جلد 7، شماره 3، پاییز 99، ص‌ص 1029-1039

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیت**

http://jstc.iust.ac.ir

تحلیل مکانیزم‌های تخریب در خمش پانل‌های ساندویچی کامپوزیت پایه پلیمری توسط روش آکوستیک امیشن

سید رضا حمزه لو[1*] ، امیر رفاهی اسکوئی[1] ، امیرمحمد زکی‌زاده[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* تهران، صندوق پستی 136-16785، rehamzeloo@sru.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 98/09/12

پذیرش: 99/10/03

کلیدواژگان

آکوستیک امیشن

کامپوزیت ساندویچ پانل

مکانیزم‌های شکست

خمش

چکیده

در سال‌های اخیر به دلیل دستیابی به خواص مورد نظر و مطلوب از کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف استفاده می‌گردد. تعیین دقیق مکانیزم‌های تخریب کمک شایانی به تصحیح طراحی و تحلیل بارگذاری در کامپوزیت‌ها و بخصوص پانل‌های ساندویچی می‌نماید. در این مقاله با تحلیل داده‌های آکوستیکی، به بررسی و تشخیص مکانیزم‌های خرابی در پانل‌های ساندویچی کامپوزیت پلی استر/ شیشه با هسته فوم پلی اورتان در آزمون خمش سه نقطه با اعمال تضعیف اولیه حاصل از ضربه‌های با انرژی مختلف پرداخته‌شده‌است. بدین منظور نمونه‌هایی با 4 لایه‌چینی متفاوت و با 4 حالت مختلف با و بدون پیش ضربه مورد استفاده قرارگرفت. شکست ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس، شکست الیاف و شکست فوم بعنوان مکانیزم‌های تخریب غالب، از روی تصاویر چشمی، بررسی وقایع آکوستیک رخ داده در بازه‌های فرکانسی مختلف، استخراج انرژی هر بازه و بررسی نمودار نیرو-زمان تعیین‌شده‌اند. نتایج حاصل‌شده نشان داد که مکانیزم‌های شکست ترد شامل شکست ماتریس و شکست فوم در هر رویداد مختلف آکوستیک، مجموع انرژی‌های بالاتر با پراکندگی کمتر در بازه فرکانسی پایین‌تر نسبت به مکانیزم‌های شکست نرم مانند شکست الیاف شیشه آزاد می‌کنند. اما رویدادهای آکوستیک در مکانیزم شکست نرم الیاف شیشه با مجموع انرژی‌های کمتر و به‌صورت پراکنده در بازه فرکانسی بالاتر اتفاق افتاده‌است. تطبیق تصاویر چشمی با داده‌های آکوستیکی و همچنین نمودار نیرو جابجایی، علاوه بر صحه‌گذاری درتعیین مکانیزم‌های تخریب در این پانل‌های ساندویچی، منجر به تعیین بازه فرکانسی جدید شکست فوم متخلخل (190 الی 220 کیلوهرتز) نیزگردید.

Applying acoustic emission to investigate failure mechanisms on bending of polymer-based composite sandwich panels

Seyed Reza Hamzeloo *, Amir Refahi Oskouei, Amir Mohammad Zakizadeh

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16785-136, Tehran, Iran, rehamzeloo@ sru.ac.ir

Keywords

Acoustic Emission

Sandwich Panel Composite

Failure Mechanisms

Bending

Abstract

In recent years, due to achieving desired properties, increasing application of Composite in various industries is observable. Exact determination and evaluation of failure mechanisms lead to modified designs and helps assessment of loading in composite structures, specially sandwich panels. In this paper, failure mechanisms during bending of Foam / Glass - Polyester Sandwich panels, which degraded by pre-impact of various energy, have been investigated by acoustic data analysis. 4 different Lay-up techniques for laminates with 4 types of with and without pre-impacts and totally 16 samples were studied. Matrix crack, fiber de-bonding, fiber breakage and foam crack were the mechanisms were investigated through sample failure photos, acoustic frequency count analysis, extracted energy in each frequency range and force-time diagrams. Results showed that brittle failure mechanisms containing matrix crack and foam crack release more condensed and in lower frequency range with higher energy acoustic counts in comparison with ductile failure mechanisms like as fiber de-bonding and fiber breakage. Ductile failure mechanisms release more scattered in higher frequency range but with lower energy acoustic counts. Acoustic Results which applied to assess failure mechanisms validated by visual pictures and force diagrams also lead to a new frequency range determination for foam crack (190 to 220 kHz).

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Hamzeloo, S.R. Refahi Oskouei, A. and Zakizadeh, A.M , "Applying acoustic emission to investigate failure mechanisms on bending of polymer-based composite sandwich panels ", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 3, pp. 1029-1039, 2020.

1-مقدمه

امروزه کامپوزیت‌های پایه پلیمری و پانل‌های ساندویچی به علت وزن پایین‌تر و خواص مکانیکی بهتر نسبت به فلزات در صنایع مختلفی مانند خودروسازی و صنایع دریایی رو به افزایش است، وجود هسته‌هایی از خانواده پلیمری مانند پلی‌اورتان و پلی‌استایرن و غیره که دارای ساختار سلولی هستند، باعث‌شده تا ساندویچ‌پانل‌ها به‌عنوان جاذب انرژی نیز عمل کنند. در مواردی که بارگذاری پیوسته با مقادیر نیروی بالایی وجود دارد، امکان تخریب‌های غیرقابل پیش‌بینی وجود دارد به‌خصوص برخی از تخریب‌ها در قسمت فوم که بررسی آن سخت‌است و می‌تواند حتی استحکام نهایی سازه را تا نصف تقلیل دهد، بنابراین بررسی دقیق مکانیزم‌های تخریب و استفاده از روش‌های غیرمخرب برای پایش سلامت این نوع سازه‌ها از موارد به روز تحقیق است. در این پژوهش چون هدف ارتباط بین داده‌های آکوستیک و اطلاعات به‌دست‌آمده از بررسی چشمی مکانیزم‌های شکست پانل‌های ساندویچی‌است و بنابراین به مطالعه پژوهش‌های قبلی که در این حوزه پرداخته شده‌است در ذیل به آنها اشاره شده‌است:

احمد قاسمی قلعه بهمن و همکاران در سال 1396 بر روی انواع مکانیزم‌های شکست در کامپوزیت‌های چندلایه سوراخ‌دار تحت بارگذاری کششی با استفاده از انتشار صوت مطالعه‌کردند [1]. نتایج روش آکوستیک با تحلیل تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی مقایسه‌گردیدند همچنین بیشترین اختلاف در این دو روش در تشخیص خرابی‌ها 7% می‌باشد.

فتوحی و همکاران [2]، ساز و کارهای خرابی را در نمونه‌های شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری خمش سه نقطه دسته‌بندی نمودند. اساس دسته‌بندی آن‌ها استفاده از روش فازی سی مینز[1] بود. نتایج آن‌ها به این صورت بود که دسته با فرکانس میانگین 139.95 kHz مربوط به شکست ماتریس، دسته با فرکانس میانگین 265.51 کیلوهرتز مربوط به جدایش الیاف از ماتریس و دسته با فرکانس میانگین 412.2 کیلوهرتز مربوط به شکست الیاف بوده‌است.

وانگ یانرونگ و همکاران در سال 2019 مکانیزم‌های شکست کامپوزیت‌های با الیاف‌کربنی زمینه سیلیکون–کاربید تحت بارگذاری استاتیکی به روش آکوستیک امیشن مورد بررسی قراردادند. که برای تحلیل سیگنال‌های آکوستیک از روش کا-مینز استفاده شد [3]. آن‌ها متوجه شدند که با ترکیب تصاویر دیجیتالی کرنش ناشی از بارگذاری و سیگنال‌های آکوستیک، می‌توان مراحل مختلف رشد ترک هنگام بارگذاری در این نوع کامپوزیت‌ها را تشخیص داد.

نیما بهشتی زاده و همکاران در سال 2019 به مطالعه تأثیر چیدمان الیاف کامپوزیت‌های هیبریدی شیشه/کربن/اپوکسی تحت بارگذاری خمشی بر روی سیگنال‌های پردازش‌شده توسط روش آکوستیک امیشن پرداختند و از دو روش تحلیلی ویولت[2] و چوی-ویلیامز[3] به‌منظور تحلیل سیگنال‌های آکوستیک استفاده شد [4]. بر اساس نتایج، بیشینه فرکانس‌های به‌دست‌آمده از روش چوی-ویلیامز به ترتیب 0، 5%، 5%- و 4%- نسبت به بیشینه فرکانس‌های به‌دست آمده از روش ویولت (در4نمونه مختلف مورد بررسی) تفاوت دارند.

ظریف کریمی و همکاران در سال 2014، پایش استحکام کاهش یافته قطعات کامپوزیتی سوراخ‌شده توسط روش آکوستیک امیشن را مطالعه کردند [5]. طبق نتایج، نرخ پیشروی به عنوان مهم ترین عامل شناسایی‌شد و محدوده فرکانسی شکست ماتریس 62.5 الی 120 کیلوهرتز و لغزش الیاف 250الی 312کیلوهرتز و شکست الیاف 312 الی 375 کیلوهرتز است.

احمدی نجف آبادی و همکاران در همین سال 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 محاسبه‌شد و مدل‌سازی براساس مقادیر چقرمگی شکست به‌دست آمده صورت پذیرفت [6]. آن‌ها دریافتند که با کمک انرژی سیگنال آکوستیک و تابع سنتری مرتبط با آن می‌توان لحظات شروع خرابی در این نوع کامپوزیت را تشخیص داد.

رفاهی و همکاران در سال 2010 ، رشد جدایش بین لایه‌ای را در نمونه شیشه/پلی استر تحت بارگذاری مود I بررسی نمودند [7]. با استفاده از تبدیل فوریه مشخص‌شد که در لحظه آغاز رشد جدایش بین لایه‌ای، سیگنال‌های آکوستیک امیشن دارای محدود فرکانسی 125-250 کیلوهرتز بوده که متناظر با ترک خوردگی ماتریس است. اما با آغاز رشد جدایش بین لایه‌ای، محدوده فرکانسی 250-320 و 350-450 کیلوهرتز بوده‌است که متناظر با جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف هستند.

بن عامر و همکاران در سال2019 بر روی تشخیص مکانیزم‌های شکست کامپوزیت‌های هیبریدی با الیاف‌های تک جهته کربن/کتان به روش آکوستیک امیشن پرداختند [8]. رویدادهای آکوستیک ثبت‌شده به روش الگوریتم کا-مینز و بر اساس پارامترهای طبقه بندی زمانی طبقه بندی‌شده اند. طبقه بندی‌های به‌دست آمده از روش آکوستیک با تصویربرداری‌های حاصل‌شده از روش SEM مقایسه و تطابق کامل آنها مورد بررسی قرار گرفت.

امیر مصطفی پور و همکاران در سال 1394 بر روی ارزیابی حوزه فرکانس خرابی تیر کامپوزیتی الیاف شیشه /اپوکسی در آزمون خمش سه نقطه توسط روش آکوستیک امیشن پرداختند [9]. این مکانیزم‌های شکست غالب، یعنی شکست ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف در بار گذاری خمشی به ترتیب دارای محدوده فرکانسی 0-125،125-250 و 375-500 کیلوهرتز هستند.

زکی‌زاده و همکاران در سال1398 به بررسی مکانیزم‌های تخریب کامپوزیت در ضربه سرعت پایین با کمک روش آکوستیک امیشن پرداختند [11,10]. آن‌ها با بررسی داده‌های آکوستیک و تفکیک فرکانسی آن‌ها توانستند مکانیزم‌های تخریب در ضربه را شناسایی کنند. نتایج آنها نشان داد که فقط در ضربه‌های با انرژی بالاتر احتمال شکست الیاف با محدوده فرکانسی بالاتر وجود دارد.

حمزه‌لو و همکاران در سال1398 به بررسی عمر باقی‌مانده کامپوزیت ساندویچ پانل با کمک آکوستیک امیشن در آزمون خمش پرداختند [12]. آن ها با کمک تابع سنتری، نمودار نیروی اعمالی و انرژی تجمعی آکوستیکی توانستند استحکام نمونه‌ها را پیش‌بینی کنند.

بر اساس مطالعات انجام‌شده قبلی در ارتباط با کامپوزیت‌های ساندویچی، تا کنون مطالعه جامعی و با رویکرد فرکانسی در مورد مکانیزم‌های تخریب این سازه‌ها صورت نگرفته و نیاز به مطالعه رفتار شکست کامپوزیت‌های ساندویچی تحت خمش توسط روش غیرمخرب آکوستیک امیشن مشهود است. زیرا با داشتن اطلاعات حاصل از خرابی و شناسایی مکانیزم‌های خرابی

[1] C-Means
[2] Wavelet
[3] Choi–Williams

به‌وجود آمده در این سازه‌ها می توان نوع طراحی را بهبود بخشید و یا میزان عمر باقیمانده در آن‌ها را تخمین زد. بنابراین در این پژوهش پوسته ساندویچ پانل از 4 نوع لایه‌چینی مختلف الیاف شیشه و زمینه پلی استر به همراه هسته از جنس فوم پلی‌اورتان استفاده‌شد. نمونه‌ها قبل از اینکه تحت خمش قرار بگیرند به منظور تضعیف اولیه، تحت پیش ضربه با انرژی‌های مختلف قرار گرفتند. برای بررسی دقیق‌تر استحکام نمونه‌ها و جزئیات مکانیزم‌های شکست هریک، از داده‌های لودسل به منظور ترسیم نمودارهای نیرو-جابجایی و از داده‌های 2 عدد سنسور آکوستیک نصب‌شده بر روی ساندویچ‌پانل به منظور دریافت سیگنال‌های صوتی، و همچنین از تصاویر چشمی نوع تخریب نمونه‌ها استفاده شده‌است.

2- مواد و روش تحقیق

2-1 طرح لایه‌چینی و نحوه کدگذاری نمونه‌ها

در جدول 1 طرح لایه گذاری ساندویچ‌پانل‌های مورد استفاده ارائه‌شده‌است، هر یک از انواع نمونه‌ها علاوه بر یک حالت بدون ضربه، تحت سه نوع ضربه با انرژی‌های مختلف 20 ، 38 و 60 ژول قرار می‌گیرند بنابراین از روش کدگذاری برای هر کدام از نمونه‌ها به فرم S4-0، S1-20 ، S2-38 و S3-60 و غیره استفاده‌شده‌است. قسمت اول هر کد بیانگر نوع لایه‌چینی و قسمت دوم بعد از خط تیره بیانگر مقدار انرژی ضربه واردشده به نمونه‌است.

2-2 آزمون پیش ضربه

در ابتدا برای بدست آوردن محدوده انرژی لازم برای ضربه برروی نمونه‌ها از آزمون فشار استاتیکی بر طبق استاندارد ASTM-D6264M-17 استفاده شده‌است [13]. آزمایش ضربه سرعت پایین به منظور تضعیف اولیه و احتمال شکست‌های متفاوت در مرحله خمش برروی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سقوط آزاد وزنه بر طبق استاندارد ASTM D7136M- 15 انجام‌شد[14]. نمای کلی این آزمون برای نمونه‌های پانل ساندویچی در هنگام آزمون در شکل 1 آمده‌است. در این آزمون از سنبه ضربه زننده فولادی سرکروی و با قطر 16 میلی متر استفاده‌شد. ساندویچ‌پانل‌ها بعد از ساخت اولیه به ابعاد 20 در 20 سانتی متر برش داده می‌شوند و با فیکسچرهایی با ابعاد فضای باز 15 در 15 سانتی متر توسط گیره در موقعیت خود ثابت نگه داشته می‌شوند. بدین منظور سه نوع انرژی ضربه با مقادیر مختلف 20 ، 38 و 60 ژول برای هریک از چهار نمونه از هر نوع لایه‌چینی مختلف (4 نوع لایه‌چینی) تعیین‌شد، یعنی در مجموع 12 آزمون ضربه انجام‌شد.

جدول 1 طرح لایه‌چینی با زوایای مختلف برای نمونه‌های ساندویچ پانل

Table 1 layout with different angles for sandwich panels

کد نمونه	طرح لایه‌چینی نمونه‌ها با زوایای مختلف هر لایه								
S1	90	90	90	90	هسته فوم	90	90	90	90
S2	0	90	0	90	هسته فوم	90	0	90	0
S3	+45	-45	+45	-45	هسته فوم	-45	+45	-45	+45
S4	0	90	+45	-45	هسته	-45	+45	90	0

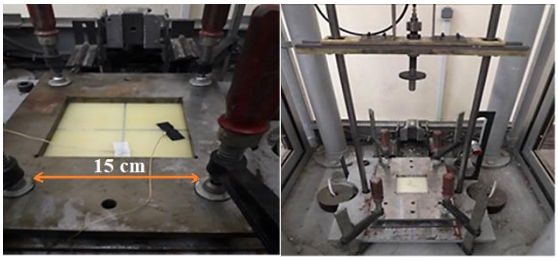


Fig. 1 Impact test device with clamping sandwich panel in its position

شکل 1 دستگاه آزمون ضربه به همراه کلمپ کردن قطعه در موقعیت خود

2-3 آزمون خمش سه نقطه

بعد از آزمون ضربه و ایجاد آسیب‌دیدگی در نمونه‌ها برای تخمین استحکام خمشی نمونه‌ها، ساندویچ‌پانل‌ها مطابق شکل 2 برطبق استاندارد ASTM D790 – 17 تحت بارگذاری خمش سه نقطه قرار داده‌شدند[15]. برای اعمال بهتر گشتاور خمشی به قطعات که در ابتدا نمونه‌ها به‌صورت مربعی بودند، آن‌ها به‌صورت مستطیلی به ابعاد 7 سانتی متر در 20 سانتی متر برش زده‌شدند. بعد از برش، نمونه‌ها همانطور که در شکل 2 مشاهده می‌شود بر روی تکیه گاه(فک)های ثابت دستگاه خمش قرار داده‌شده اند. در این آزمایش از دستگاه انیورسال مجهز به سیستم بال اسکرو و عملکرد آن به‌صورت جابجایی ثابت و ماکزیمم تناژ آن 5 تن است، استفاده گشته‌است. سرعت آزمون برای تمام نمونه‌ها با نرخ پیشروی 10 میلی متر/ دقیقه انجام گرفته و در عین حال سنسورهای آکوستیک که در وسط اضلاع عرضی مستطیل نمونه و به فاصله تقریبی 10 سانتی متر از هم قرار داشتند، جاسازی‌شده و سیگنال‌های آکوستیکی دریافت‌شده‌اند. در شکل 3 نمونه سیگنال آکوستیکی دریافت‌شده توسط سنسور آکوستیک از نمونه S1-20 در لحظه 34/05 ثانیه از شروع آزمون خمش نمایش داده‌شده‌است.

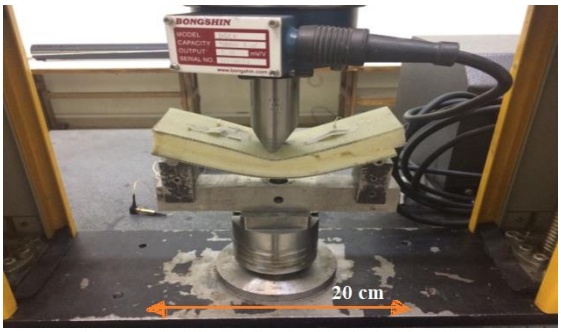


Fig. 2 One of the Sandwich panel's sample during bending

شکل 2 یکی از نمونه ساندویچ‌پانل‌ها هنگام بارگذاری خمشی

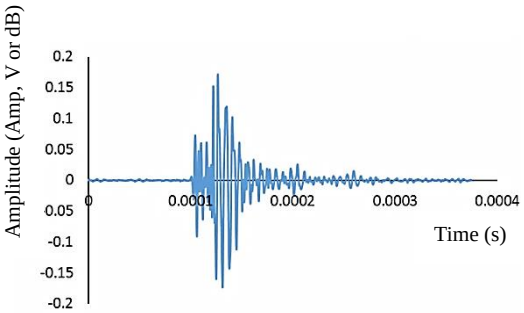


Fig. 3 Acoustic signal sample taken during bending test of sandwich panels

شکل 3 نمونه سیگنال آکوستیک دریافت‌شده حین آزمون خمش از ساندویچ‌پانل

همانطور که در شکل 3 مشاهده می‌گردد دامنه سیگنال دستگاه داده‌برداری می‌تواند برحسب جریان ، ولتاژ و یا دسی‌بل باشد. برای مثال اگر دامنه برحسب ولتاژ V می‌باشد می‌توان انرژی هر واقعه آکوستیک را به‌صورت روابط (1) تا (3) محاسبه نمود.

$$V_{ms} = \frac{1}{\Delta T}\int_0^{\Delta T} V^2(t)dt \quad (1)$$

$$V_{rms} = \sqrt{V_{ms}} \quad (2)$$

$$E = \int_{t1}^{t2} ({V_{rms}}^2)dt \quad (3)$$

در رابطه (3)، E انرژی سیگنال از محدوده زمانی t1 تا t2 برحسب دامنه موثر ولتاژ Vrms می‌باشد. دامنه ولتاژ موثر Vrms نیز برحسب سطح زیر نمودار ولتاژ که با Vms بیان می‌گردد محاسبه می‌گردد.

برای ثبت داده‌های آکوستیک امیشن هنگام آزمایش‌ها، از سیستم آکوستیک امیشن دوکاناله، به همراه نرم افزار آ-ای-وین[1] و سیستم پی سی آی[2] با نرخ داده‌برداری 40MS/sec استفاده گردید. از دو سنسور پیزوالکتریک تک کریستال با پهنای باند وسیع به نام پیکو[3]، محصول کمپانی پک[4] استفاده گردید. وقایع آکوستیک شناسایی‌شده توسط سنسور، به وسیله پیش‌تقویت‌کننده با ضریب 40 دسی بل تقویت‌شدند. در تمامی مراحل آزمون خمش سه نقطه از آزمون شکست نوک مداد به منظور تعیین موقعیت مناسب برای سنسورها و کالیبراسیون مرجع استفاده‌شد که بر طبق استاندارد ASTM E 1106 انجام گرفت [16]. لازم به ذکر است که از هر نوع لایه‌چینی و ضربه بصورت مشابه ۳ نمونه ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت و سیگنال-های آکوستیک آن‌ها برداشته شد که به دلیل تشابه سیگنال‌های مورد تحلیل قرار گرفته آن‌ها، بررسی نتایج یک نمونه از هرکدام ارائه می‌گردد. کالیبراسیون سیگنال‌های آکوستیک همانطور که در تحقیقات پیشین تجربی ذکر شده [18,17] برای تمام نمونه‌ها قبل از داده‌برداری انجام گرفته است.

3- نتایج و بحث

در این بخش در ابتدا نتایج تحقیقات پیشین برای تشخیص مکانیزم‌های خرابی کامپوزیت‌های پایه پلیمری و برداشت تحقیق حاضر از این حوزه‌ها و تشخیص حوزه شکست فوم پرداخته می‌شود. پس از آن نتایج نیرو-زمان و وقاع(کانت) فرکانسی برحسب زمان به همراه تصاویر چشمی تخریب برای نمونه‌های S1، S2،S3 و S4 مختلف ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرد. پس از آن انرژی هرمکانیزم شکست برای نمونه‌های مختلف به‌صورت تفکیک‌شده مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. لازم به ذکر است که به‌منظور تکرارپذیری و قابلیت اطمینان، ازهر نوع از نمونه‌ها ۳ مورد مشابه ساخته شد و آزمون‌ها برروی آن ها انجام گرفت و نتایج ارائه شده با دقت از نتایج مشابه آنها استخراج شده و مورد تحلیل قرار گرفته است.

3-1-تعیین حوزه فرکانسی هریک از مکانیزم‌های شکست

در مراجع مختلف بازه فرکانسی اتفاق افتادن برخی وقایع نظیر شکست ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف در کامپوزیت‌های پایه پلیمری ذکرشده که در این تحقیق از نتایج آن‌ها برای دسته بندی کانت‌های فرکانسی استفاده‌شده‌است. این دسته بندی در جدول 2 ذکرشده‌است. این نتایج در آزمون ضربه نیز مشاهده‌شده و برای این نوع کامپوزیتها مورد تایید قرار گرفته‌است[10] . با توجه به بررسی‌های چشمی نمونه‌ها و با مراجعه به جدول 2 حوزه فرکانسی برای شکست رزین در محدوده 20 تا 190 کیلوهرتز در نظر گرفته می‌شود، محدوده فرکانسی برای شکست فوم را می‌توان 190 تا 220 کیلوهرتز در نظر گرفت و برای جدایش الیاف از رزین و شکست الیاف به ترتیب حوزه فرکانسی 220 تا 380 و بالای 380 کیلوهرتز فرض می‌شود (مطابق با منابع و مراجع مختلف ذکرشده).

علاوه بر داده‌های مراجع، محدوده فرکانسی جدید یافت‌شده مربوط به شکست فوم (190 الی 220 کیلوهرتز) نیز اضافه می‌گردد تا در تحلیل انرژی شکست مکانیزم مورد بررسی قرار بگیرد. بعد از به‌دست آوردن نمودار نیرو-زمان-فرکانس برای نمونه‌ها مجموع انرژی آکوستیک برای هریک از محدوده‌های فرکانسی مرتبط با مکانیزم‌های شکست محاسبه می‌شود و اطلاعات به‌دست آمده با نتایج به‌دست آمده از بررسی‌های چشمی نمونه‌های ساندویچ‌پانل مقایسه خواهدشد.

لازم به‌ذکر است در نمودارهای شکلهای4، 6، 8 و 10 محور عمودی سمت چپ نمودار مقدار نیرو بر حسب (نیوتون) ، محور عمودی سمت راست نمودار فرکانس بر حسب (کیلو هرتز) و محور افقی نمودار بر حسب زمان (ثانیه) است. در تمامی نمونه‌ها بدلیل سرعت ثابت فک دستگاه، بارگذاری در حدود 300 ثانیه طول کشیده‌است مگر اینکه خمش کامل نمونه به دلیل مقاومت کمتر باعث رسیدن دو لمینت ساندویچ پانل در زمانی زودتر به هم‌شده‌باشد. در این نمودارها کانتها در فرکانسهای مختلف مجزاشده و به راحتی مکانیزم‌های شکست ماتریس، شکست فوم، جدایش لایه‌ای و شکست الیاف به ترتیب از فرکانسهای زیر 100 تا 500 کیلوهرتز قابل مشاهده‌است. شکست فوم ترسیم‌شده در بازه 20 تا 190 کیلوهرتز است و تا کنون در هیچکدام از مراجع ذکر نشده و در این مقاله از داده‌های آکوستیک هنگام آزمون خمش استخراج شده‌است. با توجه به این موضوع که این بازه تاکنون ذکر نشده و در نمونه‌های دارای شکست فوم بیشتر مشاهده می‌گردد، می‌توان نتیجه‌گرفت که این کانت‌ها مرتبط با شکست و رشد ترک در فوم می‌باشند زیرا از نوع شکست ترد بوده و در فرکانسهای پایین رخ داده‌است. بعلاوه اینکه در آزمون‌های قبلی که برروی همین لمینت از همین نوع رزین و با همین الیاف (و نه ساندویچ پانل شامل فوم) انجام گرفته بود، در این بازه فرکانسی کانتی مشاهده نشده بود.

جدول 2 بازه فرکانسی مکانیزم‌های مختلف شکست با رجوع به منابع مختلف

Table 2 Various frequency range of failure mechanisms based on references

مرجع/فرکانس مود خرابی	فرکانس شکست ماتریس(kHz)	فرکانس جدایش الیاف از ماتریس(kHz)	فرکانس شکست الیاف(kHz)
[9]	0-125	125-250	375-500
[19]	100-190	200-320	380-430
[5]	62.5-125	312.5-250	312.5-375
[20]	125-250	-	370-450
[2]	80-200	210-350	360-430

[1] AE-Win
[2] PCI-2
[3] Pico
[4] Pac

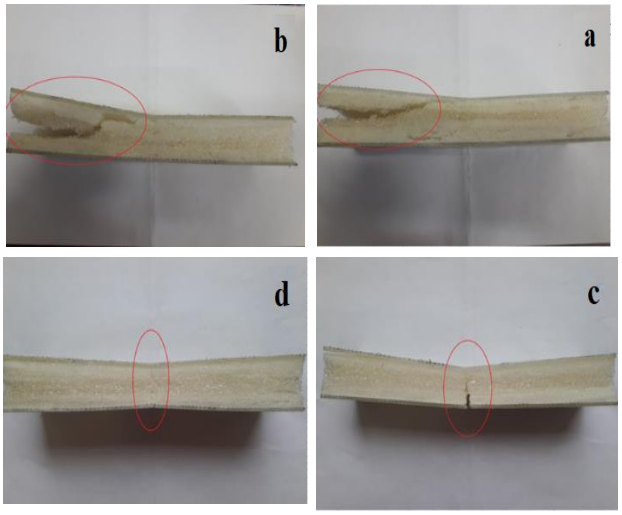
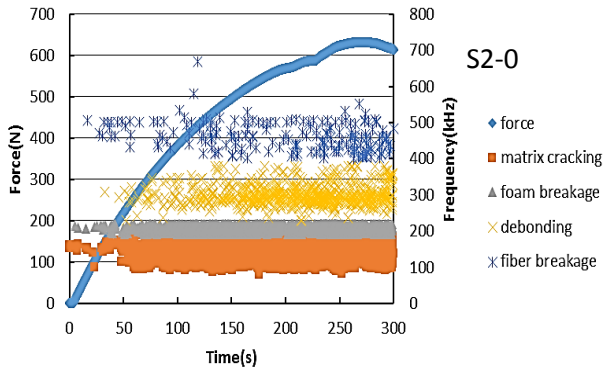


Fig. 5 Side view for S1 sandwich panels, a) S1-0, b) S1-20, c) S1-38, d) S1-60

شکل 5 تصاویر نمای جانبی ساندویچ‌پانل‌ها با لایه‌چینی نوع S1 ،الف: S1-0،ب:-S1 20 ،ج:S1-38 ،د:S1-60

همانطور که در تصاویر چشمی شکل 4 مشاهده می‌شود شکست کامل لمینت در نمونه S1-38 رخ داده و پس از آن ترک وارد فوم‌شده و بـه‌صـورت عرضـی پیشروی کرده‌است. بعلاوه این مورد از روی نمودار نیـرو-زمـان نمونـهS1-38 نیز قابل مشاهده‌است. در مـورد نمونـه S1-60 نیـز تغییـر شـکل موضـعی در ناحیه خمش ایجادشده ولی لمینت نشکسته و ترک بزرگ و قابل مشـاهده ای در این راستای عرضی در فوم ایجاد نشده‌است. ولـی در نمونـه‌هـای دیگـر S1 این مورد شکست عرضی مشاهده نشده و ترک ایجادشـده در فـوم بـه‌صـورت طولی از کناره‌ها ایجاد و رشد نموده و کانت‌هایی ایجاد کرده‌اسـت. در مقایسـه کانتهای فرکانسی دو نمونه S1-38 و S1-60 مشاهده می‌شـود کـه در نمونـه S1-38 شکست الیاف بوضوح باعث ایجاد تعداد کانت‌های زیادی در بازه 380 تا 550 کیلوهرتز شده و حتی تعداد محـدودی نیـز در فرکـانس900 و 1000 کیلوهرتز مشاهده می‌گردد ولی در نمونه دیگر تعداد کانتهـای شکسـت الیـاف کمتر است و این مورد در تصویر چشمی شکل 5 نیز مشاهده می‌گردد.



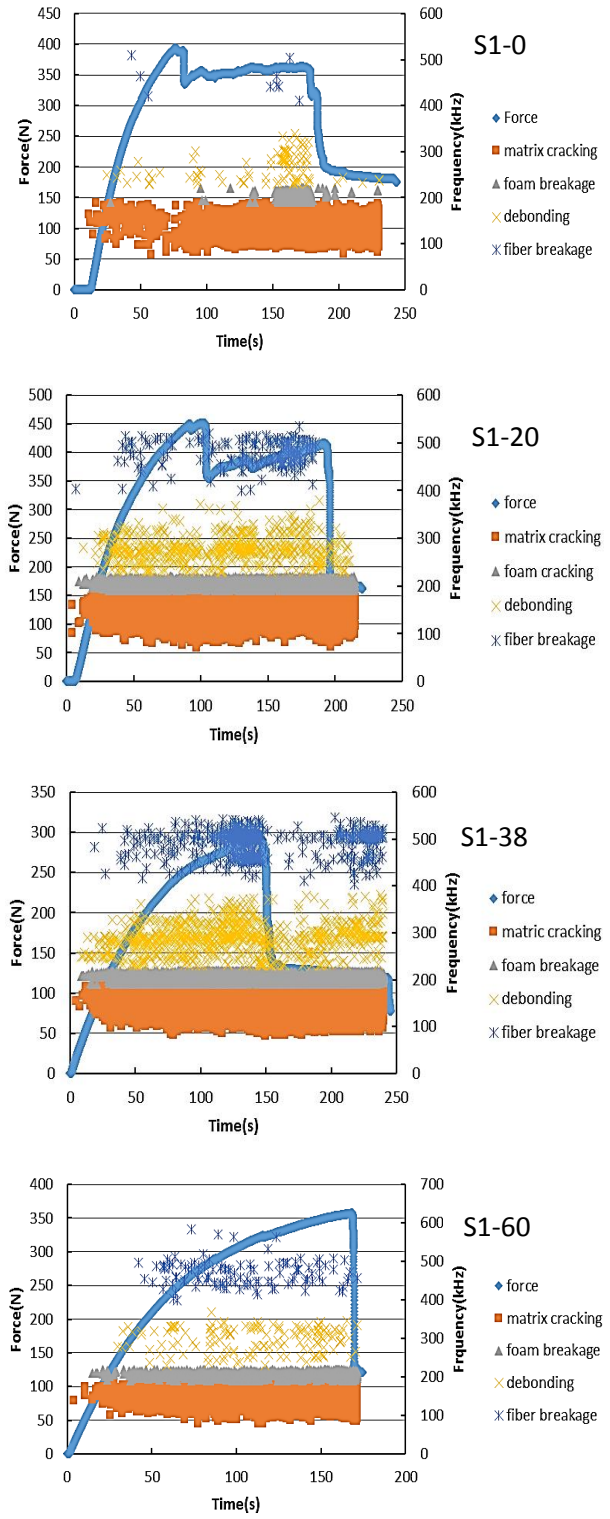


Fig.4 Force and frequency counts regarding to time for S1 samples

شکل 4 نمودارهای نیرو و کانتهای فرکانسی بر حسب زمان برای نمونه S1

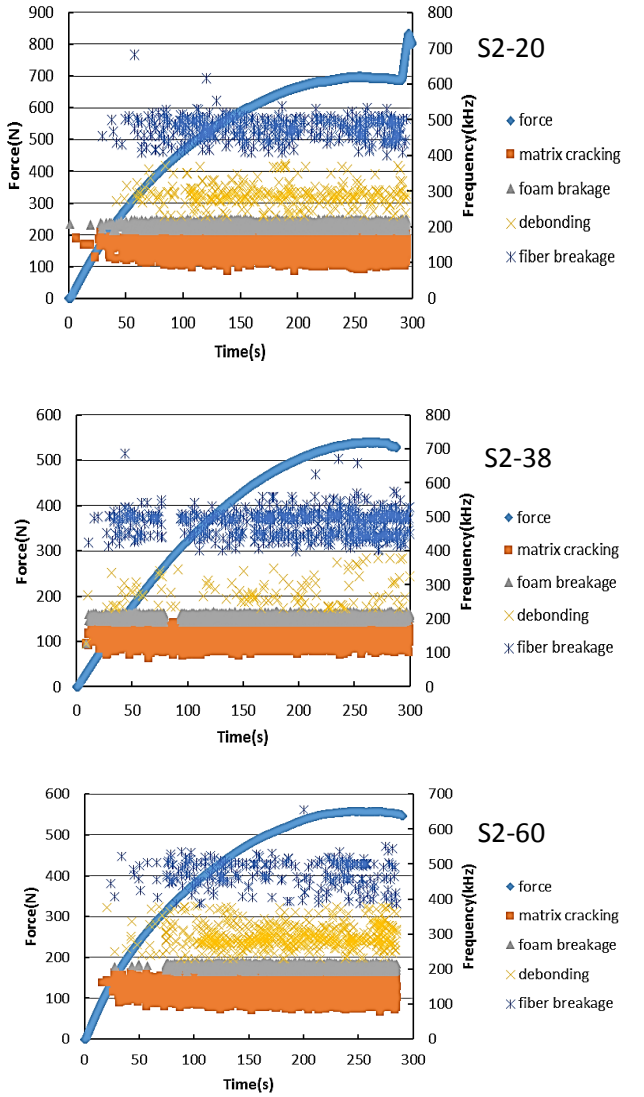


Fig. 6 Force and frequency counts regarding to time for S2 samples

شکل 6 نمودارهای نیرو و کانتهای فرکانسی بر حسب زمان برای نمونه S2

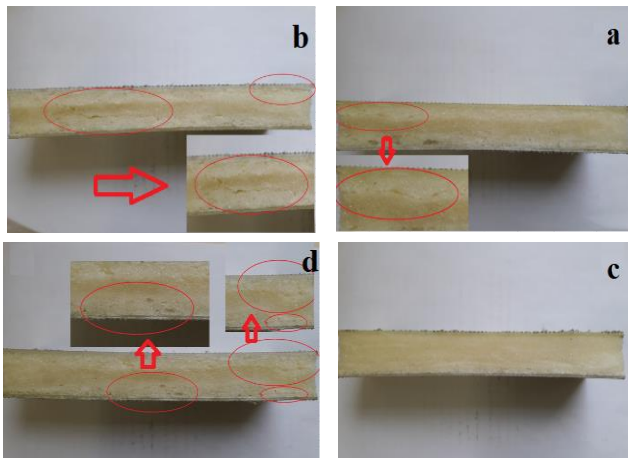
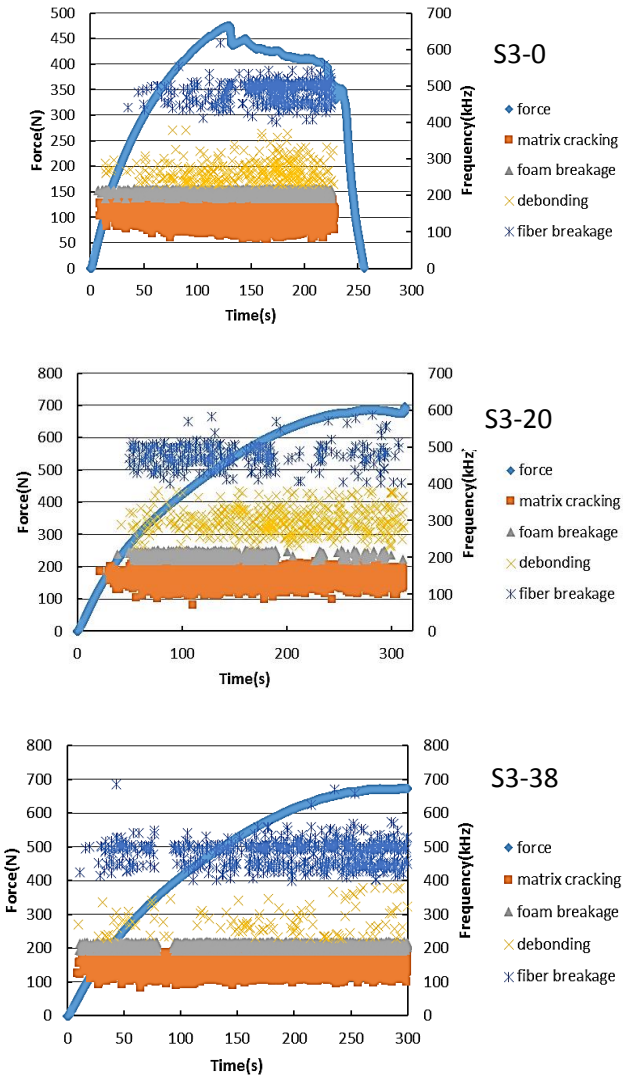


Fig.7 Side view for S2 sandwich panels, a) S2-0, b) S2-20, c) S2-38, d) S2-60

شکل 7 تصاویر نمای جانبی ساندویچ‌پانل‌ها با لایه‌چینی نوع S2 ،الف: S2-0 ، ب:S2-20 ، ج:S2-38 ، د:S2-60

در مورد نمونه‌های S2در هیچکدام از نمونه‌ها افت ناگهانی در نمودار نیرو-زمان مشاهده نمی‌گردد (شکل 6) و در تصاویر چشمی نیز به‌صورتی است که گویا انرژی آزمون به داخل فوم و در نقاط مختلف آن منتقل‌شده‌است. در هر4 نمونه ایجاد ترک‌های ریز در طول و عمق در بخش فوم نمونه‌ها مشاهده‌شد ولی این مورد برای نمونه S2-38کمتر رخ داده‌است(شکل 7). به‌علاوه در مورد S2-60 نفوذ ضربه‌زن در آزمون پیش ضربه، باعث شکستگی‌های الیاف‌شده بود که در آزمون خمش این شکستگی‌ها که به یکپارچگی الیاف تا حدودی لطمه وارد کرده باعث ایجاد کانت‌های شکست در بازه فرکانسی بالای 400 کیلوهرتز می‌گردد که در شکل 6 قابل مشاهده‌است. تنها مورد خاص در این نمونه‌ها این بود که در نمونه S2-38 علاوه بر شکست فوم کمتر، جدایش الیاف کمتری نیز رخ داده‌است و در کانت‌های فرکانسی این بخش به‌وضوح قابل مشاهده‌است. این مورد هم در آزمون ضربه مشاهده‌شد و هم در آزمون خمش در شکل 7ج و در کانت‌های فرکانسی این نمونه نیز قابل مشاهده‌است. در نمونه‌های S2-38 و S2-60 نیروی تحمل‌شده در آزمون خمش نیز کمتر از بقیه نمونه‌هاست.



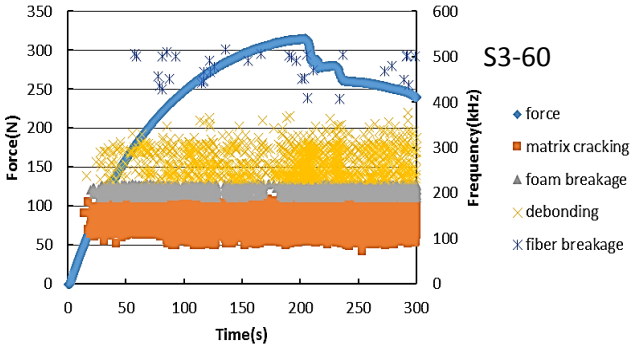


Fig.8 Force and frequency counts regarding to time for S3 samples

شکل8 نمودارهای نیرو و کانتهای فرکانسی بر حسب زمان برای نمونه S3

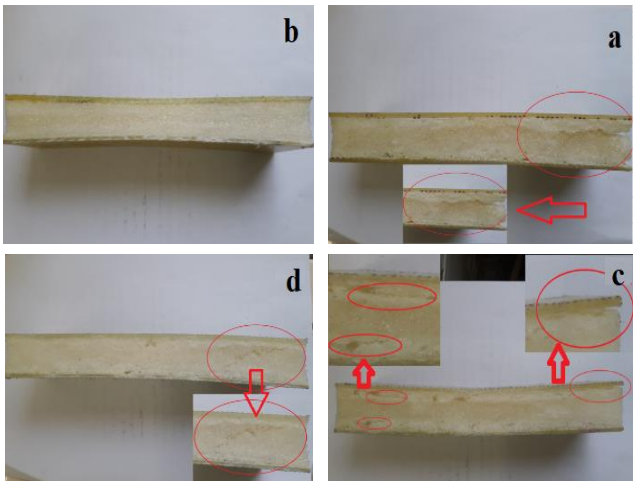


Fig.9 Side view for S1 sandwich panels, a) S3-0, b) S3-20, c) S3-38, d) S3-60

شکل 9 تصاویر نمای جانبی ساندویچ‌پانل‌ها با لایه‌چینی نوعS3 ،الف:S3-0، ب:-S3 20 ، ج:S3-38 ، د:S3-60

در شکل 8 مشاهده می‌شود که در نمونه‌های S4-38 و S4-60 طیف کاملی از کانت‌ها برای تمام مکانیزم‌ها در تمامی فرکانس‌ها و در تمام زمان آزمون از ابتدا تا انتها، استخراج‌شده و حتی شکست فوم نیز کانت‌های زیادی ایجاد کرده که با مشاهده تصاویر چشمی در شکل 9 نیز مشاهده می‌شود که در این دو نمونه شکست فوم به وضوح در تصویر جانبی و تصویر برش خورده مشاهده می‌گردد و تاییدی بر این موضوع است که با مقایسه نمودارهای این دو نمونه با مابقی نمونه‌ها (برای مثال نمونه S1-0)، مشخص می‌گردد که بازه مورد نظر در حوزه فرکانس مختص صوت استخراج‌شده ناشی از شکست و رشد ترک در فوم متخلخل است. لازم به‌ذکر است که در این دو نمونه در آزمون پیش ضربه، نفوذ تا فوم بود و ترک اولیه قبل از خمش در فوم ایجاد شده‌است و این پیش زمینه برای رشد ترک در فوم هنگام آزمون خمش است و این قضیه در مورد نمونه S4-60 بیشتر مشهود است. بعلاوه در این دو نمونه شکست الیاف نیز که در کامپوزیت معمولا آخرین مکانیزم شکست است، به دلیل عبور ضربه‌زن از لایه‌ها و ورود به فوم، از ابتدای آزمون خمش مشاهده می‌گردد ولی در بقیه نمونه‌ها این کانت‌ها کمتر بوده و کامل نیست. در نمونه S3-60 تعداد کانتهای جدایش الیاف از ماتریس بیشتر بوده ولی در نمونه S3-38 تعداد کانتهای شکست الیاف بیشتر استخراج‌شده‌است. در نمونه S3-60 از روی نمودار نیرو-زمان مشاهده می‌گردد که افت ناگهانی رخ داده و از تصاویر چشمی پیش ضربه نیز نفوذ کامل ضربه زن تا فوم قابل مشاهده‌است که این مورد را قابل توجیه می‌نماید.

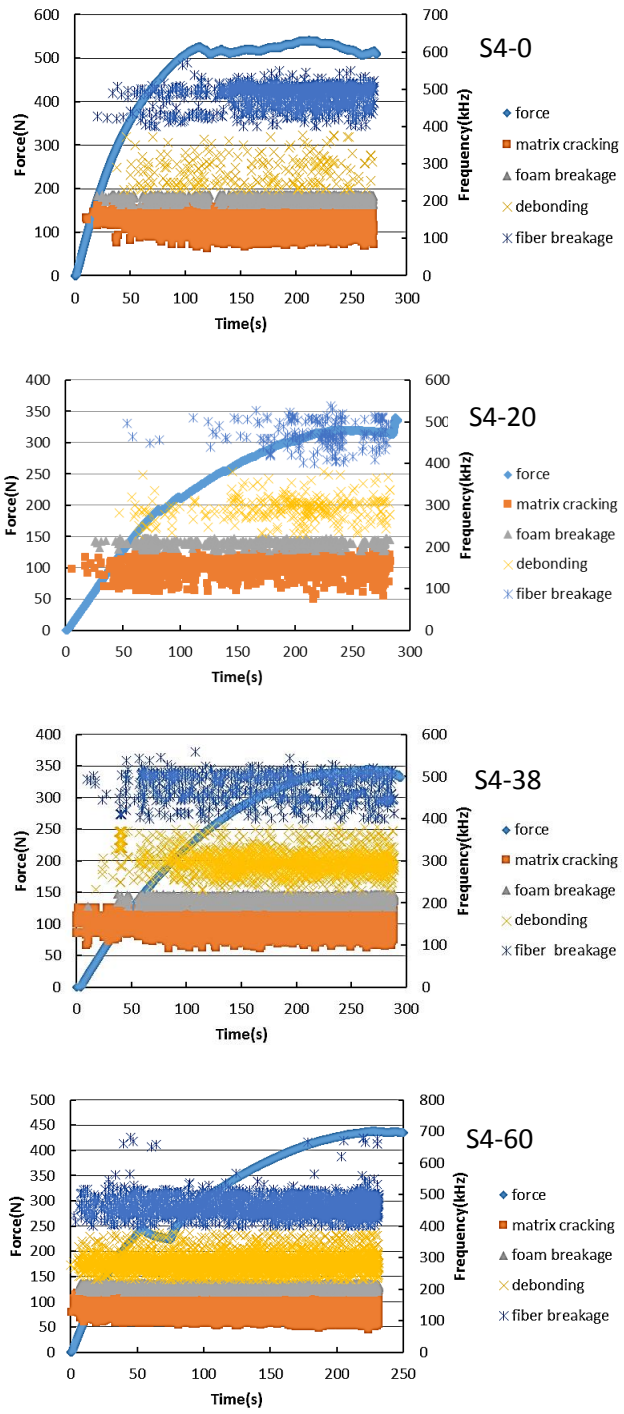


Fig. 4 Force and frequency counts regarding to time for S4 samples

شکل 10 نمودارهای نیرو و کانتهای فرکانسی بر حسب زمان برای نمونه S4

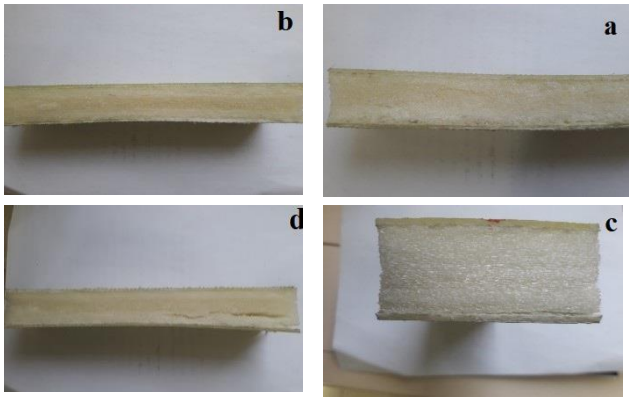


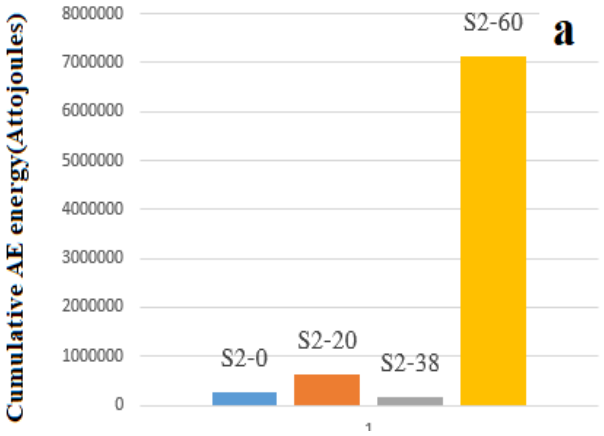
Fig. 11 Side view for S4 sandwich panels, a) S4-0, b) S4-20, c) S4-38, d) S4-60

شکل11 تصاویر نمای جانب ساندویچ‌پانل‌ها با لایه‌چینی نوع S4 ،الف:S4-0،ب: S4-20 ، ج:S4-38 ، د:S4-60

در مورد نمونه‌های S4 از روی نمودارهای نیرو-زمان قابل مشاهده‌است که این نمونه‌ها نیروی زیادی را در آزمون تحمل نمی‌کنند و سطح نیروها پایین است (شکل 10). در مورد نمونه S4-20 جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف کمتری رخ داده‌است. در تمامی نمونه‌ها شکست در فوم قابل مشاهده‌است(شکل 11) و کانت‌های شکست فوم نیز به درستی استخراج‌شده و تایید این موضوع است. در مورد نمونه‌های S4-38 و S4-60 در مورد تمامی مکانیزم‌های شکست سطح وسیعی از کانت‌ها مشاهده می‌گردد که این مورد از تصاویر چشمی نیز قابل مشاهده‌است و نفوذ ضربه‌زن در آزمون پیش ضربه نیز باعث شکست الیاف بخصوص در نمونه S4-60شده‌است.

3-2-تفکیک مجموع انرژی وقایع آکوستیک هریک از مکانیزم‌های شکست

بعد از به‌دست آوردن نمودار نیرو-زمان-فرکانس برای نمونه ها مجموع انرژی آکوستیک برای هریک از محدوده‌های فرکانسی مرتبط با مکانیزم‌های شکست محاسبه می‌شود و اطلاعات به‌دست آمده با نتایج به‌دست آمده از بررسی‌های چشمی نمونه‌های ساندویچ‌پانل مقایسه خواهدشد. بعلاوه به داده‌های مراجع، محدوده فرکانسی جدید یافت‌شده مربوط به شکست فوم (190 الی 220کیلوهرتز) نیز اضاف می‌گردد تا در تحلیل انرژی شکست مکانیزم مورد بررسی قرار بگیرد.



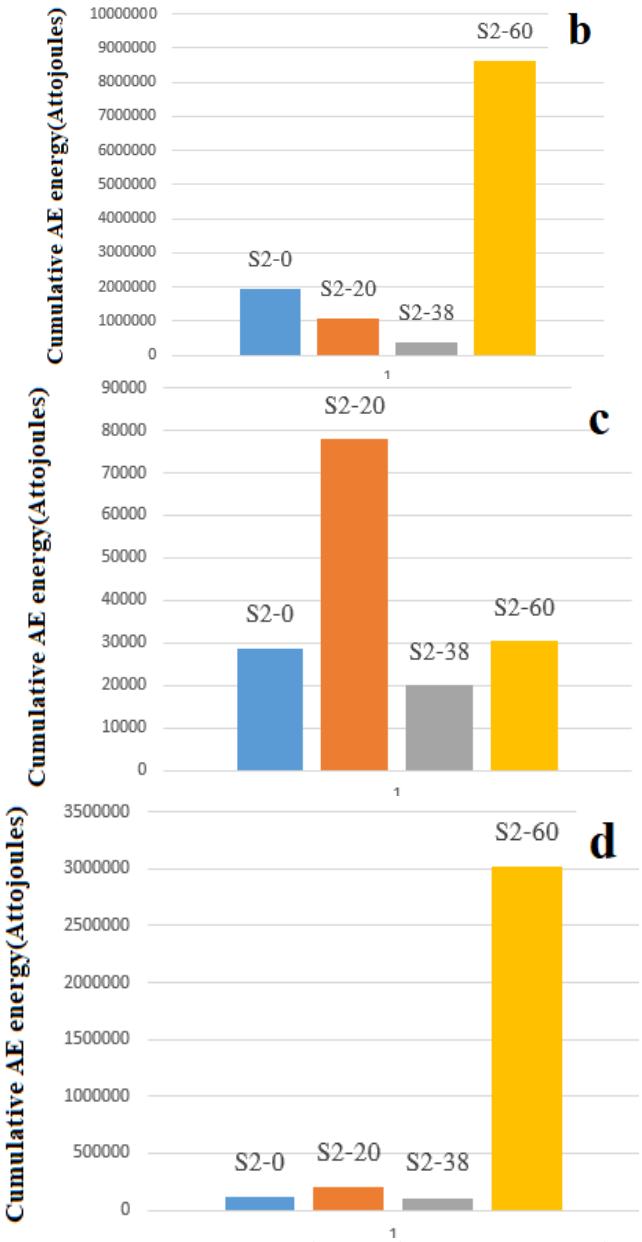
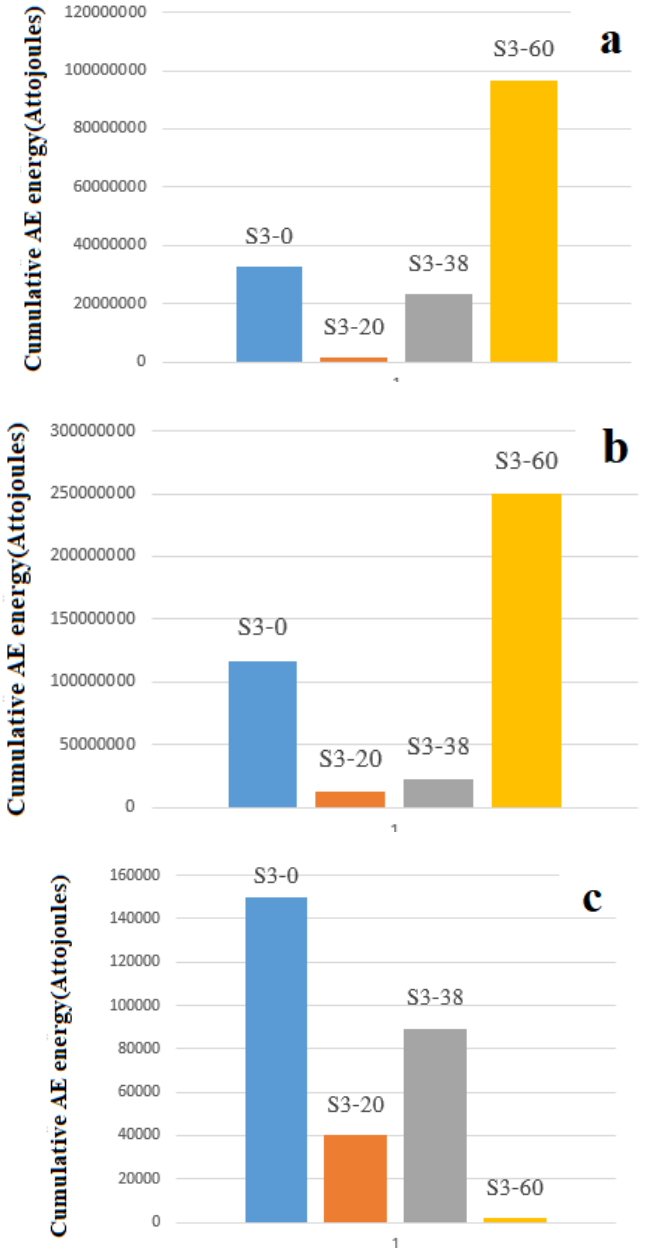


Fig. 12 Total acoustic energy for each fracture mechanisms of S1 sandwich panels, a)foam cracking, b)resin cracking, c)fiber breakage, d) fiber debonding from matrix

شکل12 مجموع انرژی آکوستیک برای هر یک از مکانیزم‌های شکست برای نمونه ساندویچ‌پانل با کدS1 الف:شکست فوم، ب:شکست رزین، ج:شکست الیاف، د:جدایش الیاف از رزین

همانگونه که در شکل 12 قسمت الف مشاهده می‌شود انرژی شکست فوم برای نمونه S1-20 از همه بالاتر است و با بررسی چشمی نمونه های ساندویچ‌پانل در شکل 5 مشاهده می‌شود که شکست صفحه‌ای فوم در نمونه ازS1-20 از مابقی نمونه‌ها بیشترین بوده‌است. همینطور تنها در نمونه S1-38 شکست لایه در ساندویچ‌پانل رخ داده و با مشاهده موارد ج و د در شکل 12 انرژی شکست الیاف و جدایش الیاف از رزین برای نمونه S1-38 نه در رده بالاترین ولی در بین بالاترین‌ها قرار دارد.

همانطور که در بررسی‌های چشمی اشاره‌شده که شکست فوم در نمونه S2-60 واضحتر از S2-38 است، با مراجعه به قسمت الف از شکل 13 انرژی شکست فوم S2-60 نسبت به S2-38 در مقادیر بسیار بالاتری قرار دارد. اشاره‌شد که جدایش الیاف از رزین برای همه نمونه‌های لایه‌چینی S2 یکسان است و همانطور که در تصویر د از شکل 12 مشاهده می‌شود انرژی جدایش الیاف تقریبا برای همه موارد (به‌استثناS2-60) در محدوده یکسانی قرار دارد. در شکل 7 مشاهده‌شد که نمونه S2-38 تقریبا هیچگونه آسیب قابل مشاهده‌ای از شکست فوم در آن مشاهده نمی‌شود و با مراجعه به قسمت الف از شکل 13 مشاهده می‌شود انرژی شکست فوم برای نمونه S2-38 کمترین نسبت به مابقی است.



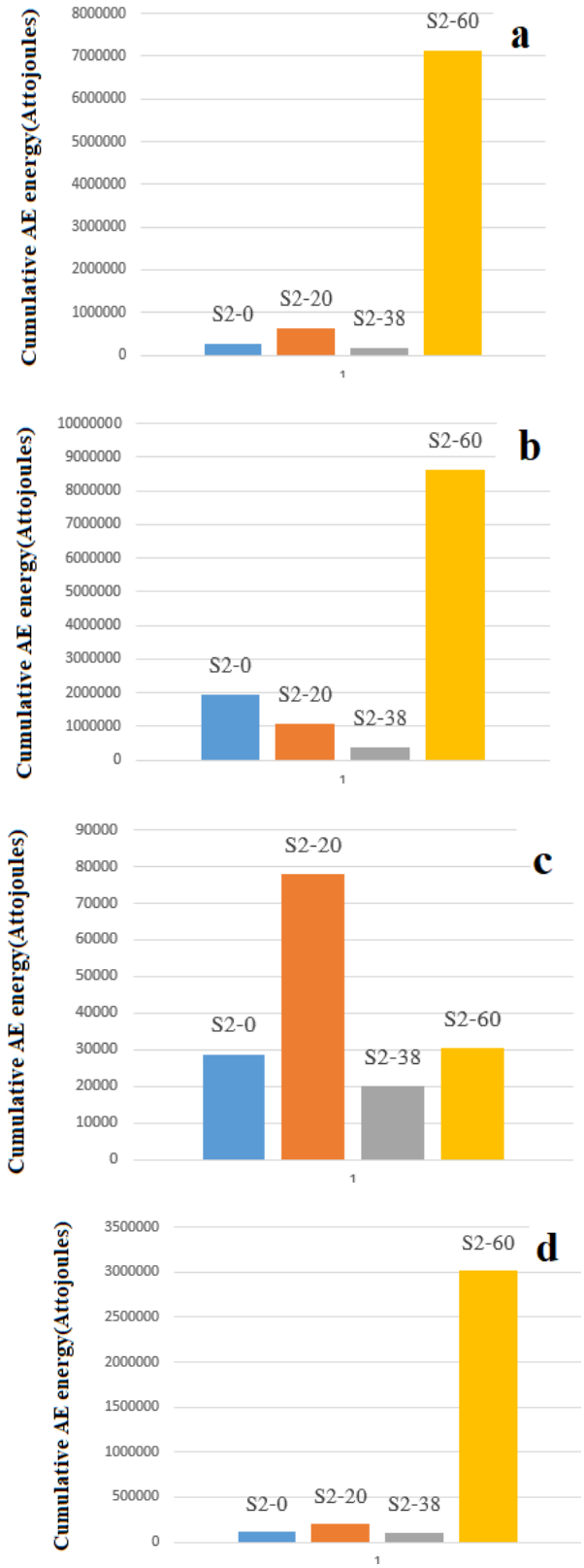


Fig. 13 Total acoustic energy for each fracture mechanisms of S2 sandwich panels, a)foam cracking, b)resin cracking, c)fiber breakage, d) fiber debonding from matrix

شکل 13 مجموع انرژی آکوستیک برای هر یک از مکانیزم‌های شکست برای نمونه ساندویچ‌پانل با کدS2 الف:شکست فوم، ب:شکست رزین، ج:شکست الیاف، د:جدایش الیاف از رزین

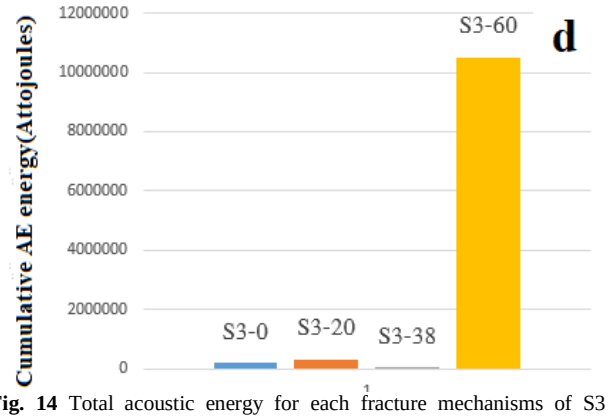
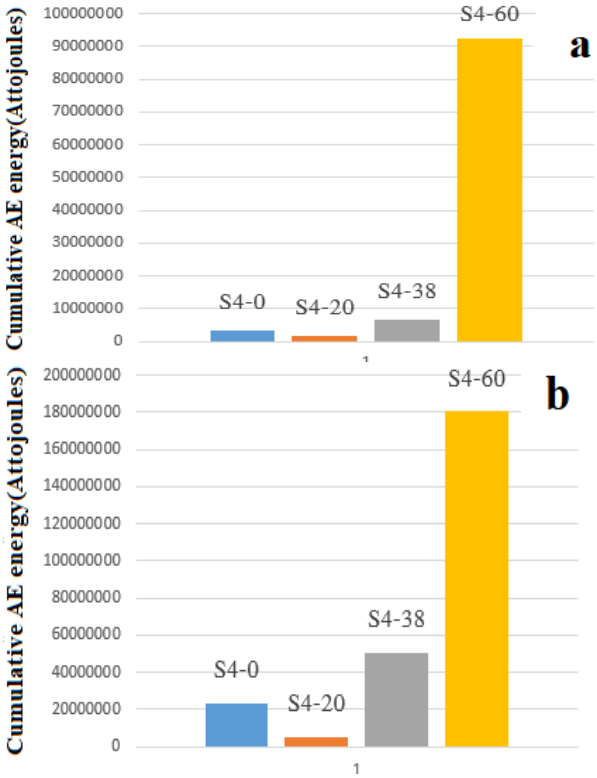


Fig. 14 Total acoustic energy for each fracture mechanisms of S3 sandwich panels, a)foam cracking, b)resin cracking, c)fiber breakage, d) fiber debonding from matrix

شکل 14 مجموع انرژی آکوستیک برای هر یک از مکانیزم‌های شکست برای نمونه ساندویچ‌پانل با کدS3 الف:شکست فوم، ب:شکست رزین، ج:شکست الیاف، د:جدایش الیاف از رزین

همانطور که در شکل 8 مشاهده‌شد تنها در نمونه S3-60 جدایش الیاف از رزین دیده می‌شود، با مراجعه به قسمت د از شکل 14 مشاهده می‌شود که انرژی جدایش الیاف از رزین در محدوده بسیار بالاتری نسبت به بقیه قرار دارد، در بررسی‌های چشمی ساندویچ‌پانل‌های S3 فقط در S3-0 و S3-60 شکست فوم مشاهده‌شد که با مقایسه‌این بررسی‌ها نسبت به مورد الف از شکل 14 مشاهده می‌شود که در نمونه‌های S3-0 و S3-60مقادیر انرژی شکست فوم نسبت به دو مورد دیگر در محدوده بالاتری قرار دارد. در نمونه S3-20 تقریبا هیچ گونه آسیب فوم مشاهده نمی‌شود و انرژی شکست فوم برای این نمونه پایین‌ترین مقدار نسبت به سایر نمونه‌های S3 است.



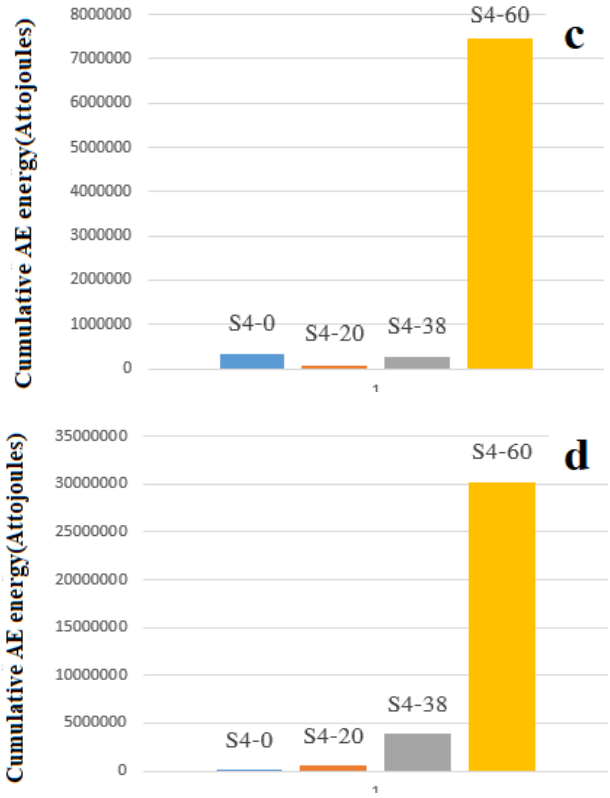


Fig. 15 Total acoustic energy for each fracture mechanisms of S4 sandwich panels, a)foam cracking, b)resin cracking, c)fiber breakage, d) fiber debonding from matrix

شکل 15 مجموع انرژی آکوستیک برای هر یک از مکانیزم‌های شکست برای نمونه ساندویچ‌پانل با کدS4 الف:شکست فوم، ب:شکست رزین، ج:شکست الیاف، د:جدایش الیاف از رزین

همانطور که در شکل 15 برای نمونه‌های S4 قابل رویت است و در شکل 10 نیز مشاهده‌شد جدایش الیاف از زمینه برای نمونه‌هایی که از قبل با انرژی ضربه بالاتری آسیب دیده‌اند، بیشتر است. با مراجعه به قسمت د از شکل 15 مشاهده می‌شود که انرژی آکوستیک جدایش الیاف از ماتریس از نمونه سالم S4-0 تا S4-60 که بیشترین آسیب را دیده‌است از چپ به راست به ترتیب افزایش می‌یابد، همچنین با مشاهده تصویر چشمی نمونه S4-60 در شکل11 مشاهده‌شد که شکست فوم در این نمونه از سایر نمونه‌های S4 بیشتر است و با مقایسه این رویداد با مقادیر انرژی شکست فوم در تصویر شکب 15(الف) مشاهده می‌شود انرژی شکست فوم برای این نمونه در رده بالاترین نسبت به سایر نمونه‌های S4 قرار دارد بعد از نمونه S4-60 نمونه) S4-38 با تفاوت فاحشی نسبت به (S4-60 بالاترین انرژی شکست فوم را نسبت به سایرین دارد و با مشاهده چشمی این نمونه یکی از آسیب‌های وارده بر آن جدایش فوم از لمینت است، نمونه‌های S4-0 و S4-20 که تقریبا هیچ گونه آسیب فوم در آنها دیده نمی‌شود در رده پایین‌ترین مقادیر انرژی شکست فوم قرار دارند.

4- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی و تشخیص مکانیزم‌های تخریب پانل‌های ساندویچی کامپوزیت پلی‌استر/فیبر شیشه با هسته فوم پلی اورتان در خمش با کمک داده‌های آزمون آکوستیک امیشن پرداخته‌شد. این مکانیزم‌های

تخریب شامل شکست ماتریس پلیمری، جدایش لایه‌ای، شکست و رشد ترک در فوم و شکست الیاف است. بدین منظور از تصاویر چشمی تخریب نمونه‌ها و داده‌های نیرو-جابجایی نیز استفاده‌شد. 4 سری چیدمان الیاف در لایه‌های نمونه‌های کامپوزیتی و 4حالت برای نمونه‌ها شامل بدون پیش ضربه و حاوی پیش‌ضربه‌های 20، 38 و 60 ژول قبل از خمش مورد بررسی قرار گرفت.

مقایسه داده‌های دوبخش اول و دوم نشان از ارتباط خوب و تنگاتنگ بین داده‌های آکوستیک و بررسی‌های چشمی از ساندویچ‌پانل‌ها دارد. هم چنین در اکثر لایه‌چینی‌ها (S2، S3،S4) نمونه‌هایی که دارای پیش آسیب ناشی از ضربه بودند در آزمون خمش در تمامی مکانیزم‌های شکست، انرژی آکوستیکی بالاتری از خود انتشار دادند که نشان از استحکام خمشی پایین جسم و ظرفیت کمتر نمونه در جذب انرژی کرنشی (به علت وجود آسیب قبلی در نمونه) دارد.

درکل مشاهده‌شد که نمونه‌های لایه‌چینی S1 سطح نیروی کمتری در آزمون خمش تحمل کردند و بیشترین نیروی تحمل‌شده نیز مربوط به نمونه‌های S3 و بعد از آن S2 بود. این مورد بطور مستقیم مربوط به نحوه لایه‌چینی نمونه‌ها است. نمونه S4-60 بیشترین سطح انرژی آکوستیک در تمامی مکانیزم‌های شکست را هنگام آزمون خمش از خود ساطع کرد.

نتایج نشان داد که تطابق و هماهنگی نسبتا خوب داده‌های آکوستیک با بررسی‌های چشمی انجام‌شده از مکانیزم‌های شکست رخ داده در نمونه‌های ساندویچ پانل قابل مشاهده بوده و قابلیت تفکیک فرکانسی هر مکانیزم شکست وجود دارد. تشخیص محدوده فرکانسی جدید شکست فوم (190الی 220 کیلوهرتز) و صحه‌گذاری بر روی آن با تطابق خوب داده‌های آکوستیک و بررسی‌های چشمی انجام‌شده صورت‌گرفت.

همچنین نتایج نشان داد که با بررسی نمودارهای فرکانس-انرژی آکوستیک مشخص‌شد که شکست نمونه‌های ترد(رزین و فوم) در هر رویداد مختلف آکوستیک علیرغم انرژی پایین هرکدام از این مکانیزم‌ها به صورت تک اتفاق، ولی در مجموع به علت بالاتر بودن تعداد وقایع آنها انرژی‌های بالاتری با پراکندگی انرژی بیشتر نسبت به نمونه‌های نرم (الیاف شیشه) آزاد می‌کنند. محدوده فرکانسی این نوع مکانیزم‌ها نیز پایین‌تر (حداکثر 220 کیلوهرتز) و با پراکندگی فرکانسی کمتر وقایع آکوستیک می‌باشند. اما رویدادهای آکوستیک در نمونه شکست نرم الیاف شیشه علیرغم انرژی بالای هر واقعه، به دلیل کم بودن تعداد وقایع درمجموع با انرژی‌های کمتر و به‌صورت متراکم و نزدیک بهم اتفاق افتاده‌است. این نوع مکانیزم‌های شکست نرم در وقایع (کانت‌های) آکوستیک در محدوده فرکانسی بیشتر (بالای 250 کیلوهرتز و اغلب تا 550کیلوهرتز و در برخی موارد تا 1000 کیلوهرتز) و با پراکندگی بیشتر ایجاد می‌کنند.

5- مراجع

[1] Ghasemi-Ghalebahman, A. and Sayyar, H., "Failure mechanisms in open-hole laminated composites under tensile loading using acoustic emission," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, pp. 143-152, 2017.

[2] Fotouhi, M. and Heydari, H. and Ahmadi, M. and Pashmforoush, F., "Characterization of Composite Materials Damage Under Quasi-Static Three-Point Bending Test Using Wavelet and Fuzzy C-means Clustering"In Persian, Journal of Composite Materials, Vol. 46, pp. 1795-1808, 2012.

[3] Yong, G. Denghong, X. Tian, H. Ye, L. Naitian, L. Quanhong, Y. Yanrong, W., "Identification of damage mechanisms of carbon fiber reinforced silicon carbide composites under static loading using acoustic emission monitoring," Ceramics International Journal, Vol.45, No.11, pp. 13847-13858, 2019.

[4] Beheshtizadeh, N. Mostafapour, A. Abbasi, H., "Effect of fiber layout on signal analyzing of carbon/glass/epoxy hybrid composite laminates flexural loading using acoustic emission" Vol. 136, pp. 608-614, 2019

[5] Zarif Karimi, N. Heidary, H. Ahmadi, M., "Monitoring of residual tensile strength in drilled composite laminates by acoustic emission," In Persian, Modares Mechanical Engineering Journal, Vol. 13,No. 15, pp. 169-183, 2013.

[6] Ahmadi Najabadi, M. Sedighi, M. Salehi, M. Hossini Toudeshky, H., "Analysis and detection of failure in aluminium/E-glass prepreg interface with acoustic emission," Journal of Science and Technology Composite, Vol.1, No.1, pp.13-22, 2015.

[7] Refahi Oskouei, A. Ahmadi Najafabadi, M., "Acoustic Emission Characteristics of Mode I Delamination in Glass/Polyester Composites," Journal of Composite Materials, Vol. 44, pp. 793-807, 2010.

[8] Ameur, M. B., Rebiere, J. L., El Mahi, A., Beyaoui, M., Abdennadher, M., & Haddar, M., "Damage mechanisms assessment of hybrid carbon/flax fibre composites using acoustic emission," In MATEC Web of Conferences (Vol. 283). EDP Sciences, 2019.

[9] Beheshtizadeh, N. Mostafapour, A. Biglari, H.,"Damage evaluation of composite beam in three point bending test by acoustic emission: frequency domain", In Persian, Aerospace Knowledge and Technology Journal, Vol. 5, No. 1, pp. 77-87, 2016.

[10] Zakizadeh, A.M. Refahi-Oskouei, A. Hamzehlu, R.,"Damages evaluation of low velocity impact on Glass/Polyester-foam sandwich panels using the acoustic technique", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 2, pp. 319-329, 2019.

[11] Refahi Oskouei, A. and Zakizadeh, A. and Hamzehloo, R., "Investigation Impact Behavior of Composite Sandwich Panels Foam-Glass/Polyester Using Acoustic Emission," In Persian, 3rd International Conference on Mechanical & Aerospace Engineering, 2018.

[12] 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," In Persian, Modares Mechanical Engineering Journal, Vol.19, No.3, pp. 587-596, 2019.

[13] ASTM D6264 / D6264M-17, Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite to a Concentrated Quasi-Static Indentation Force, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

[14] ASTM D7136 / D7136M-15, Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

[15] ASTM D790-17, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

[16] ASTM E1106 - 12, Standard Test Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors, 2017.

[17] Tatro, C. A., "Design Criteria For Acoustic Emission Experiment, In Acoustic Emission," ASTM STP 505, hiladelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1972.

[18] Hsu, N.; Eitzen, D., "AE Signal Analysis- Laboratory Experiments Examining the Physical Processes Of Acoustic Emission," Proc. Fifth Int. Acoustic emission Symp., Tokyo: Japanese Society for NDI, pp. 67-78, 1980.

[19] Fotouhi, M., Pashmforoush, F. Shokri, V. Ahmadi, M., "Investigation of damage mechanisms during delamination in composites by use of Wavelet," In Persian, International Conference On Manufacturing Engineering, Tehran, Iran, 2011.

[20] Saeedifar, M. Fotouhi, M., "Classification of damage mechanisms during delamination growth in sandwich composites by acoustic emission," Modares Mechanical Engineering, Vol.14, No.6, pp. 144-152, 2014.