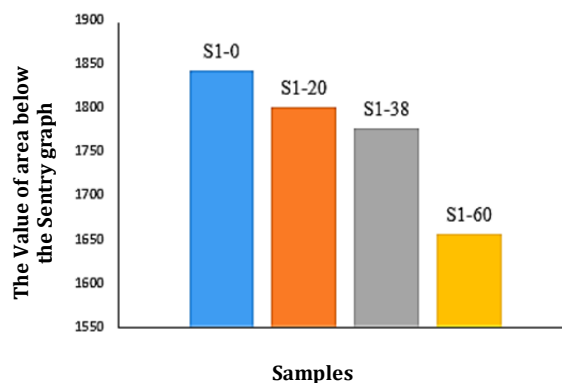
در نمودارهای ۱۵-۱۲، نمونه‌ها با لایه‌چینی مختلف اما تحت انرژی ضربه یکسان با هم مقایسه شده‌اند. با مقایسه نمودارها مشاهده می‌شود که نمونه S1 دارای بالاترین مساحت زیر نمودار تابع سنتری یا به عبارتی بهتر، بالاترین استحکام باقیمانده پس از خمش نسبت به بقیه نمونه‌های تحت انرژی ضربه یکسان داشته است. پس از آن نمونه S2 بوده که میزان مساحت آن به میزان ناچیزی پایین‌تر از S1 بوده و کمترین استحکام باقیمانده متعلق به نمونه S3 است. مقایسه نتایج در این نوع دسته‌بندی نیز حاکی از بالاتر بودن استحکام باقیمانده نمونه S1 نسبت به بقیه نمونه‌ها در تمامی پیش‌آسیب‌های ایجاد شده به علت هم‌راستایی بیشتر الیاف شیشه با بارگذاری خمشی در این نوع لایه‌چینی است.



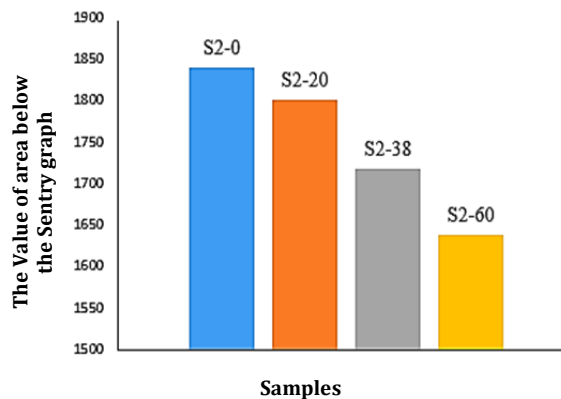
نمودار ۱۲) مقدار مساحت زیر نمودار تابع سنتری برای نمونه‌های بدون پیش‌ضربه با لایه‌چینی‌های مختلف



نمودار ۱۳) مقدار مساحت زیر نمودار تابع سنتری برای نمونه‌های با آسیب پیش‌ضربه ۲۰ ژول با لایه‌چینی‌های مختلف



نمودار ۹) مقدار مساحت زیر نمودار تابع سنتری برای نمونه‌های آسیب‌دیده با لایه‌چینی S1



نمودار ۱۰) مقدار مساحت زیر نمودار تابع سنتری برای نمونه‌های آسیب‌دیده با لایه‌چینی S2

شکست الیاف در نمونه S3 است. اما در نمونه S2 مقدار انرژی آکوستیک آزاد شده بالاتر مربوط به شکست‌های مواد ترد اعم از فوم یا رزین است و الیاف که نقش مهم‌تری در تقویت خواص مکانیکی دارد، در نمونه S2 نسبت به S3 کمتر آسیب دیده است. بنابراین می‌توان گفت که استحکام باقیمانده در ساندویچ پانل‌های پلیمری جدا از میزان انرژی آکوستیک آزاد شده وابسته به الیاف شیشه و هم‌راستایی الیاف در جهت بارگذاری، سلامت و نوع آسیب آن است.

۴- نتیجه‌گیری

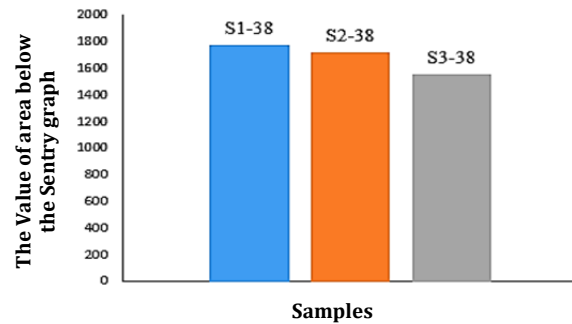
در این پژوهش هدف، بررسی استحکام خمشی و یافتن راه‌حلی برای تخمین استحکام باقیمانده ساندویچ پانل‌های پلیمری به روش آزمون غیرمخرب آکوستیک امپشن بوده، به‌طوری که در ابتدای کار ساندویچ پانل‌های با لایه از جنس کامپوزیت رزین پلی‌استر/الیاف شیشه با لایه‌چینی‌های مختلف عمود بر هم، زاویه‌دار و ترکیبی از هر دو (به‌عنوان یکی از پارامترهای موثر بر نتیجه آزمایش) با هسته فوم پلی‌اورتان ساخته شده، سپس به‌منظور ایجاد پیش‌عیب در ساندویچ پانل‌ها، تمامی نمونه‌ها تحت آزمون ضربه با مقادیر انرژی مختلف قرار گرفته است. پس از آن برای بررسی تاثیر میزان پیش‌عیب و اثر لایه‌چینی‌های مختلف روی خواص مکانیکی و استحکام ساندویچ پانل‌ها، نمونه‌های مورد آزمایش تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای قرار گرفتند و با جمع‌آوری و تحلیل داده‌های آکوستیک و همچنین داده‌های مربوط به نیرو-جابجایی دستگاه خمش، نتایج برای حالت‌های مختلف به دست آمد و مقایسه شد. در این تحقیق نتایج اصلی به‌دست آمده به‌منظور بررسی استحکام باقیمانده ساندویچ پانل‌های مورد آزمایش به‌شرح زیر است:

۱- با مشاهده نمودارهای ۲، ۳ و ۵ متوجه می‌شویم هر چه انرژی ضربه از قبل وارد شده به نمونه بیشتر باشد، نمونه دارای استحکام خمشی پایین‌تر و انرژی آکوستیک آزاد شده بیشتری است. همچنین نمونه S1 نسبت به S2 و S3 مقاومت بالاتری دارد که به نوع لایه‌چینی بر می‌گردد. در نمونه S1 از ۸ لایه الیاف‌های شیشه، ۴ لایه آن در راستای بارگذاری خمشی قرار دارند و دچار تنش کششی می‌شوند و بار خمشی را تحمل می‌کنند. در نمونه S2 نیز نمونه‌ها به‌خاطر تحت زاویه‌بودن، هیچ کدام در راستای بار خمشی قرار ندارند.

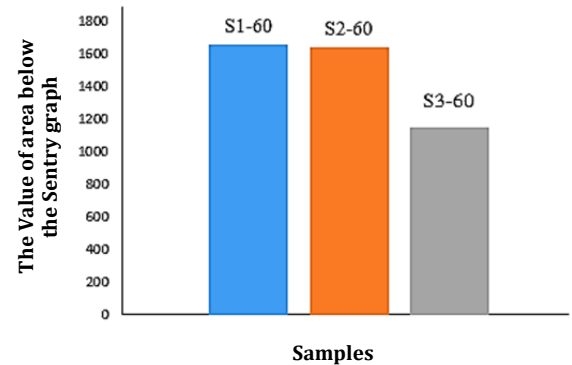
۲- بالاتر بودن استحکام خمشی نمونه S1 (لایه‌چینی عمود بر هم ۹۰ درجه) نسبت به نمونه S2 (لایه‌چینی تحت زاویه ۴۵ درجه) نشان می‌دهد که الیاف‌های شیشه دارای ظرفیت تحمل بالاتر تنش‌های کششی حاصل از خمش، نسبت به تنش برشی ایجاد شده هستند و نحوه لایه‌چینی این الیاف تاثیر بسزایی در استحکام نهایی ساندویچ پانل خواهد داشت.

۳- بعد از ترسیم نمودار تابع سنتری و محاسبه مساحت زیر نمودار در نمودارهای ۹-۱۱ در می‌یابیم که برای نمونه‌های با پیش‌آسیب بیشتر مساحت زیر نمودار پایین‌تر است که می‌تواند معیار خوبی برای تخمین استحکام باقیمانده باشد. همچنین در نمودارهای ۱۵-۱۲، مساحت زیر نمودار تابع سنتری نمونه S1 بیشتر از بقیه نمونه‌ها بوده که باز نشان‌دهنده استحکام و عمر باقیمانده بیشتر نمونه S1 نسبت به S2 و S3 است.

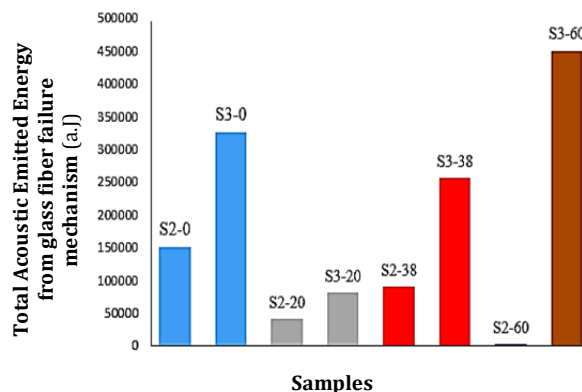
۴- در نمودارهای ۱۵-۱۲، مساحت زیر تابع سنتری نمونه S3 کمتر از S2 است که با وجود انرژی آکوستیک آزاد شده کمتر نمونه S3 نسبت به S2، نمونه S3 نسبت به S2 استحکام باقیمانده کمتری



نمودار ۱۴) مقدار مساحت زیر نمودار تابع سنتری برای نمونه‌های با آسیب پیش‌ضربه ۳۸ ژول با لایه‌چینی‌های مختلف



نمودار ۱۵) مقدار مساحت زیر نمودار تابع سنتری برای نمونه‌های با آسیب پیش‌ضربه ۶۰ ژول با لایه‌چینی‌های مختلف



نمودار ۱۶) مجموع انرژی آکوستیک آزاد شده برای مکانیزم‌های شکست الیاف برای نمونه‌های S2 و S3

در نمودار ۴ مشاهده شد که انرژی آکوستیک آزاد شده در نمونه‌های S3 پایین‌تر از نمونه S2 بوده که بیانگر رخداد مکانیزم‌های آسیب و شکست کمتر در نمونه S3 نسبت به S2 است. اما در نمودارهای ۱۲-۱۵ بر خلاف انتظار، استحکام باقیمانده نمونه S3 پایین‌تر از S2 است. به‌عنوان معیاری مضاعف و به‌منظور تایید نتایج حاصل از نمودار تابع سنتری برای تخمین استحکام باقیمانده در نمودارهای ۱۲-۱۵، مجموع انرژی آکوستیک برای مکانیزم‌های شکست الیاف برای نمونه‌های S2 و S3 در نمودار ۱۶ ارایه شده است که برای تمامی حالت‌های پیش‌آسیب ضربه با انرژی‌های مختلف و حتی نمونه بدون پیش‌آسیب، انرژی شکست الیاف در نمونه‌های S3 بالاتر از نمونه‌های S2 است و این بدان معناست که با وجود انرژی آکوستیک آزاد شده کمتر S3 نسبت به S2، همین مقدار کمتر انرژی آزاد شده ناشی از تمرکز بیشتر مکانیزم‌های آسیب روی

- 3- Silversides I, Maslouhi A, Laplante G. Interlaminar fracture characterization in composite materials by using acoustic emission. 5th International Symposium on NDT in Aerospace, 13-15 November, 2013, Singapore. Singapore: Ultrasonics and Acoustics; 2013.
- 4- Zarif Karimi N, Heidary H, Ahmadi Najafabadi M, Rahimi A, Farajpur M. Study of residual tensile strength in drilled composite laminates by acoustic emission. Modares Mechanical Engineering. 2014;13(15):169-183. [Persian]
- 5- Ben Ammar I, Karra C, El Mahi A, El Guerjouma R, Haddar M. Mechanical behavior and acoustic emission technique for detecting damage in sandwich structures. Applied Acoustics. 2014;86:106-117.
- 6- Ahmadi Najafabadi M, Hosseini Toudeshky H, Sedighi M. Damage monitoring of aluminum sheet repaired with fiber metal laminate patch by acoustic emission. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(2):1-9. [Persian]
- 7- Ahmadi Najafabadi M, Sedighi M, Salehi M, Hosseini Toudeshky H. Analysis and detection of failure in aluminum/E-glass prepreg interface with acoustic emission. Journal of Science and Technology of Composites. 2014;1(1):13-22. [Persian]
- 8- Saeedifar M, Ahmadi Najafabadi M, Hosseini H, Mohammadi R. Investigation of initiation and evolution of delamination in glass/epoxy laminated composites using acoustic emission method. AmirKabir Journal of Science and Research Mechanical Engineering. 2017;48(4):153-156. [Persian]
- 9- Suresh Kumar C, Arumugam V, Santulli C. Characterization of indentation damage resistance of hybrid composite laminates using acoustic emission monitoring. Composites Part B Engineering. 2017;111:165-178.
- 10- Minak G, Zucchelli A. Damage evaluation and residual strength prediction of CFRP laminates by means of acoustic emission techniques. In: Durand LP, Editor. Composite material research progress. New York: Nova Science Publishers; 2008. pp. 165-207.
- 11- Askeland DR, Fulay PP, Wright WJ. The Science and Engineering of Materials. 6th Edition. Stamford: Cengage Learning; 2010. pp. 292-293.
- 12- AzoM. E-Glass Fibre [Internet]. Manchester: AzoM; 2018 [cited 2018 Mar 18]. Available from: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=764>

دارد که علت آن تمرکز بیشتر مکانیزم‌های شکست در نمونه S2 بر شکست زمینه رزین پلی‌استر بوده، در حالی که در نمونه S3 بیشتر تمرکز انرژی آکوستیک آزادشده روی شکست الیاف بوده (نمودار ۱۶) و الیاف در این نوع لایه‌چینی نسبت به S2 آسیب بیشتری دیده است، بنابراین الیاف و سالم‌بودن یا آسیب‌دیدگی آن نقش مهمی در استحکام باقیمانده نمونه‌های ساندویچ پانل ایفا می‌کند.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر به دلیل فراهم نمودن تجهیزات لازم برای آزمون‌های این پژوهش، کمال تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تأییدیه اخلاقی: ما، نویسندگان مقاله "تخمین استحکام باقی مانده ساندویچ پانل‌های پلیمری الیاف شیشه- پلی‌استر با هسته فوم پلی‌اورتان به کمک آکوستیک امپشن" با اعلام موافقت خود مبنی بر ارسال این مقاله به نشریه علمی-پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس تعهد می‌نماییم که این مقاله در زمان ارسال برای این نشریه در هیچ نشریه ایرانی یا غیر ایرانی در حال بررسی نبوده و تا تعیین تکلیف قطعی در این نشریه، برای هیچ نشریه ایرانی یا غیر ایرانی دیگر ارسال نشده است.

تعارض منافع: ما، نویسندگان این مقاله، متعهد می‌شویم این مقاله هیچ گونه تعارض منافع ندارد.

سهم نویسندگان: امیرمحمد زکی‌زاده (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ سیدرضا حمزه‌لو (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ امیر رفاهی‌اسکویی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۳۰٪)

منابع مالی: هزینه پژوهش توسط نویسندگان تامین شده است.

منابع

- 1- Woo SC, Choi NS. Analysis of fracture process in single-edge-notched laminated composites based on the high amplitude acoustic emission events. Composites Science and Technology. 2007;67(7-8):1451-1458.
- 2- Refahi Oskoue A, Ahmadi M. Acoustic emission characteristics of mode I delamination in glass/polyester composites. Journal of Composite Materials. 2010;44(7):793-807.