



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



ارزیابی عیوب حاصل از ضربه سرعت پایین بر روی پانل‌های ساندویچی شیشه/پلی استر-فوم با بهره گیری از روش آکوستیک امیشن

امیرمحمد زکی‌زاده¹، امیر رفاهی اسکویی^{2*}، سید رضا حمزه‌لو³

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

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

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

* تهران، 16785-136، amir.refahi@ sru.ac.ir

چکیده

از پانل‌های ساندویچی در سازه‌های مختلف هوافضا، کشتی، و غیره به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، عایق صوتی و حرارتی و خواصی نظیر آنها استفاده می‌گردد. مطالعه بر روی مکانیزم شکست در کامپوزیت‌ها و به خصوص پانل‌های ساندویچی از موارد به روز مورد تحقیق می‌باشد. در این مقاله برای مطالعه مقاومت به ضربه و انواع عیوب ایجاد شده در پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی شیشه/پلی استر با فوم پلی اورتان با 3 نوع لایه چینی مختلف، از داده‌های روش آزمون غیر مخرب آکوستیک امیشن استفاده شده است. با تحلیل همزمان داده های آکوستیک و مطالعه نمودارهای نیرو-جابجایی و تصاویر چشمی نمونه ها پس از ضربه های متفاوت 20، 38 و 60 ژول، بررسی مکانیزمهای شکست ایجاد شده صورت گرفته‌است. بدین منظور نمودار نیروجابجایی و انرژی آکوستیک در هر حوزه فرکانسی در حین ضربه تفسیر شده و ارتباط آنها با انواع شکست رخ داده در نمونه‌ها، مکانیزم شکست رخ داده از قبیل شکست فاز زمینه پلی‌استر، الیاف، جدایش الیاف از فاز زمینه در این نوع پانل ساندویچی استخراج شده است. همچنین با مطالعه نمودارهای نیروجابجایی و بررسی پارامترهای حداکثر نیروی واکنشی و میزان برگشت الاستیک در تایید نتایج داده‌های آکوستیک صحت گذاری صورت گرفته است. نتایج نشان داد که مقاومت به ضربه لایه‌چینی متعامد از مابقی نمونه ها به مقدار حداقل 30 الی 40 درصد در تمامی ضربه‌ها بیشتر بوده‌است.

اطلاعات مقاله

دریافت: 97/08/19

پذیرش: 97/10/29

کلیدواژگان:

آکوستیک امیشن

پانل ساندویچی

استحکام ضربه ای

مکانیزم‌های شکست

Damages evaluation of low velocity impact on glass/polyester-foam sandwich panels using the acoustic technique

Amir Mohammad Zakizadeh, Amir Refahi-Oskouei*, Reza Hamzehlu

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

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

Keywords

Acoustic emission
Sandwich panel
Impact strength
Failure mechanisms

Abstract

Nowadays increasing application of Sandwich panels in various structures as like as aerospace and ship is due to excellent high strength to weight ratio, sound insulation and thermal properties. The study of failure mechanism in composites and especially sandwich panels are investigated as cutting edge. In this research, the acoustic emission data of low velocity impact tests has been used to study the impact strength and various defects created in glass / polyester-polyurethane foam composite sandwich panels with 3 different types of Lay-up technique. The analysis of the acoustic data and the study of the force-displacement diagrams and the visual images of the specimens after the various impacts of 20, 38 and 60 J have been studied. For this purpose, the obtained force-displacement diagrams and acoustic energy in each frequency range during the impact tests are interpreted and their relation to the types of failure mechanism, such as matrix cracking, fiber breakage and debonding in this type of sandwich panel has been extracted. Also, by studying the force-displacement diagrams and investigating the maximum reaction force and elastic return strength, acoustic events in signals has been verified. The results showed that the impact resistance of the cross-ply lay-up was 30 to 40% higher than other specimens in the all impact tests.

Please cite this article using:

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.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1- مقدمه

خواص منحصر به فرد کامپوزیت‌ها مانند مقاومت ویژه مکانیکی و مقاومت خوردگی بالا باعث شده تا از این مواد به طور گسترده در صنایع مختلف از جمله صنعت هوایی، کشتی‌سازی، ساختمان‌سازی و غیره استفاده گردد. حساسیت سازه‌های کامپوزیتی نسبت به ضربه یکی از بزرگترین نگرانی‌ها در کاربردشان در سازه‌های مهندسی است، بارگذاری ضربه می‌تواند باعث ایجاد خرابی موضعی در سازه شود که مقاومت و پایداری آن را به شدت کاهش می‌دهد، از این‌رو بررسی پارامترهای موثر بر افزایش مقاومت به ضربه پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی از جمله نحوه لایه چینی الیاف، جنس الیاف مورد استفاده و غیره از نیازهای امروزه صنعت می‌باشد.

آسیب‌های ناشی از تست ضربه معمولاً داخلی هستند و با بازرسی چشمی قابل تشخیص نیستند، لذا کاربرد روش‌های غیرمخرب تشخیص عیب برای آن‌ها ضروری است. در میان آزمون‌های غیرمخرب مختلف، روش آکوستیک امیشن به علت داشتن حساسیت بالا نسبت به فرآیندهایی که موج تنشی در داخل قطعه ایجاد می‌کند، برای تشخیص خرابی بسیار مورد توجه است. بطوریکه این روش با جمع‌آوری امواج ساطع شده از خرابی‌ها در حین بارگذاری، می‌تواند نوع عیب به‌وجود آمده را تشخیص و شناسایی کند. در این راستا پژوهش‌های مختلفی بر روی کامپوزیت‌ها با روش‌های مخرب و غیرمخرب و شبیه‌سازی‌های عددی با نرم افزار صورت پذیرفته است که در ادامه به موارد استفاده از روش آکوستیک امیشن برای بررسی عیوب در کامپوزیت‌ها اشاره می‌شود.

در سال 2003، جانسون به همراه همکارانش با شبیه‌سازی ضربه بر روی کامپوزیت‌های پوسته‌ای به این نتیجه رسیدند که سفتی ضربه زن یکی از فاکتورهای موثر بر میزان آسیب ایجاد شده در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف است [1]. وو و چویی در سال 2007 به شکست در نوع ترک لبه‌ای در لایه‌چینی‌های مختلف در دو جنس مختلف کامپوزیت پرداختند. آن‌ها نمونه‌ها را از دو طرف تحت کشش قرار دادند و فرکانس غالب سیگنال‌های حاصل از روش انتشار صوت در لایه چینی‌های مختلف کامپوزیت را به روش تبدیل فوریه سریع به‌دست آوردند [2]. در سال 2009، دکا و همکارانش به بررسی پاسخ کامپوزیت‌های لایه‌ای تحت اثر ضربه چندگانه با سرعت بالا از دیدگاه مدل‌سازی و آزمایش تجربی پرداختند. آزمایش بر روی کامپوزیت سه لایه‌ای و کیوم شده با الیاف شیشه انجام شد و آسیب‌های به‌وجود آمده بر روی آن توسط روش غیرمخرب نوری ارزیابی گردید [3]. در سال 2009، رفاهی اسکویی و همکاران بر روی توزیع استحکام شکست در کامپوزیت‌های شیشه/پاکسی با استفاده از تکنیک آکوستیک امیشن پرداختند. این پژوهش یک روش تجربی برای توزیع استحکام شکست الیاف در طول آزمون کشش با استفاده از آزمون آکوستیک امیشن به منظور بررسی شکست رشته‌های الیاف بصورت تکی ارائه می‌دهد [4]. فتوحی و همکاران، ساز و کارهای خرابی را در نمونه‌های شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری خمشی سه نقطه دسته بندی نمودند. اساس دسته بندی آن‌ها استفاده از روش فازی سی مینز 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 kHz مربوط به جدایش الیاف از ماتریس و دسته با فرکانس میانگین 412.20 kHz مربوط به شکست الیاف است [5]. در سال 2012 رفاهی اسکویی و همکاران بر روی روش طبقه بندی داده‌های آکوستیک به منظور تحلیل مکانیزم‌های شکست در کامپوزیت‌های شیشه/پاکسی مطالعه کردند. نتایج نشان داد که

رابطه تنگاتنگی بین داده‌های طبقه بندی شده و مکانیزم‌های شکست وجود دارد، بعلاوه تکنیک آکوستیک امیشن به همراه روش طبقه بندی ابزاری مفید به منظور تشخیص مکانیزم‌های شکست در کامپوزیت‌ها می‌باشد [6]. در سال 2013، نادری و همکارانش پاسخ کامپوزیت‌های GFRP را تحت ضربه با سرعت کم بررسی کردند. تاثیری که پارامترهای ضربه مانند سرعت و انرژی اولیه بر روی خیز و آسیب‌ها دارند بررسی گردید. شبیه‌سازی المان محدود توسط نرم افزار Mark انجام گردید و در نهایت تاثیر این پارامترها با نتایج تجربی مقایسه شد [7]. حسینی تودشکی و همکاران در سال 2015 حالت نوک ترک را در حین افزایش در مود اول جدایش لایه‌ها در نمونه کامپوزیتی شیشه/پاکسی بررسی کردند. آن‌ها برای بررسی محل ترک از روش‌های: دید چشمی، انتشار صوت و مدل ناحیه چسبان استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش انتشار صوت و روش اصلاح شده مدل ناحیه چسبان عملکرد خوبی برای شناسایی مرحله شروع و همچنین طول ترک در سازه‌های کامپوزیتی دارند [8]. روشن‌فر در سال 1393 جدایش بین لایه‌های پیشرونده در چندلایه‌های کامپوزیتی تحت بار ضربه تکرار شونده را مورد بررسی قرار داد. مدل ارائه شده توانست خرابی جدایش بین لایه‌های در چندلایه‌های کامپوزیتی با دقت حدود 10 درصد را پیش بینی کند [9]. در سال 2016 رفاهی اسکویی و همکارانش به بررسی استحکام باقی‌مانده کامپوزیت‌های شیشه/پلی‌استر با روش آکوستیک امیشن و تابع سنتری پرداختند. نتایج نشان داد که اندازه انرژی کرنشی به همراه انرژی آکوستیکی آزاد شده ناشی از مکانیزم‌های مختلف شکست روشی مناسب برای محاسبه تخمین استحکام باقی‌مانده و ارزیابی روند تکامل عیوب اشاعه شده در نمونه کامپوزیتی می‌باشد [10]. سایدان و همکارانش، تست کشش را روی نمونه‌های هیبریدی الیاف شیشه و الیاف کتان به همراه انتشار صوت انجام دادند. آن‌ها در ابتدا تعداد کلاس بهینه برای کلاس بندی را بر اساس کمترین نرخ روی هم افتادن به دست آوردند. سپس دامنه هر یک از خرابی‌ها را برای هر کلاس مشخص کردند. برای تعیین درصد هر یک از ساز و کارهای خرابی، نمودار تعداد ضربه مربوط به انتشار صوت را با نمودار تنش کرنش مقایسه کردند [11]. در سال 1396 قاسمی قلعه بهمین و همکاران، بر روی ساز و کارهای خرابی در کامپوزیت‌های چند لایه سوراخ دار تحت بار گذاری کششی با استفاده از انتشار صوت پرداختند. هدف از این مقاله بررسی و دسته بندی انواع مختلف ساز و کارهای خرابی در نمونه‌های کامپوزیتی چندلایه سوراخدار، تحت بار کششی با استفاده از روش انتشار صوت است. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان دهنده بازدهی مطلوب روش انتشار صوت در تعیین نوع خرابیها و مقدار درصد هر یک از آنها در کامپوزیت‌های چندلایه است [12]. در سال 1397 رفاهی اسکویی و همکاران به مطالعه رفتار ضربه‌ای پانل‌های ساندویچی شیشه/پلی‌استر-فوم با بهره‌گیری از روش آکوستیک امیشن پرداختند، نتایج حاصله حاکی از ارتباط تنگاتنگ مکانیزم‌های مختلف شکست با داده‌های آکوستیکی بود [13].

بر اساس مطالعات انجام شده قبلی در ارتباط با کامپوزیت‌های ساندویچی، نیاز به مطالعه رفتار شکست کامپوزیت‌های ساندویچی تحت ضربه سرعت پایین توسط روش غیرمخرب آکوستیک امیشن مشهود می‌باشد بطوریکه با داشتن اطلاعات حاصل از خرابی و شناسایی مکانیزم‌های خرابی بوجود آمده در این سازه‌ها می‌توان میزان عمر باقیمانده در آن‌ها را تخمین زد. لذا در این پژوهش پوسته پانل ساندویچی از 3 نوع لایه‌چینی مختلف الیاف شیشه و زمینه پلی‌استر به همراه هسته از جنس فوم پلی‌اورتان استفاده شده است. نمونه‌ها تحت ضربه با انرژی‌های مختلف قرار گرفتند. برای بررسی دقیق‌تر

2-2- آزمون فشار استاتیک

قبل از آزمون ضربه از بارگذاری استاتیکی جهت تشخیص میزان استحکام فشاری نمونه‌ها و انتخاب محدوده مناسب اعمال ضربه‌ها استفاده شد. همانطوریکه در شکل 2 نشان داده شده، این بارگذاری شامل بارگذاری نمونه بر روی یک سطح توسط سنبه (ضربه زننده) با نرخ سرعت 2 میلی متر بر دقیقه می باشد. در فشار استاتیک، دو سری آزمون انجام شد یک آزمون با آسیب جزئی به چندلایه که بیشینه نیروی آن 1930 نیوتن و میزان انرژی 16 ژول و آزمون دوم که با نفوذ سنبه به درون هسته فوم همراه بود دارای بیشینه نیروی 2150 نیوتن و میزان انرژی 32 ژول همراه بود. بعد از آسیب دیدگی پانل‌های ساندویچی در آزمون فشار استاتیکی، به منظور ایجاد همان آسیب‌های مشابه بر روی نمونه‌ها در آزمون ضربه، مقادیر انرژی بدست آمده در آزمون فشار استاتیکی همگی در عدد 1.25 ضرب خواهند شد تا انرژی لازم برای آزمون ضربه برای ایجاد آسیب دیدگی‌های مشابه فراهم آید.

2-3- آزمون ضربه

بعد از انجام آزمون فشار استاتیک نوبت به آزمون ضربه به منظور ایجاد عیب در سایر نمونه‌ها بود. آزمایش ضربه سرعت پایین با استفاده از دستگاه ضربه ثقلی انجام شد که نمای کلی آن در شکل 3 آمده است، ماکزیمم ارتفاع دستگاه حدود 5 متر بوده و قابلیت نصب انواع ضربه زننده با هندسه‌های مختلف موجود است. در این آزمون از سنبه فشاردهنده به شکل سر کروی از جنس فولاد و به قطر 16 میلی متر استفاده شد. بدین منظور سه نوع ضربه با انرژی‌های 20، 38 و 60 ژول بر روی هریک از سه نمونه از هر نوع لایه چینی مختلف (3 نوع لایه چینی) انجام شد. نمونه پانل‌های ساندویچی برای تست ضربه دارای ابعاد 20 در 20 سانتی متر برش بوده که با فیکسچرهایی با ابعاد 30 در 30 سانتی متر و ابعاد فضای باز 15 در 15 سانتی متر توسط گیره در موقعیت خود ثابت نگه داشته می‌شوند.

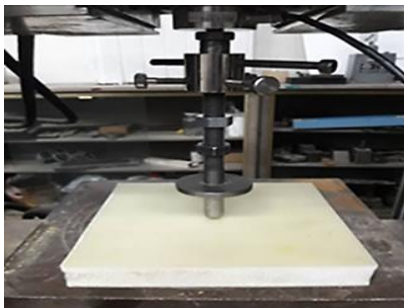


Fig. 2 Applying pressure force to the sandwich panel in a static pressure test

شکل 2 اعمال نیروی فشاری به پانل ساندویچی در آزمون فشار استاتیک

مقاومت به ضربه و جزئیات مکانیزم‌های شکست از سنسورهای تعبیه شده یکی بر روی ضربه زننده به منظور دریافت داده‌های شتاب-زمان و 2 عدد سنسور آکوستیک نصب شده بر روی ساندویچ پانل به منظور دریافت سیگنال‌های صوتی، استفاده شده است. علاوه بر این از تصاویر ضربه روی پانل‌ها و برش مقطع عرضی پانل‌ها نیز برای تحلیل مکانیزم شکست رخ داده استفاده شده است. در نهایت از رویدادهای فرکانسی رخ داده در سیگنال آکوستیک، انرژی جمعی آکوستیک، نمودارهای نیرو-جابجایی برای صحنه گذاری نتایج شکست پانل در اثر ضربه استفاده شده است.

2- مواد و روش تحقیق

در مرحله ساخت پانل‌های ساندویچی ابتدا قالب کامپوزیتی به همراه سه عدد پروفیل فولادی با سطح مقطع 40 در 40 سانتی متر طراحی و ساخته شد. بعد از ساخت قالب لایه گذاری الیاف‌های شیشه به همراه رزین پلی استر مطابق شکل 1 به روش دستی بر روی ورق‌های فولادی قالب انجام شد. بعد از لایه‌چینی الیاف بر روی دو صفحه قالب نوبت شکل‌گیری هسته (فوم پلی‌یورتان) وسط بوده بدین منظور صفحه آزاد که لایه‌چینی روی آن انجام شده را با بر روی قالب با گیره مهار کرده و ترکیب پلی‌ایل و ایزوسیانات (مواد تشکیل دهنده پلی اورتان) را در داخل فضای خالی بین دو لمینت ریخته شد. در ادامه آزمون‌های فشار و ضربه و داده برداری آکوستیک در دانشگاه امیرکبیر انجام گرفته است.

2-1- طرح لایه‌چینی و نحوه کدگذاری نمونه‌ها

در جدول 1 طرح لایه گذاری پانل‌های ساندویچی مورد استفاده آورده شده است، از آنجاییکه هر یک از انواع نمونه‌ها تحت سه نوع ضربه با انرژی‌های مختلف 20، 38 و 60 ژول قرار می‌گیرند. لذا از روش کدگذاری برای هر کدام از نمونه‌ها به فرم Tx-y استفاده شده است، که قسمت اول هر کد یعنی x بیانگر نوع لایه‌چینی و قسمت دوم بعد خط تیره یعنی y بیانگر مقدار انرژی ضربه وارد شده به نمونه می‌باشد.



Fig.1 Fabrication of sandwich panels with different fiber Lay-ups

شکل 1 نحوه ساخت پانل‌های ساندویچی با لایه چینی مختلف الیاف

جدول 1 طرح لایه چینی با زوایای مختلف برای نمونه‌های پانل ساندویچی

Table 1 layout with different angles for sandwich panels								
کد نمونه	طرح لایه‌گذاری							
T1	0	0	0	0	هسته	0	0	0
T2	0	90	0	90	هسته	90	0	90
T3	+45	-45	+45	-45	هسته	-45	+45	-45

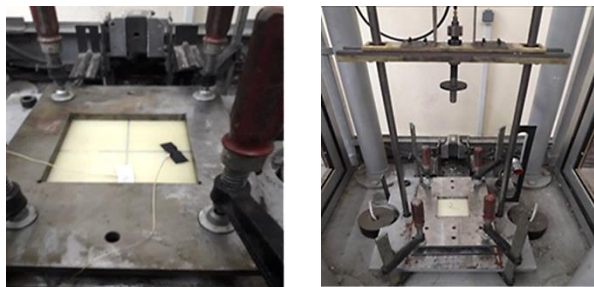


Fig. 3 Impact test device with clamping sandwich panel in its position

شکل 3 دستگاه آزمون ضربه به همراه کلمپ کردن قطعه در موقعیت خود (دانشگاه

امیرکبیر)

4-2- دستگاه آکوستیک امیشن

از دیگر اقدامات مهم در آزمون ضربه، ثبت داده‌های آکوستیک با استفاده از سیستم آکوستیک امیشن دوکاناله و سیستم پی سی آی-2¹ با نرخ داده‌برداری 40 MHz استفاده گردید. فعالیت‌های شناسایی شده توسط سنسور، به وسیله پیش‌تقویت‌کننده با حد آستانه 40 دسی بل تقویت شدند و مطابق شکل 3 ابتدا توسط دو عدد سنسور پیزو الکتریک بر روی هر یک از نمونه‌ها در موقعیت وسط هریک از ضلع‌ها موقعیت دهی شد برای بهبود عبوردهی سیگنال بین نمونه و سنسور و اتصال مناسب سنسور به سطح نمونه، از گریس سیلیکون خلاء استفاده شد. کالیبراسیون آکوستیک با آزمون‌های شکست نوک مداد مطابق استاندارد ASTM E1106 [14] انجام شده و هر آزمون دو بار تکرار شده تا خطای داده برداری حذف شود. در شکل 4 روش آزمون آکوستیک بصورت شماتیک و نمونه سیگنال آکوستیک دریافت شده در حین تست ضربه از نمونه T2-60 مشاهده می‌شود.

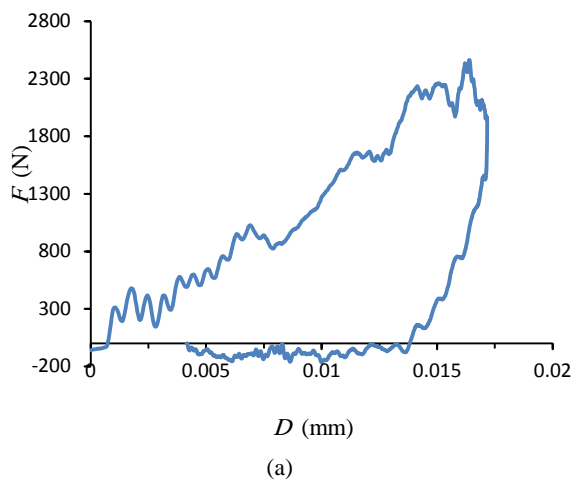
3- نتایج و بحث

در ادامه به بررسی داده‌های آزمون ضربه پرداخته شده است که به سه صورت 1- نمودار نیرو-جابجایی 2- داده‌های آکوستیک 3- تصاویر چشمی از خرابی ناشی از ضربه می‌باشد.

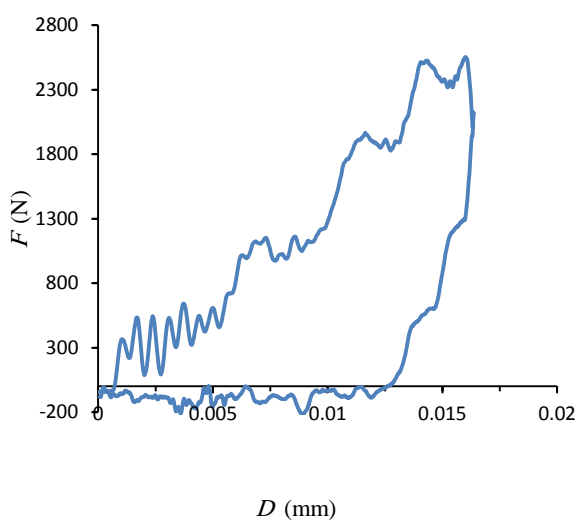
1-3- نمودار نیرو - جابجایی برای تمامی نمونه‌ها در آزمون ضربه

در این بخش نمودار نیرو-جابجایی تمامی نمونه‌ها در آزمون‌های ضربه آورده شده است. لازم بذکر است که همانطور که در شکل‌های 6.5 و 7 به ترتیب برای ضربه‌های 20، 38 و 60 ژول مشاهده می‌شود، جابجایی بر حسب متر و نیرو بر حسب نیوتون می‌باشد. این داده‌ها از سنسور شتاب سنج متصل به ضربه‌زن در دستگاه مربوط به آزمون ضربه بدست آمده است که پس از آن با انجام محاسبات به نمودار نیرو-جابجایی تبدیل می‌گردد.

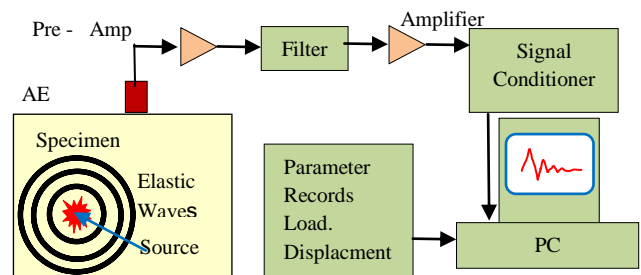
در نمودارهای نیرو-جابجایی دو پارامتر مهم برگشت الاستیک و حداکثر نیروی قابل اعمال در اثر ضربه بررسی می‌شود. نمونه‌های دارای استحکام ضربه بالاتر نیروی عکس‌العملی بالاتر به ضربه زننده وارد می‌کنند و دچار تغییرشکل پلاستیک و آسیب کمتری در حین آزمون ضربه می‌شوند. در شکل 5 همانطور که مشاهده می‌شود نمونه T2 دارای برگشت الاستیک کامل و بیشترین بیشینه نیروی اعمالی در ضربه 20 ژول نسبت به مابقی نمونه‌ها می‌باشد. بعد از نمونه T2 نمونه‌های T1 و T3 نیز دارای تغییر شکل پلاستیک تقریباً به یک اندازه و نیروی عکس‌العملی پایین‌تر از T2 می‌باشند که این امر نشان از استحکام بالاتر نمونه T2 در این مقدار ضربه دارد.



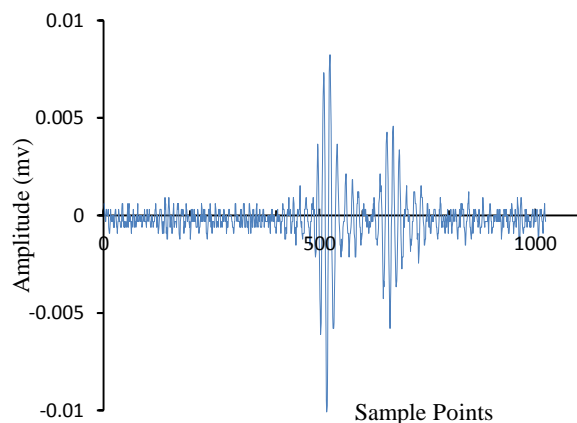
(a)



(b)



(a)

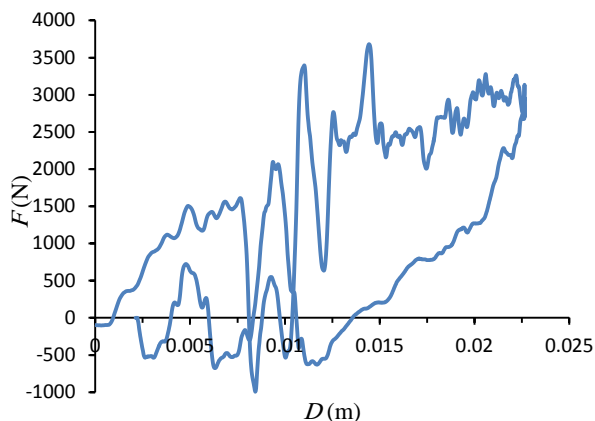


(b)

Fig. 4 (a): Acoustic emission test [15], (b): sample signal taken during impact test of sandwich panels

شکل 4 (a) آزمون غیرمخرب آکوستیک ، (b) نمونه سیگنال آکوستیک دریافت شده

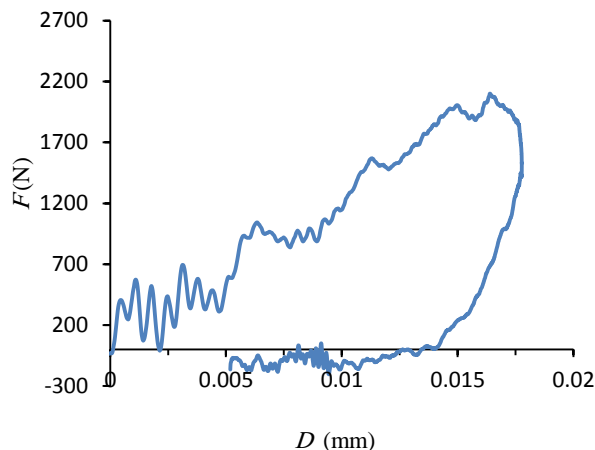
¹ PCI-2



(c)

Fig. 6 Force-Displacement diagram for 38 J impact test a: T1, b: T2, c: T3

شکل 6 نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه های با آزمون ضربه 38 ژول T1 : (a) T3(c), T2.(b)



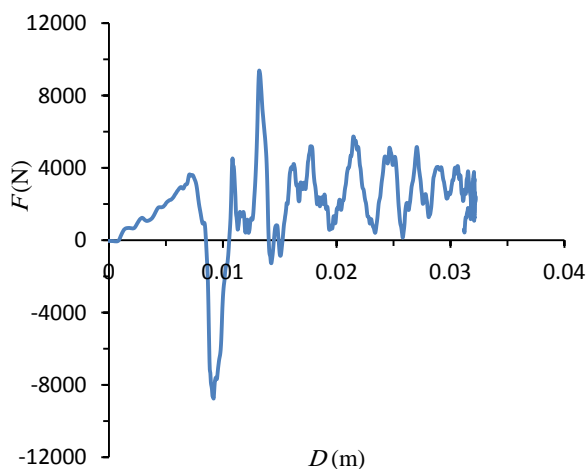
(c)

Fig. 5 Force-Displacement diagram for 20J impact test a: T1, b: T2, c: T3

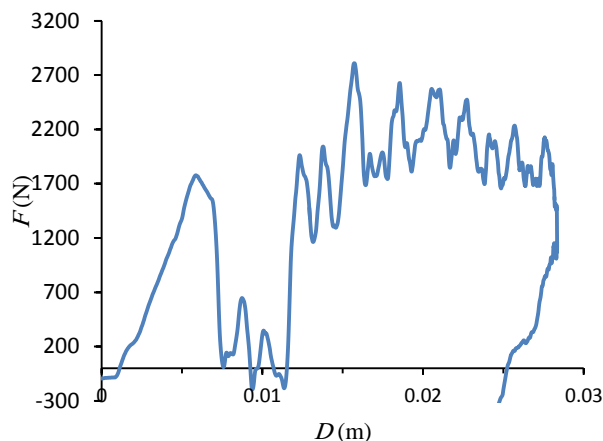
شکل 5 نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه های با آزمون ضربه 20 ژول T1 : (a) T3(c), T2.(b)

در شکل 6 که مربوط به ضربه 38 ژول می‌باشد، همانند شکل 5 بیشترین نیروی اعمالی و بیشینه جابجایی مربوط به نمونه T2 می‌باشد و بیشترین تغییر شکل پلاستیک غیرقابل بازگشت و کمترین مقدار بیشینه نیروی اعمالی نیز مربوط به T1 می‌باشد. البته نمونه T3 نیز در زمره کمترین بیشینه نیرو و دارای تغییر شکل پلاستیک نسبی می‌باشد. لازم به ذکر است که شکل کلی نمودار های نیرو-جابجایی به هم ریختگی دارد که این امر به دلیل نفوذ و تخریب جزئی نمونه توسط سنبه ضربه می‌باشد. این تخریب از روی شکل ظاهری نمونه‌ها که در جدول 3 آمده نیز قابل مشاهده است.

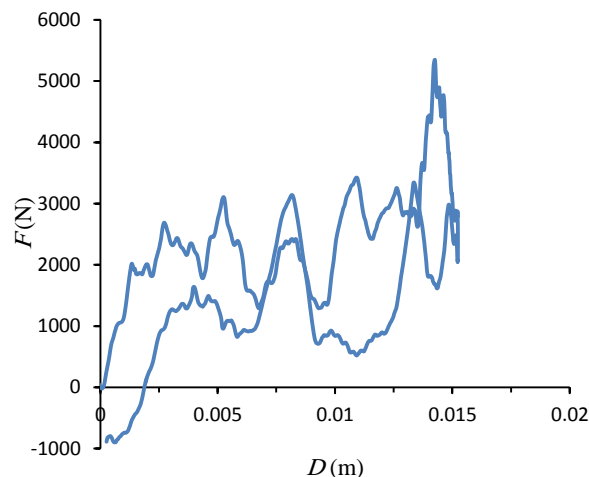
در شکل 7 در آزمون 60 ژول به دلیل آنکه ضربه‌زننده به طور کامل در فوم نفوذ کرده بنابراین به جز نمونه T2 که در حد 0.01 متر برگشت الاستیک دارد مابقی نمونه‌ها هیچکدام دارای برگشت الاستیک نیستند. همانند آزمون‌های قبل نمونه T2 همچنان دارای بیشترین بیشینه نیروی عکس العمل می‌باشد و T3 دارای کمترین بیشینه نیروی واکنشی و بیشترین تغییر شکل پلاستیک می‌باشد.



(a)



(a)



(b)

3-2- نمودار فرکانس-زمان و انرژی آکوستیک تجمعی برای هر یک از مکانیزم‌های شکست احتمالی در پانل‌های ساندویچی

در شکل 9 نمودار فرکانس-زمان مکانیزم‌های شکست احتمالی در آزمون ضربه برای برخی پانل‌های ساندویچی به عنوان نمونه آورده شده است. با توجه به مشخصات سیگنال‌های آکوستیک بدست آمده، سیگنال‌هایی که فرکانس آنها پایین 200 کیلو هرتز باشند در طبقه بندی شکست رزین قرار می‌گیرند، سیگنال‌هایی که بازه فرکانسی آنها بین 210 الی 350 کیلو هرتز هستند مربوط به گسیختگی الیاف از رزین می‌باشند و فرکانس‌های بالای 360 کیلو هرتز مربوط به شکست الیاف می‌باشند [16]. علی‌رغم متفاوت بودن نوع لایه‌های کامپوزیت و پانل‌ساندویچی با مرجع [16] به دلیل مشابه بودن جنس ماتریس و الیاف مکانیزم شکست رخ داده در این مقاله در بازه‌های فرکانسی مشابهی با مرجع [16] در سیگنال آکوستیک بروز پیدا کرده است.

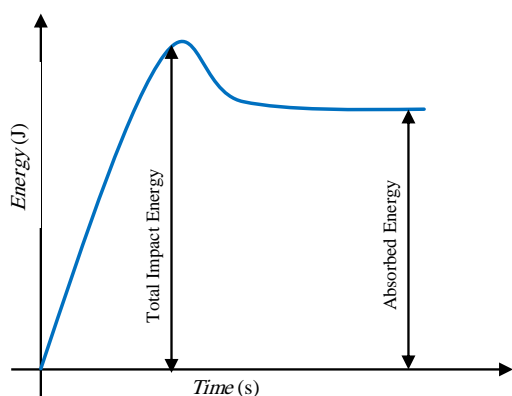


Fig. 8 a typical Energy-Time diagram obtained from impacted samples
شکل 8 نمودار شماتیک انرژی-زمان بدست آمده از نمونه‌های تحت آزمون ضربه

جدول 2 مقدار انرژی جذب شده برای هر نمونه پانل ساندویچی در آزمون ضربه

کد نمونه-انرژی ضربه	20	38	60
S1	18.19	36.562	57.36
S2	17.910	19.37	42.41
S3	18.230	27.417	54.237

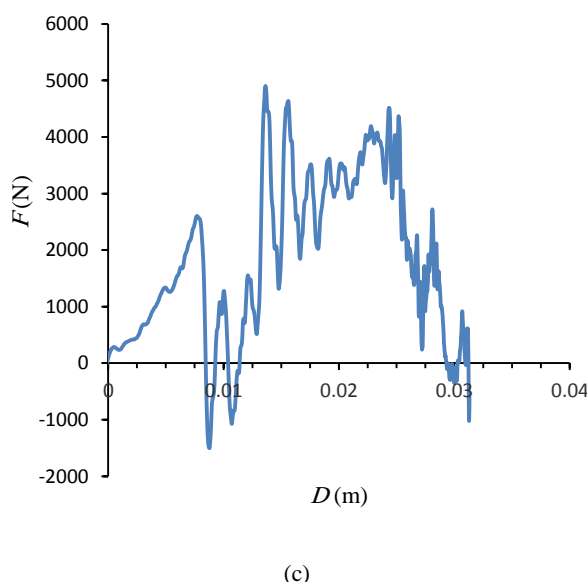
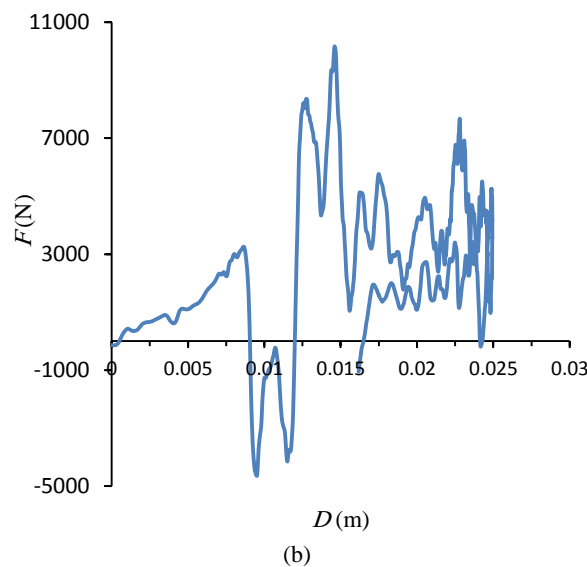
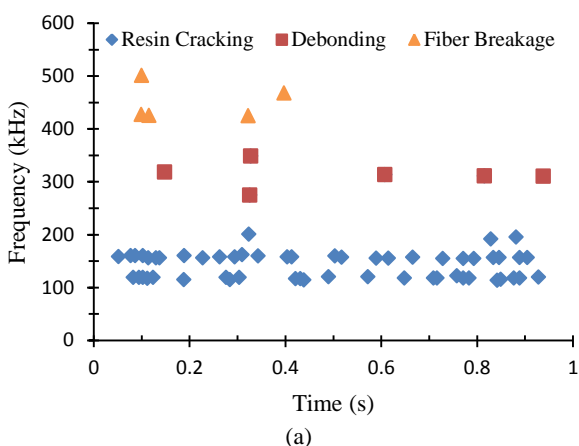


Fig. 7 Force-Displacement diagram for 60 J impact test a: T1, b: T2, c: T3

شکل 7 نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های با آزمون ضربه 60 ژول T1 : (a) T2(b), T3(c)

با مقایسه تمامی نمودارهای نیرو-جابجایی شکل‌های 5 تا 7 می‌توان دریافت که نمونه T2 بالاترین مقاومت به ضربه را در بین سایر نمونه‌ها به علت وجود کمترین میزان آسیب دیدگی با توجه به ناچیز بودن تغییر شکل پلاستیک در نمودارهای نیرو-جابجایی دارد و بعد از آن به ترتیب نمونه‌های T1 و T3 ضعیف‌ترین میزان مقاومت به ضربه با توجه به نمودارهای نیرو-جابجایی می‌باشند. این نتایج در ادامه با داده‌های آکوستیک و تصاویر چشمی تخریب از جداول 3 و 4 و 5 مقایسه می‌گردند.

در شکل 8 نمای شماتیک از منحنی انرژی-زمان بدست آمده از نمودارهای نیرو-جابجایی آزمون‌های ضربه به همراه نحوه محاسبه انرژی جذب شده از آزمون‌های ضربه ارائه شده است. با توجه به شکل 8 در جدول 2 انرژی جذب شده برای هر نمونه پانل ساندویچی در حین آزمون ضربه بدست آمده است.

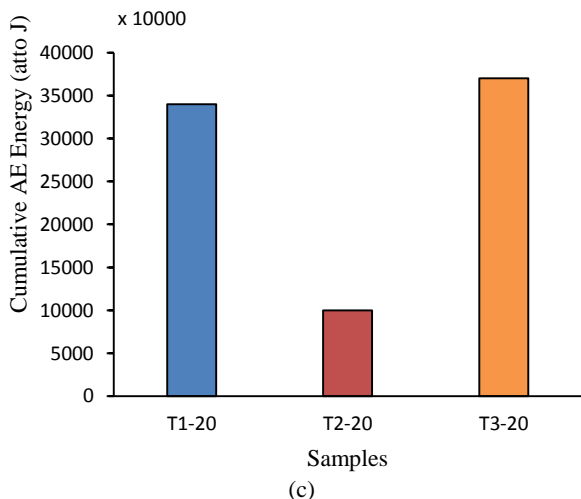
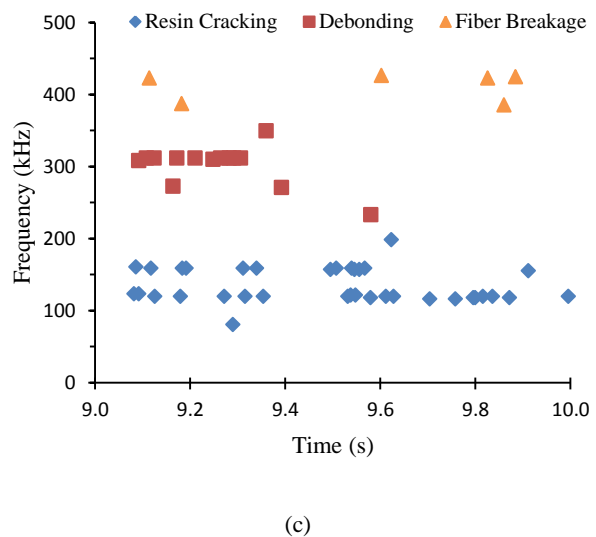
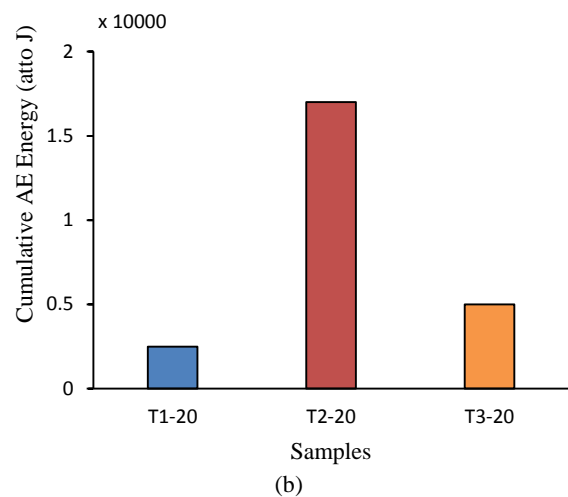
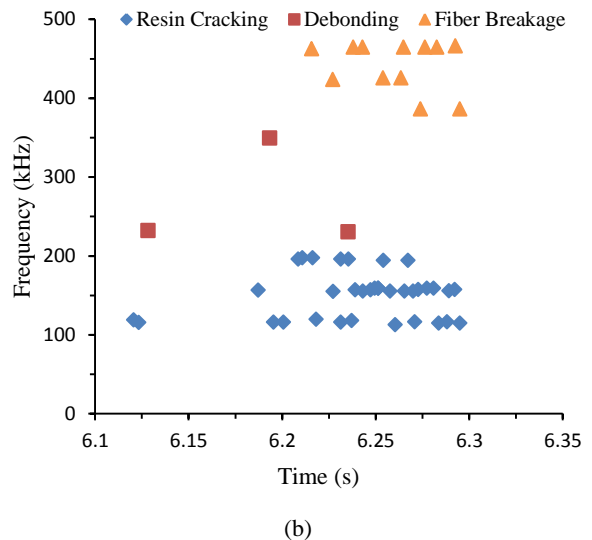
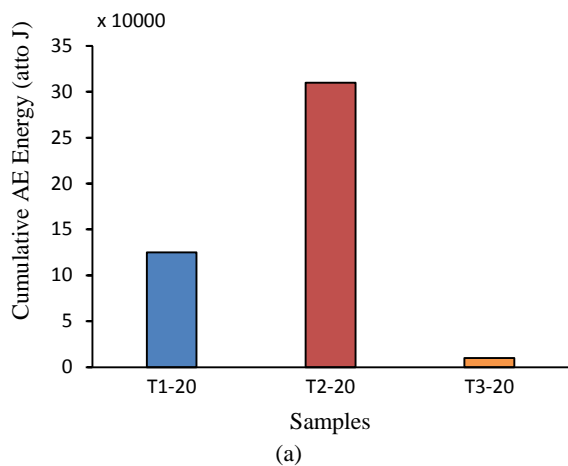


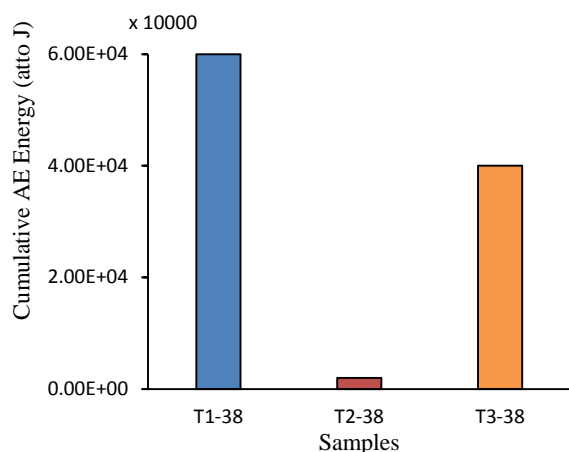
Fig. 9 Time-frequency diagram for different samples (a): T2-20, (b): T3-60, (c): T1-20

شکل 9 نمودار زمان-فرکانس برای نمونه‌های مختلف (a): T2-20، (b): T3-60، (c): T1-20

با مراجعه به جدول 4 و بررسی چشمی نمونه T2-20 مشاهده می‌شود که این نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌های تحت ضربه 20 ژول دارای مکانیزم‌های آسیب بیشتر شکست رزین و گسیختگی الیاف از رزین می‌باشد و به تبع در شکل 9 مشاهده می‌شود که تعداد رویدادهای مکانیزم‌های شکست رزین و گسیختگی الیاف در داده‌های آکوستیک این نمونه از سایر نمونه‌ها بالاتر است. البته کم و زیاد بودن تعداد رویدادها صرفاً به کمیت و کیفیت مکانیزم‌های شکست را بطور کامل بیان نمی‌کند اما انرژی از جهت زیادی نسبت به تعداد رویداد و دامنه در این نوع تفسیر برتری دارد [7]. برای مشاهده میزان کیفیت هر رویداد شکست می‌بایست میزان انرژی انباشته آکوستیکی در هر بازه فرکانسی را مطابق شکل‌های 10، 11 و 12 به ترتیب برای انرژی‌های 20، 38 و 60 ژول محاسبه و با یکدیگر مقایسه کرد.

Fig. 10 AE Cumulative energy for different failure mechanisms at 20J impact test (a): Matrix cracking, (b): debonding, (c): fiber breakage

شکل 10 مقادیر انرژی آکوستیک مکانیزم‌های مختلف شکست در ضربه 20 ژول (a) شکست فاز زمینه، (b) جدایش الیاف از رزین، (c) شکست الیاف



(c)

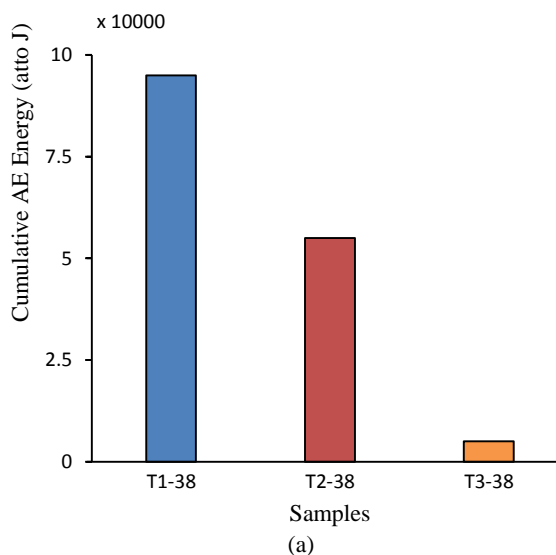
Fig. 11 AE Cumulative energy for different failure mechanisms at 38J impact test (a): Matrix cracking, (b): debonding, (c): fiber breakage

شکل 11 مقادیر انرژی آکوستیک مکانیزم‌های مختلف شکست در ضربه 38 ژول (a) شکست فاز زمینه ، (b) جدایش الیاف از رزین ، (c) شکست الیاف

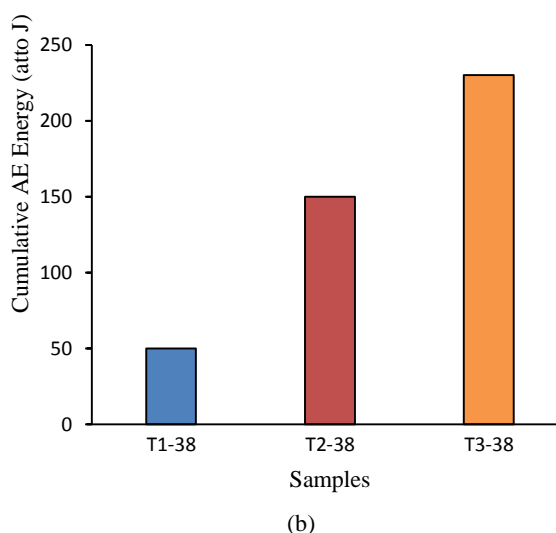
در شکل 11 میزان کلی انرژی آکوستیک در سه بازه‌ی فرکانسی مکانیزم‌های شکست در آزمون ضربه با انرژی 38 ژول برای تمامی نمونه‌های T1 تا T3 محاسبه شده و بر حسب آتو ژول (10^{-18} jule) آورده شده است. در آزمون ضربه 38 ژول مطابق جدول 3 نمونه T1 هم ماتریس (زمینه) و هم الیاف دچار بیشترین آسیب‌دیدگی شده‌اند و در شکل 11 نیز انرژی آکوستیک مربوط به مکانیزم‌های شکست این دو مورد ذکر شده برای نمونه T1 از مابقی نمونه‌ها بالاتر است، نمونه T2 بالاترین آسیب‌دیدگی فاز زمینه بعد از T1 را دارد و الیاف شیشه در نمونه T2 کمترین آسیب‌دیدگی را بین سایر نمونه‌ها دارد. در نمونه T3 فاز زمینه رزین کمترین آسیب‌دیدگی را دارا بوده که با مشاهدات چشمی از جدول 4 نیز قابل تایید است و برعکس، الیاف شیشه آسیب جدی را متحمل شده است، نتایج نشان از هماهنگی خوب بین مشاهدات چشمی و داده‌های آکوستیک دارد.

در شکل 12 میزان کل انرژی آکوستیک در سه بازه فرکانسی مکانیزم‌های شکست در آزمون ضربه با انرژی 60 ژول برای تمامی نمونه‌های T1 تا T3 محاسبه شده است. در آزمون ضربه 60 ژول شکل 12 نمونه T2 دارای بیشترین گسیختگی الیاف بوده (همانطور که با بازرسی چشمی نیز مشخص است) و نمونه T3 نیز همانند سایر نمونه‌های قبلی دارای پایین‌ترین آسیب فاز زمینه و گسیختگی الیاف از رزین می‌باشد. مانند آزمون‌های قبلی نمونه T3 دارای آسیب‌دیدگی بیشتر الیاف نسبت به نمونه T2 می‌باشد، اما بالاترین آسیب الیاف و همچنین شکست فاز زمینه برای نمونه T1 می‌باشد که در تصاویر چشمی نیز این مورد به صورت اتفاق افتادن یک شکست عرضی در امتداد الیاف قابل مشاهده است. با مراجعه به جدول‌های 3، 4 و 5 می‌توان مشاهده کرد که محدوده گسیختگی الیاف از رزین در آزمون‌های ضربه 60 ژول به صورت یک محدوده سفید رنگ دور موضع برخورد ضربه‌زن قابل تشخیص است که برای نمونه T2 این ناحیه سفید رنگ بیشتر و به تبع در داده‌های آکوستیک انرژی تجمعی مربوط به جدایش الیاف از رزین در حوزه فرکانسی مربوط به این نمونه بالاتر است.

در شکل 10-a مشاهده می‌شود که نمونه T2 بیشترین آسیب‌دیدگی رزین را نسبت به بقیه داشته و با مراجعه به جدول 4 می‌توان با مشاهده چشمی نیز به این رویداد پی برد. بعلاوه همانطور که در شکل 10-b مشاهده می‌شود بیشترین انرژی جدایش الیاف مربوط به T2 می‌باشد و همانطور که در جدول 4 مشخص است نمونه T2 در بین مابقی لایه‌چینی‌ها بیرون زدگی بیشتر الیاف از رزین در آن مشاهده می‌شود. همانطور که از بررسی چشمی نمونه در جدول 5 مشخص است، در نمونه T3 شکست رزین نسبت به بقیه کمترین بوده اما شکست الیاف بالاترین مقدار نسبت به بقیه نمونه‌هاست، و به نظر می‌رسد در نمونه T3 بیشتر تمرکز نیروی ضربه و آسیب‌دیدگی بر روی الیاف بوده و انرژی ضربه پخش نشده و حتی در انرژی کم 20 ژول در جدول 2 باعث پارگی الیاف در لایه‌های داخلی شده و در انرژی بالای ضربه 60 ژول در تصاویر چشمی جدول 5 ، پس از پارگی الیاف باعث نفوذ کامل به داخل فوم شده است.



(a)



(b)

است. نمونه T3 برخلاف T2 پایین‌ترین مکانیزم شکست را در فاز زمینه داشته اما شکست الیاف شیشه در این نمونه تقریباً در رده بالاترین‌ها بوده است. در نمونه T1 هم فاز زمینه رزین و هم الیاف دچار شکست و آسیب‌دیدگی بالا (در مقایسه با سایرین) بوده که نشان دهنده این است که لایه‌گذاری الیاف شیشه بصورت متعامد دچار آسیب کمتری در هنگام ضربه نسبت به لایه چینی تک جهته و یا ضربدری می‌گردد.

3-3- مقایسه داده‌های آکوستیکی و نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های پانل ساندویچی

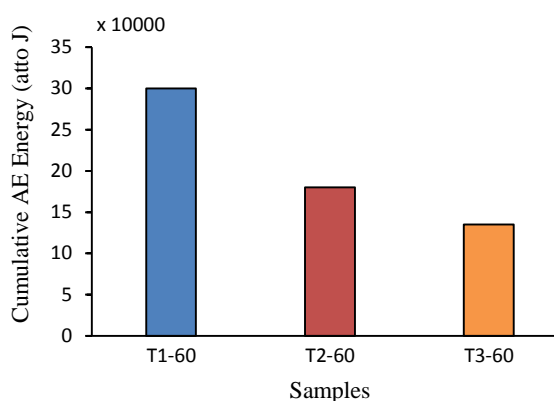
در نمودار نیرو - جابجایی باید به این نکته توجه کنیم که هرچه نمونه دارای تغییر شکل پلاستیک کمتر (برگشت الاستیک بیشتر) و بیشینه نیروی اعمالی بیشتر باشد، آن جسم مقاومت به ضربه بالاتری دارد زیرا مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل از خود نشان داده است.

در مقایسه انرژی آکوستیک مکانیزم‌های مختلف شکست نمونه‌ها با نمودار نیرو-جابجایی متوجه می‌شویم که در نمونه‌هایی مانند T1 و T3 که شکست الیاف مکانیزم شکست غالب بوده، نمودارها برگشت الاستیک و یا ماکزیمم نیروی کمتری را متحمل شده‌اند، که نشانگر این است که الیاف شیشه (که از دسته‌بندی مواد نرم بوده) برای شکست، انرژی بیشتری را جذب نموده و لذا نمونه پانل ساندویچی ساخته شده برگشت الاستیک کمتری را دارا می‌باشد و اما در نمونه T2 که شکست رزین پلی استر مکانیزم شکست غالب تری نسبت به T3 بوده نمودارها دارای برگشت الاستیک و ماکزیمم نیروی بیشتری نسبت به نمونه‌های T1 و T3 هستند، زیرا رزین پلی استر دارای خواص مواد ترد بوده و مواد ترد برای شکست انرژی کمتری به خود جذب می‌کنند. لذا نمونه T2 دارای بیشینه نیرو بیشتری (به علت جذب انرژی کمتر) و تغییر شکل الاستیک بیشتری (پلاستیک کم تر) می‌باشد.

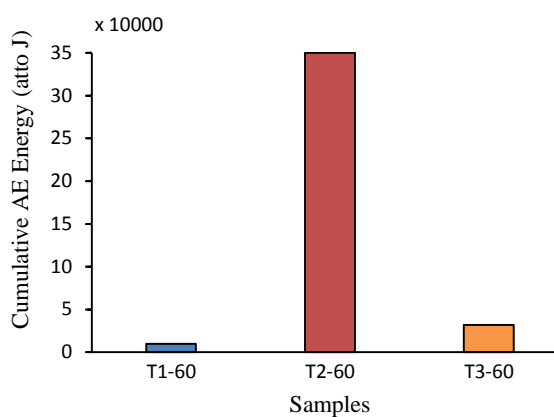
با مقایسه جدول 2 و تصاویر شکل 10، 11 و 12 نتیجه‌گیری می‌شود در نمونه‌هایی که انرژی آکوستیک مکانیزم شکست الیاف بالاتر است به تبع انرژی جذب شده در آزمون ضربه نیز بالاتر بوده و بدین معناست الیاف‌های شیشه برای شکست و آسیب دیدگی سهم بالاتری از انرژی ضربه را دریافت می‌کنند.

3-4- تصاویر اسکن شده نمونه‌ها بعد از آزمون ضربه

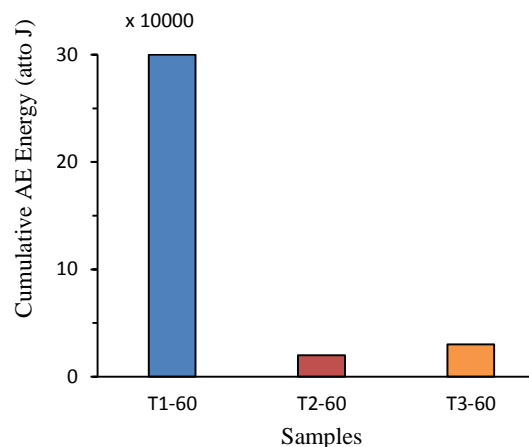
پس از انجام آزمون ضربه در تصاویر اسکن شده نمونه‌های پانل ساندویچی ضربه خورده T1، T2 و T3 به ترتیب در جدول‌های 3، 4 و 5 آورده شده است. اسکن تصاویر توسط دستگاه اسکنر سامسونگ-4623 با قدرت تشخیص 300 دی پی آی انجام شده است. همانطور که در تصاویر جدول 3 در نمای بالا و نمای برش مشاهده می‌شود، بعد از تست ضربه در نمونه‌های با لایه چینی T1 مکانیزم‌های شکست عمدتاً بر روی سطح پانل‌های ساندویچی در لایه‌های 1 و 2 الیاف شیشه رخ داده و هیچ‌گونه اثری از شکست الیاف در لایه‌های داخلی 3 و 4 و یا اثری از شکست فوم در هسته ساندویچ پانل دیده نمی‌شود، که این به معنای توزیع‌پذیری بهتر تنش بر روی سطح نمونه نسبت به سایر نمونه‌های دیگر است. در نمونه‌های T2 در تصاویر جدول 4 نمای بالا و نمای برش، با بررسی چشمی شکست الیاف نسبت به بقیه نمونه‌ها کمتر و یا اصلاً دیده نمی‌شود، اما شکست فوم در نمونه T2-60 از مابقی نمونه‌ها آسیب دیده با انرژی 60 ژول بالاتر است. همانطور که در مقایسه با داده‌های آکوستیک در نتایج بخش 2-3 در شکل 10 و 11 و 12 مشخص است که انرژی شکست الیاف در نمونه‌های آسیب دیده با لایه چینی T2 از همه پایین‌تر است. در نمونه‌های



(a)



(b)



(c)

Fig. 12 AE Cumulative energy for different failure mechanisms at 60 J impact test (a): Matrix cracking, (b): debonding, (c): fiber breakage

شکل 12 مقادیر انرژی آکوستیک مکانیزم‌های مختلف شکست در ضربه 60 ژول (a) شکست فاز زمینه، (b) جدایش الیاف از رزین، (c) شکست الیاف با مقایسه تمامی نمونه‌ها در آزمون‌های ضربه مشاهده می‌شود که نمونه T2 دچار آسیب‌دیدگی‌های جدی فاز زمینه و هم چنین جدایش الیاف از رزین و حتی در برخی موارد بالاترین نسبت به سایر نمونه‌ها بوده است، اما مکانیزم شکست الیاف در این نمونه در مقایسه با سایرین از همه کمتر بوده

در تمامی نمونه‌ها در آزمون‌های ضربه 20 و 38 ژول آسیب‌های جزئی به لایه‌های پانل ساندویچی وارد شده و تنها در آزمون ضربه 60 ژول سنبه ضربه زننده به داخل هسته فوم نفوذ کرده که بدین وسیله می‌توان تخمین تقریبی از مقاومت به ضربه پانل‌های ساندویچی برآورد کرد.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش سعی بر آن شده که تاثیر نحوه لایه‌چینی‌های مختلف بر روی مقاومت به ضربه و مکانیزمهای آسیب حاصل شده در ضربه برای پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی توسط روش غیرمخرب آکوستیک امیشن و تحلیل نمودار نیرو-جابجایی مورد بررسی قرار گیرد.

نتایج نشان داد که لایه‌چینی متعامد الیاف شیشه در لایه‌های پانل ساندویچی مقاومت به ضربه بالاتری نسبت به لایه چینی تک جهته و ضربدری دارد، با تحلیل داده‌های آکوستیک مشخص شد نمونه T1 در تمامی آزمون‌های ضربه بالاترین آسیب دیدگی فاز زمینه و شکست الیاف را داشته و لذا پایین‌ترین مقاومت به ضربه را دارا بوده ولی در نمونه T2 با محاسبه انرژی‌های آزاد شده آکوستیک در دامنه‌های فرکانسی مختلف مشاهده شد که این نمونه در آزمون ضربه دارای آسیب دیدگی بیشتر فاز زمینه و جدایش الیاف از رزین نسبت به نمونه T3 بوده ولی آسیب دیدگی الیاف در این نمونه از بقیه نمونه‌ها پایین‌تر می‌باشد. نمونه T3 همانطور که از بررسی چشمی و داده‌های آکوستیک مشخص است دارای کمترین شکست فاز زمینه رزین در بین نمونه‌ها بوده که نشان از هماهنگی داده‌های آکوستیک و بررسی‌های چشمی دارد، اما آسیب دیدگی الیاف در این نمونه از T2 بالاتر است.

نتایج همچنین تاثیر قابل ملاحظه مکانیزم‌های مختلف شکست در نمونه‌ها را بر روی نمودار نیرو-جابجایی نشان می‌دهد، بطوریکه در نمونه‌های T1 و T3 که الیاف شیشه دچار آسیب دیدگی بالاتر نسبت به T2 شده است نمودار نیرو-جابجایی دچار تغییر شکل پلاستیک بالاتر و به تبع دارای بیشینه نیروی عکس‌العملی پایین‌تری نسبت به T2 شده است، که بدین معناست که الیاف شیشه برای شکست انرژی بیشتر و به تبع آن تغییر شکل پلاستیک بالاتری مطالبه می‌کند و ثابت می‌کند که سالم بودن و آسیب دیدگی الیاف شیشه در پانل‌های ساندویچی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان مقاومت به ضربه دارد.

5- مراجع

- [1] Johnson, A. F. and Holzapfel, M., "Modelling soft body impact on composite structures," Composite Structures, Vol. 61, pp. 103-113, 2003.
- [2] Woo, S. C. and Choi, N. S., "Analysis of Fracture Process in Single-Edge-Notched Laminated Composites Based on the High Amplitude Acoustic Emission Events," Composites Science and Technology, Vol. 67, pp. 1451-1458, 2007.
- [3] Deka, L. J. and Bartus, S. D. and Vaidya, U. K., "Multi-site impact response of S2- glass/epoxy composite laminates," Composites Science and Technology, Vol. 69, pp. 725-735, 2009.
- [4] Oskouei, A. and Ahmadi, M., "Fracture Strength Distribution in E-Glass Fiber Using Acoustic Emission," Journal of Composite Materials, Vol. 44, No. 6, pp. 693-705, 2009.
- [5] 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 Persion, Journal of Composite Materials, Vol. 46, pp. 1795-1808, 2012.
- [6] Oskouei, A. Heidary, H. Ahmadi, M. and Farajpur, M., "Unsupervised acoustic emission data clustering for the analysis of damage mechanisms in glass/polyester composites," Materials & Design, Vol. 37, pp. 416-422, 2012.

برش خورده T2 مکانیزم‌های جدایش چند لایه از فوم دیده می‌شود که با مراجعه به شکل‌های 10 و 11 و 12 میزان انرژی آکوستیکی تجمعی در مکانیزم‌های شکست جدایش در نمونه T2 از بقیه نمونه‌ها بالاتر است.

همانطور که در تصاویر نمای بالا و نمای برش در نمونه‌های T3 در جدول 5 دیده می‌شود، شکست الیاف در لایه‌های سوم و چهارم پوسته پانل ساندویچی رخ داده و در سطح پوسته پانل ساندویچی اثری از شکست الیاف دیده نمی‌شود. شکست الیاف در نمونه‌های آسیب دیده با لایه‌چینی T3 بیشتر از T2 بوده که هم با بررسی چشمی و هم مقایسه انرژی‌های تجمعی داده‌های آکوستیک در بخش 2-3 در شکل‌های 10، 11 و 12 قابل اثبات می‌باشد.

جدول 3 تصاویر اسکن شده و برش خورده از نمونه T1 تحت انرژی‌های ضربه مختلف
Table 3 Scanned and cross section images from the T1 sample under different impact energies

انرژی ضربه	20 ژول	38 ژول	60 ژول
اسکن شده			
برش خورده			

جدول 4 تصاویر اسکن شده و برش خورده از نمونه T2 تحت انرژی‌های ضربه مختلف
Table 4 Scanned and cut images from the T2 sample under different impact energies

انرژی ضربه	20 ژول	38 ژول	60 ژول
اسکن شده			
برش خورده			

جدول 5 تصاویر اسکن شده و برش خورده از نمونه T3 تحت انرژی‌های ضربه مختلف
Table 5 Scanned and cut images from the T3 sample under different impact energies

انرژی ضربه	20 ژول	38 ژول	60 ژول
اسکن شده			
برش خورده			

- [7] Naderi, S. and Bushroa, A. R., "Low-velocity impact damage of woven fabric composites: Finite element simulation and experimental verification," *Materials & Design*, Vol. 53, pp. 706-718, 2014.
- [8] Fotouhi, M. Ahmadi, M. and Hosseini Toudeshky, H., "Prediction of Delamination Growth in Laminated Composites Using Acoustic Emission and Cohesive Zone Modeling Techniques" *Composite Structures*, Vol. 124, pp. 120-127, 2015.
- [9] Roshanfar, M., "Analysis of the separation between the progressive layer in composite layers under the effect of repetitive load," In Persian, MSc Thesis, Amir kabir University, Iran, 2015.
- [10] Refahi Oskouei, A. and Yousefi, J., "Characterization of residual strength in transversely loaded glasspolyester composites by acoustic emission and sentry function," *Materials Today*, pp. 381-387, 2016.
- [11] Saidane, E. H. Scida, D. Assarar, M. and Ayad, R., "Damag Mechanisms Assessment of Hybrid Flax-Glass Fiber Composites Using Acoustic Emission" *Composite Structures*, Vol. 175, pp. 1-11, 2017.
- [12] Ghasemi-Ghalebahman, A. and Sayyar, H., "Failure mechanisms in open-hole laminated composites under tensile loading using acoustic emission," In Persian, *Composites Science and Technology*, Vol. 5, pp. 143-152, 2017.
- [13] 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.
- [14] Standard Test Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors, Annual Book of ASTM Standard, 2017.
- [15] R.K. Miller and P. Mcintire, "Handbook of Nondestructive testing," 2nd Edition, Vol.5 , Acoustic Emission, American Society for Nondestructive Testing, 1987
- [16] Oskouei, A. and Ahmadi, M., "Acoustic emission characteristics of mode I delamination in glass/polyester composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 44, No. 7, pp. 793-807, 2010.