



بررسی تجربی رفتار دینامیکی ضربه با سرعت کم در کامپوزیت‌های بافتی ماتریس اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن

فرزین عظیم پور شیشه‌وان¹، بابک عبازاده^{*2}

1- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مراغه، واحد مراغه دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بناب، بناب
* بناب، صندوق پستی 55517-61167، abazadeh@bonabu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>در این مقاله عکس‌العمل ضربه با سرعت کم کامپوزیت‌های بافتی تقویت شده با الیاف کربن و ماتریس اپوکسی به صورت تجربی بررسی شده است. صفحات کامپوزیت پس از ساخت تحت تست ضربه با سرعت کم در مقادیر انرژی 20، 30، 50، 60 و 80 ژول قرار گرفته و انرژی آستانه نفوذ و سوراخ شدگی با استفاده از روش پروفایل انرژی مشخص و رفتار کامپوزیت‌های ساخته شده در مواجهه با بارهای ضربه‌ای، با ترسیم نمودارهای نیروی تماس-خیز، نیروی تماس-زمان، خیز-زمان و انرژی-زمان مطالعه گردیده است. نهایتاً اثرات تغییر انرژی بر مقادیر بیشینه نیروی تماس، انرژی جذب شده و خیز نیز بررسی شده است. نتایج نشان‌دهنده روندهای مختلف افزایش نیروی تماس، انرژی جذب شده و خیز با افزایش انرژی ضربه می‌باشد، بطوریکه با افزایش انرژی ضربه تا حدود 60 ژول (آستانه سوراخ شدگی)، انرژی جذب شده روند صعودی داشته و سپس کاهش می‌یابد درحالی‌که مقدار نیروی تماس پس از این مقدار ثابت بوده و مقدار خیز با افزایش انرژی ضربه روند صعودی خود را حفظ می‌کند.</p>	<p>دریافت: 97/11/15 پذیرش: 98/12/14</p> <p>کلیدواژگان: ضربه با سرعت کم، کامپوزیت بافتی، الیاف کربن، ماتریس اپوکسی</p>

An experimental investigation of the low velocity impact behavior of woven carbon-fiber-epoxy composites

Farzin Azimpour Shishevan¹, Babak Abazadeh^{*2}

1-Mechanical Engineering Department, Maragheh Faculty, Technical and Vocational University, Tehran, Iran.
2-Mechanical Engineering Department, University of Bonab, Bonab, Iran.
* P.O.B. 55517-61167, Bonab, Iran, abazadeh@bonabu.ac.ir

Keywords

Low Velocity Impact,
Woven Composite,
Carbon Fiber,
Epoxy Matrix.

Abstract

In this paper, the low velocity impact of woven carbon-fiber-epoxy composites have been investigated experimentally using a number of impact tests. The woven laminates are twill and made by vacuum infusion technique (VARIM). The low velocity impact tests were carried out with different impact energies of 20, 30, 50, 60 and 80 J to find the penetration and perforation threshold energies using profile energy method. Then the impact behavior of the samples was studied using drawn diagrams of contact force-deflection, contact force-time, deflection-time, and energy-time to investigate the effect of the energy of impact and its' variations on the maximum contact force, absorbed energy and deflection in the woven Carbon-Fiber-Epoxy Composites. The results show that the contact force, absorbed energy and deflection increases when the applied impact energy increases up to 60 J. It is worth mentioning that the observed enhancement trends of the contact force, absorbed energy and deflection are different from each other.

1- مقدمه

کامپوزیت‌ها شونده که با چشم غیرمسلح قابل‌رؤیت نباشند ولی آسیب‌های ایجاد شده در ساختار داخلی آن‌ها ممکن است باعث کاهش خصوصیات مکانیکی این مواد گردیده و در نهایت خسارات جبران‌ناپذیری را در حین کار به وجود بیاورند. از این‌رو بررسی دلایل و نحوه به وجود آمدن این نوع آسیب‌دیدگی‌ها جهت پیش‌بینی عواقب و کاهش خسارات به وجود آمده بسیار ضروری می‌باشد. استفاده از الیاف کربن در ساختار قطعات ساخته شده از

به‌طور کلی می‌توان گفت که تمام مواد کامپوزیتی در طول فرآیند ساخت و کاربرد در معرض بارهای ضربه‌ای با انرژی‌های مختلف قرار می‌گیرند [1، 2]. این بارهای ضربه‌ای ممکن است از برخوردهای بسیار طبیعی روزانه و یا حتی افتادن ابزارآلات ناشی شوند. اعمال بارهای ضربه‌ای (حتی با انرژی‌های پایین) ممکن است باعث به وجود آمدن خسارت‌هایی در ساختار خارجی و داخلی

Please cite this article using:

Azimpour Shishevan, F. and Abazadeh, B., "An experimental investigation of the low velocity impact behavior of woven carbon-fiber-epoxy composites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 571-580, 2020.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

کامپوزیت‌های پلیمری در صنایع هوافضا، دریانوردی و اتومبیل‌سازی به دلیل خصوصیات مکانیکی مناسب آن‌ها گسترش یافته است که می‌توان به چگالی کم، مقاومت ویژه و مدول الاستیسیته بالای این الیاف اشاره نمود [3, 4]. این نوع کامپوزیت‌ها علاوه بر خصوصیات مکانیکی بالا به دلیل خصوصیات حرارتی الیاف کربن همانند هدایت حرارتی بالا¹ و پایداری حرارتی² دارای مشخصات حرارتی قابل قبولی نیز می‌باشند. علاوه بر این، این نوع از کامپوزیت‌ها دارای پایداری ابعادی خوب³ [5, 6] و مقاومت به خستگی مکانیکی⁴ بالایی نیز می‌باشند. در سال‌های اخیر به دلیل افزایش استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن و حساسیت این نوع کامپوزیت‌ها در مقابل بارهای ضربه‌ای که از حساسیت الیاف کربن در مقابل ضربه ناشی می‌شود، مطالعات گسترده‌ای در مورد رفتار این نوع کامپوزیت‌ها در برابر بارهای ضربه‌ای صورت پذیرفته است [7-9]. تست‌های ضربه بر اساس انرژی و سرعت پرتابه در سه نوع مختلف دسته‌بندی می‌شوند. تست ضربه با سرعت کم⁵، تست ضربه با سرعت زیاد⁶ و تست ضربه با سرعت خیلی زیاد⁷ هسور و همکارانش [10] در تحقیقی که در این زمینه انجام داده‌اند به بررسی رفتار تجربی ضربه با سرعت پایین بر روی کامپوزیت‌های با زمینه اپوکسی و تقویت‌شده با دو نوع الیاف کربن و شیشه پرداخته‌اند. آن‌ها به بررسی تأثیرات نوع بافت الیاف در رفتار ضربه با سرعت کم کامپوزیت پرداخته و در این زمینه رفتار کامپوزیت‌ها با دو نوع بافت مختلف شامل بافت ساده⁸ و بافت جناغی⁹ را مقایسه کرده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده کامپوزیت‌های با نوع بافت جناغی رفتار ضربه بهتری نسبت به نوع بافت ساده از خود نشان داده‌اند. الهه کاظمی خسرق و همکارانش [11] اثر اصلاح سطحی نانوصفحات گرافن با عامل سیلان بر روی رفتار ضربه سرعت بالای نانوکامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نانوصفحات گرافن اصلاح نشده و اصلاح شده برای تقویت نمونه‌های نانوکامپوزیتی اپوکسی-الیاف بازالت استفاده شدند و در ادامه اصلاح سطحی نانوصفحات گرافن با استفاده از طیف سنجی مادون قرمز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون ضربه سرعت بالا نشان داد که استفاده از نانوصفحات گرافن اصلاح شده با عامل سیلان تأثیر بسزایی بر عملکرد مکانیکی نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف بازالت داشته است. مطالعات میکروسکوپی الکترونی نشان‌دهنده این مطلب بود که افزایش انتقال بار بین الیاف تقویت کننده و زمینه پلیمری کامپوزیت ناشی از توزیع نانوصفحات گرافن تأثیر خصوصی در بهبود رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها داشته است. ایچتن و همکارانش [12] رفتار ضربه با سرعت پایین کامپوزیت‌های تک جهته پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه را با استفاده از روش پروفایل انرژی¹⁰ در دمای پایین بررسی کردند. فرامرز آشنای قاسمی و همکارانش [13] تأثیر نانو ذرات اکسید تیتانیوم بر استحکام ضربه، کشش و مدول الاستیک ترکیبات پایه پلی پروپیلن/پلی اتیلن خطی با چگالی کم را بررسی نمودند. نتایج نشان دادند که افزودن نانو ذرات اکسید تیتانیوم تا 2 درصد وزنی مدول الاستیسیته و استحکام ضربه را افزایش می‌دهد اما تأثیر چندانی بر استحکام کششی ندارد و حضور بیش از 2 درصد وزنی نانو ذرات تا 4 درصد وزنی باعث کاهش خواص مذکور می‌شود. همچنین مشاهده گردید که حضور نانو ذرات با درصد وزنی کم (حدود 2 درصد وزنی)، تقریباً 7 درصد استحکام ضربه و مدول الاستیک ترکیبات را افزایش می‌دهد. منصور باوفا بیگدیلو و همکاران [14] تأثیر افزودن نانولوله کربنی چند

جداره بر رفتار ضربه سرعت بالای کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کولار و الیاف پلی اتیلن با وزن مولکولی بالا با چیدمان لایه لایه را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که جذب انرژی برای نمونه حاوی 10 درصد وزنی نانولوله کربنی نسبت به نمونه بدون نانو افزایش یافته است. توزیع مناسب نانولوله کربنی و انتقال تنش بین الیاف و زمینه باعث افزایش لایه لایه شدگی و جذب انرژی بیشتر شد. همچنین نتایج میکروسکوپی نشان داد در 10 درصد وزنی نانولوله کربنی با ایجاد پدیده‌های پل زنی ترک و بیرون کشیدگی نانولوله جذب انرژی در کامپوزیت هیبریدی افزایش یافته است. عمویی دیزجی و همکارانش [15] تأثیر افزودن نانو ذرات سیلیکا و نانو لوله‌های کربنی چند دیواره بر پاسخ ضربه سرعت پایین مورد بررسی تجربی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایش ضربه سرعت پایین نشان دهنده این بود که نانو لوله‌های کربنی موجب بهبود عملکرد مواد مرکب فیبر-فلز شده، همچنین تأثیر نانو لوله‌های کربنی چند دیواره در بهبود خواص ضربه کامپوزیت چند لایه فیبر-فلز بهتر از تأثیر نانو سیلیکا است. چسبندگی و پخش شوندگی بهتر نانو لوله‌های کربنی و ایجاد اتصال بین لایه‌های قوی یکی دیگر از عوامل تأثیر گذار در پاسخ ضربه نمونه تقویت شده با نانو لوله کربن چند دیواره نسبت به نانو سیلیکا می‌باشد. در تحقیق دیگری حامد خسروی و همکارانش [16] تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر رفتار کششی و خمشی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت را بررسی نمودند. به منظور بررسی اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها آزمون‌های کشش و خمش سه نقطه‌ای روی آن‌ها صورت پذیرفت. همچنین برای بررسی مکانیزم شکست کامپوزیت‌ها از میکروسکوپی روبشی الکترونی گسیل میدانی استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که بیشترین میزان بهبود در خواص استحکام کششی، استحکام خمشی و همچنین جذب انرژی مربوط به نمونه حاوی 0/3 درصد وزنی نانولوله کربنی بود و از طرفی مدول کششی و خمشی نمونه‌ها با افزودن نانولوله‌ها روند افزایشی از خود نشان دادند. بررسی‌های میکروسکوپی مویید این واقعیت بودند که افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره در زمینه باعث بهبود خواص فصل مشترکی بین الیاف بازالت و زمینه نانوکامپوزیتی شده است. سید امیرحسین کرسوی کاشانی و رضا اسلامی فارسانی [17] کامپوزیت چند مقیاسی زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت حاوی مجموعاً 1٪ وزنی زمینه از نانو ذرات سیلیکا و نانو صفحات گرافن اصلاح سطحی شده را تحت آزمون ضربه سرعت بالا قرار دادند. نتایج نشان داد که نمونه حاوی 0/7٪ نانوسیلیکا و 0/3٪ نانوغرافن بهترین عملکرد را در جذب انرژی حاصل از ضربه سرعت بالا نسبت به نمونه بدون نانو مواد از خود نشان می‌دهد. میثم نوری نیارکی و همکارانش [18]، خواص مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت‌هایی بر پایه ماتریسی از دو فاز پلیمری پلی پروپیلن و اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر، تقویت شده با نانوصفحات گرافن و الیاف شیشه را بررسی کردند. مشاهده شد که با حضور الیاف شیشه، استحکام ضربه 46 درصد افزایش یافته و استحکام کششی نسبت به ترکیب پایه پلی پروپیلن اندکی افزایش می‌یابد. همچنین حضور مقادیر پایین نانو صفحات گرافن، استحکام ضربه را 16 درصد افزایش می‌دهد. این در حالی است حضور مقادیر بالای این میزان، استحکام ضربه و استحکام کششی را می‌کاهد. در تحقیق حاضر، رفتار کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن با نسبت حجمی الیاف به ماتریس 60 به 40 و تعداد 10 لایه تشکیل دهنده

6 High velocity impact

7 Ballistic impact

8 Plain weave

9 Twill weave

10 Profile energy method

1 Thermal conductivity

2 Thermal stability

3 Dimensional stability

4 Mechanical fatigue strength

5 Low velocity impact

مقاومت کششی و مدول الاستیسیته اپوکسی مورد استفاده به ترتیب 72 و 2940 مگاپاسکال بوده و عملیات پخت^{۱۲} آن در دمای 80 °C و به مدت 8 ساعت انجام گردید.

نسبت حجمی الیاف به ماتریس در ساختار کامپوزیت 60 به 40 بوده و تعداد لایه‌های تشکیل‌دهنده کامپوزیت 10 لایه می‌باشد. صفحات کامپوزیتی در ابعاد 700×700 میلی‌متر مربع ساخته شده و عملیات برشکاری جهت ساخت نمونه‌های تست با استفاده از جت آب^{۱۳} انجام شده که بر اساس استاندارد ASTM D 7136 برای تست ضربه ابعاد 10×10×8 سانتی‌متر مکعب و برای تست کشش^{۱۴} ابعاد 25×2/5×0/25 سانتی‌متر مکعب بر اساس استاندارد ASTM D 3039 انتخاب شده است (شکل 3b) [19].

3- تست ضربه با سرعت کم

تست ضربه با سرعت کم بر اساس استاندارد ASTM D7136 و با استفاده از دستگاه ضربه سقوط آزاد^{۱۵} فرکتویس پلاس^{۱۶} در آزمایشگاه ضربه گروه مهندسی مکانیک دانشگاه دوکوز ایلول واقع در ازمیر ترکیه انجام شد. این دستگاه متصل به یک نرم‌افزار اندازه‌گیری خودکار بوده و قادر به انجام تست ضربه در انرژی‌های مختلف و ثبت اطلاعات تست از جمله نیروی تماس، انرژی جذب‌شده، خیز و سرعت پرتابه بر حسب زمان می‌باشد. دستگاه دارای قابلیت تحمل بار 22/4 کیلونیوتن بوده و قطر سوراخ فیکسچر پنوماتیکی نگهدارنده نمونه آن 76/2 میلی‌متر می‌باشد. دماغه پرتابه از نوع کروی^{۱۷} با قطر 12/76 میلی‌متر بوده و جرم آن 4/906 کیلوگرم می‌باشد. در این تحقیق جهت تشخیص انرژی آستانه شکست کامپوزیت از روش پروفایل انرژی استفاده گردید و نمونه‌ها تحت ضربات با میزان انرژی‌های مختلف مورد هدف قرار گرفت و با استفاده از تعداد تست‌های مختلف و روش سعی و خطا، انرژی آستانه فرورفتگی و سوراخ شدگی تعیین گردید.

4- تست کشش

تست کشش بر اساس استاندارد ASTM D3039 و با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال شیمادز^{۱۸} مدل AGIS100 در لابراتوار مقاومت مصالح گروه مهندسی مکانیک دانشگاه آتاتورک واقع در ارزروم ترکیه انجام شد. ظرفیت اعمال نیروی دستگاه کشش مورد استفاده 10 کیلونیوتن بوده و سرعت اعمال بار 1 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. تصویر دستگاه کشش و ضربه استفاده شده در شکل 4 نشان داده شده است.

5- نتایج و بحث

مقدار انرژی لازم جهت انجام تست ضربه از مهم‌ترین پارامترهایی است که بایستی قبل از آغاز تست‌های اصلی مشخص شود که در تحقیق حاضر، این انرژی با استفاده از روش پروفایل انرژی تعیین گردید [20]. در این روش، نمونه‌های ماده مورد نظر با انرژی‌های مختلف که از مقادیر کم آغاز می‌شدند مورد اصابت پرتابه قرار گرفتند. هدف از این مرحله تشخیص انرژی آستانه فرورفتگی^{۱۹} و سوراخ شدگی^{۲۰} می‌باشد. انرژی آستانه فرورفتگی مقدار انرژی

کامپوزیت، در انرژی‌های مختلف ضربه مورد بررسی قرار گرفته اند. با انجام این تست‌های آزمایشگاهی، منحنی‌های نیروی تماسی - خیز، نیروی تماسی - زمان، انرژی جذب‌شده - زمان و خیز- زمان برای انرژی‌های مختلف بدست آمده و ترسیم شده تا رفتار کامپوزیت با به‌کارگیری پارامترهای کلیدی ضربه با سرعت کم از جمله بیشینه نیروی تماسی، بیشینه انرژی جذب‌شده و بیشینه خیز در انرژی‌های مختلف بدست آید.

2- ساخت کامپوزیت

کامپوزیت مورد استفاده جهت تست ضربه از نوع بافتی با شکل بافت جناغی^{۱/۲} می‌باشد که مطابق شکل 1 در این نوع بافت دو عدد پود^۲ از زیر یک تار^۳ عبور کرده است و این روش بافت برای کل سیستم تقویت‌کننده تکرار شده است. الیاف کربن مورد استفاده جهت تقویت کامپوزیت از شرکت اسپینتکس واقع در دنیزلی ترکیه خریداری گردیده و با استفاده از روش وکیوم اینفیوژن^۴ در شرکت فیبرمارک واقع در شهر ازمیر ترکیه ساخته شد. برای این منظور، پارچه‌های بافته شده الیاف^۵ در اندازه‌های یکسان بریده شده و مطابق شکل شماتیک 2، بر روی لایه جداکننده^۶ در دستگاه وکیوم اینفیوژن چیده شدند.

سپس لایه تسهیل‌کننده^۷ نفوذ اپوکسی و لایه خلأ^۸ بر روی آن‌ها کشیده شده و با استفاده از باندهای خلأ^۹ به صورت کامل از محیط ایزوله گردیده و تحت فشار 1- اتمسفر قرار گرفتند. در طول پروسه تولید، اپوکسی در اثر کشش ایجاد شده توسط خلأ به وجود آمده توسط پمپ خلأ در سوی دیگر دستگاه، وارد فضای ایزوله شده گردیده و با عبور از میان طبقات کامپوزیت سبب پخش متقارن اپوکسی میان الیاف گردید (شکل 3a). اپوکسی مورد استفاده از نوع آرالادیت^{۱۰} 1564 با سخت‌کننده آرادور^{۱۱} 3487 بوده و از شرکت هانتسمن واقع در ایالات متحده خریداری گردید.

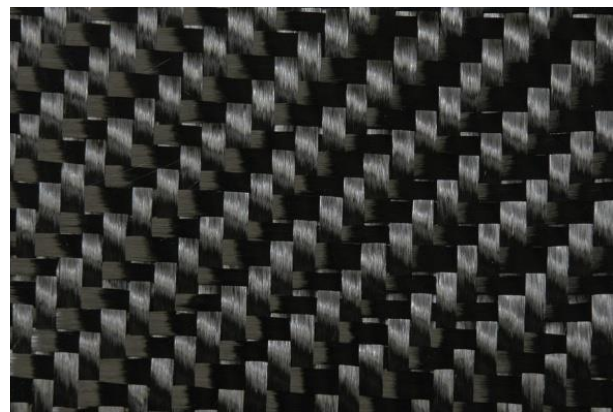


Fig. 1 Twill 2/2 shape of carbon fibres

شکل 1 تصویر بافت جناغی 2/2 الیاف کربن

¹¹ Aradur 3487

¹² Curing

¹³ Water jet

¹⁴ Tensile test

¹⁵ Drop weight

¹⁶ Fractvis plus

¹⁷ Hemispherical

¹⁸ Shimadzu

¹⁹ Penetration threshold energy

²⁰ Perforation threshold energy

¹ Twill 2/2

² Weft

³ Warp

⁴ Vacuum Assisted Resin Infusion Molding

⁵ Woven fabrics

⁶ Separator

⁷ Peel-ply

⁸ Plastics bag

⁹ Sealant tape

¹⁰ Araldite 1564

می‌باشد که در این حالت پرتابه در داخل نمونه فرو می‌رود و بدین ترتیب تمام انرژی پرتابه توسط نمونه جذب می‌شود [21].

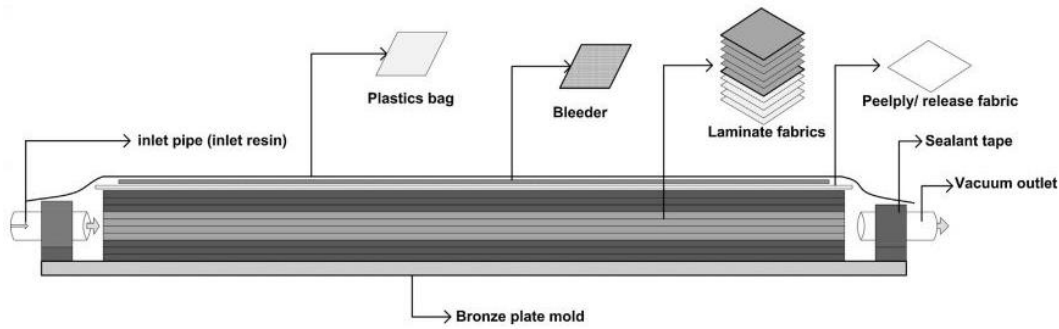


Fig. 2 Schematic layout of the VARTM set-up

شکل 2 شکل شماتیک ساخت کامپوزیت به روش وکیوم اینفیوژن

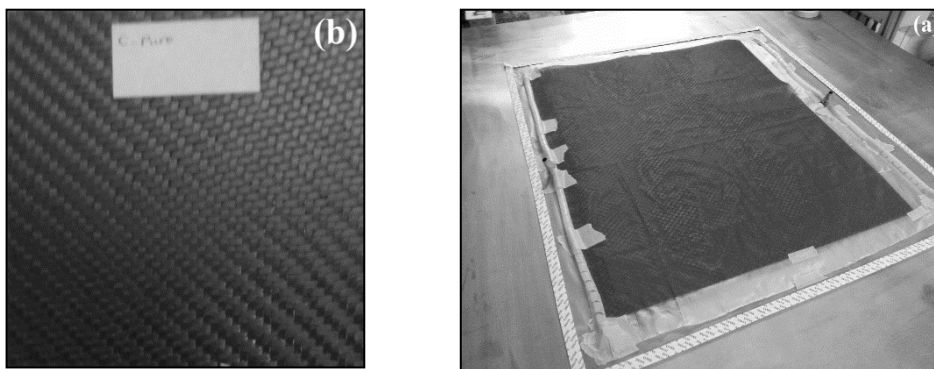


Fig. 3 a) Composite plate made by vacuum infusion technique, b) composite specimen for impact test

شکل 3 (a) ساخت کامپوزیت با روش وکیوم اینفیوژن، (b) نمونه کامپوزیتی تست ضربه

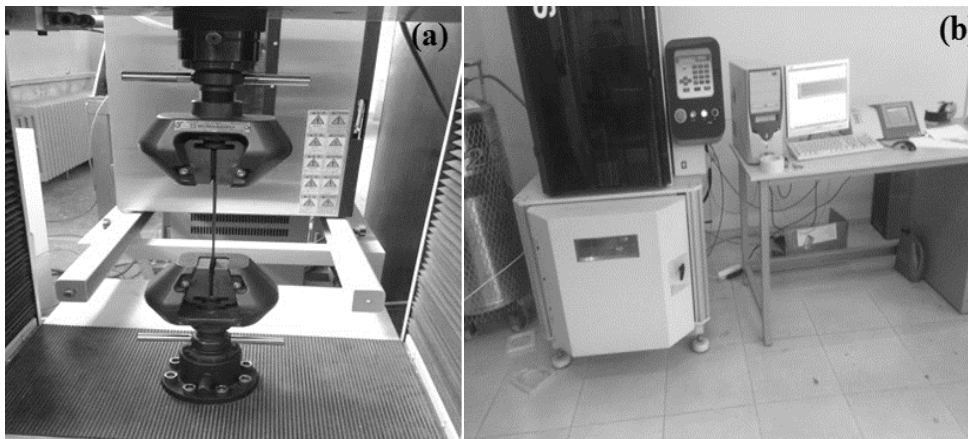


Fig. 4 a) Tensile test instrument, b) impact test instrument

شکل 4 تصویر دستگاه‌های استفاده شده، (a) تست کشش، (b) تست ضربه

جهت به دست آوردن انرژی آستانه فرورفتگی و سوراخ شدگی ورق کامپوزیتی، 5 تست با انرژی‌های مختلف انجام شد. سه تست اول با انرژی‌های 20، 30 و 50 ژول انجام شد که در این تست‌ها مقدار انرژی ضربه جهت سوراخ کردن نمونه کافی نبود و پرتابه پس از برخورد با نمونه مقداری از انرژی خود

در این حالت مقدار انرژی جذب شده با انرژی ضربه برابر بوده و نقطه انرژی¹ بر روی خط انرژی معادل² قرار می‌گیرد. انرژی آستانه سوراخ شدگی حداقل انرژی لازم برای عبور پرتابه از نمونه می‌باشد [22]. نمودار پروفایل انرژی برای کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن در شکل 5 داده شده است.

² Equal energy line

¹ Energy point

در ساختار کامپوزیت نسبت به انرژی لازم جهت ترک⁴ است که این نسبت اصطلاحاً ضریب سستی⁵ نامیده می‌شود [5]. تغییرات خیز برحسب زمان برای نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن در انرژی‌های 20، 30، 50، 60 و 80 ژول بارگذاری ضربه با سرعت کم در شکل 8 نمایش داده شده است.

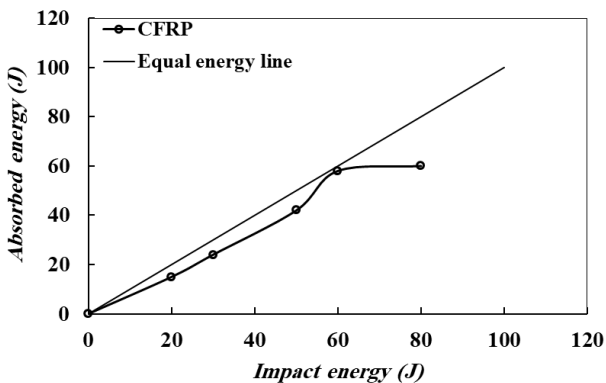


Fig. 5 Energy profile of carbon-fiber-epoxy composites

شکل 5 پروفایل انرژی کامپوزیت با زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن

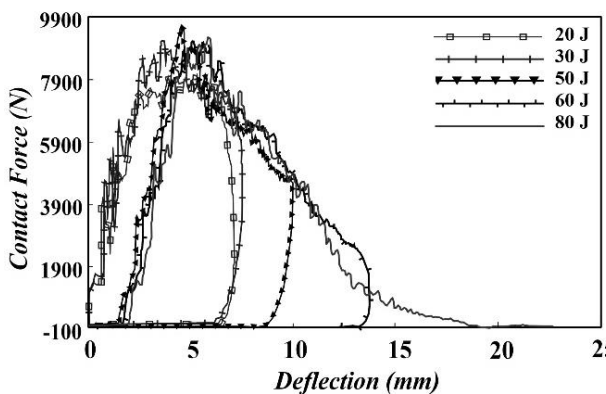
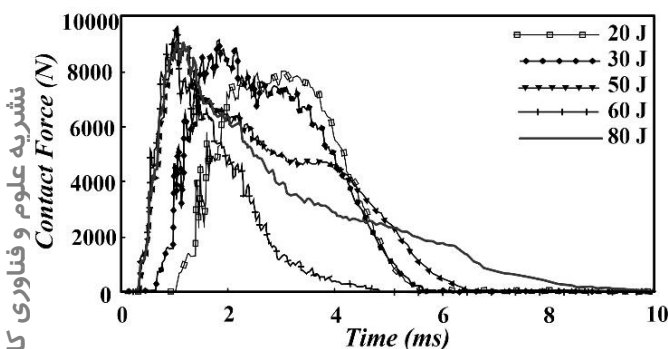


Fig. 6 Contact force- deflection diagram of carbon-fiber-epoxy composites

شکل 6 منحنی نیروی تماس-خیز کامپوزیت با زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن



نشریه علوم و فناوری کامپوزیت

⁴ Crack initiation
⁵ Ductility index

¹ Rebounding
² Peak load
³ Cracks

را به آن داده و از سطح نمونه بازگردید. در این حالت نقطه انرژی در قسمت زیر خط انرژی معادل قرار گرفت. با افزایش مقدار انرژی ضربه تا مقدار 60 ژول همان‌گونه که از شکل 5 نیز قابل مشاهده است نقطه انرژی بر روی خط انرژی معادل قرار گرفت که در این حالت تمامی انرژی پرتابه توسط نمونه جذب شده و پرتابه در نمونه فرو رفت. به این مقدار انرژی آستانه فرورفتگی گفته می‌شود. با افزایش انرژی ضربه تا مقدار 80 ژول پرتابه پس از برخورد با نمونه آن را سوراخ کرده و از آن عبور کرد. در این حالت که با نقطه انرژی 5 نمایش داده شده است انرژی جذب‌شده توسط نمونه در طی فرایند ضربه کمتر از انرژی ضربه بوده است. به عبارت دیگر پروفایل انرژی نشان داده شده در شکل 5 حاصل تست‌هایی است که برای هر جنس نمونه قبل از تست ضربه اصلی برای مشخص شدن مقاومت آن انجام می‌شود. در این نمودار انرژی ضربه در ابتدا کم بوده و رفته رفته انرژی اعمالی بیشتر می‌شود تا جایی که وزنه در نمونه فرو رود که در این حالت انرژی ضربه با انرژی جذب شده توسط نمونه برابر خواهد بود. در انرژی‌های پایین‌تر از این مقدار انرژی جذب شده کمتر از انرژی ضربه بوده و بعد از این نقطه به دلیل نفوذ وزنه در نمونه، مجدداً انرژی جذب شده کم می‌شود.

نمودار نیروی تماس-خیز نمونه کامپوزیتی که در انرژی‌های 20، 30، 50، 60 و 80 ژول تحت بارگذاری ضربه با سرعت کم قرار گرفته‌اند، در شکل 6 نشان داده شده است. در حالت کلی نمودار نیروی تماس-خیز دارای دو حالت باز و بسته می‌باشد [23]. در هنگام برخورد پرتابه با سطح نمونه در طی فرایند ضربه سه حالت ممکن است رخ دهد. در حالت اول، انرژی ضربه جهت ورود پرتابه به نمونه کافی نمی‌باشد که در این حالت پرتابه پس از برخورد با نمونه مقداری از انرژی خود را به آن داده و پس از برخورد در جهت مخالف حرکت می‌کند. در این حالت ممکن است نمونه در طی فرایند ضربه دچار آسیب‌دیدگی‌های جزئی و یا کلی شود که به این حالت بازخورد¹ گفته می‌شود [24]. همان‌گونه که از شکل 6 مشخص است منحنی نیروی تماس-خیز در این حالت بسته می‌باشد و منحنی پس از صفر شدن مقدار نیرو تا مبدأ یعنی مقدار خیز صفر ادامه پیدا کرده است و برای ضربه با انرژی‌های کمتر از 60 ژول حالت بازخورد رخ داده است.

با افزایش انرژی ضربه تا 80 ژول (همان‌گونه که در پروفایل انرژی در شکل 3 نیز قابل مشاهده است) پرتابه در داخل نمونه فرورفته و حالت نفوذ رخ می‌دهد. در این حالت نیز منحنی نیروی تماس-خیز بسته است با این تفاوت که با صفر شدن نیرو مقدار خیز صفر نمی‌شود. با افزایش انرژی ضربه منحنی نیروی تماس-خیز از حالت بسته به حالت باز تبدیل می‌شود که در این حالت مقداری از انرژی ضربه در اثر اصطکاک بین پرتابه و نمونه تلف می‌شود. نتایج دیگر تست ضربه نمودار نیروی تماس-زمان می‌باشد که برای نمونه‌های کامپوزیتی که در انرژی‌های 20، 30، 50، 60 و 80 ژول تحت بارگذاری ضربه با سرعت کم قرار گرفته‌اند در شکل 7 نشان داده شده است.

با توجه به منحنی‌های نیرو برحسب زمان نمایش داده شده در شکل 7، با افزایش مقدار انرژی ضربه، مقادیر بیشینه نیرو نیز افزایش می‌یابد. در عین حال با افزایش انرژی ضربه، زمان رخ دادن بیشینه نیرو² کاهش یافته و در انرژی 80 ژول به کمترین مقدار خود می‌رسد [10]. از دیگر اثرات افزایش انرژی ضربه می‌توان به خروج منحنی نیرو برحسب زمان از حالت متقارن اشاره نمود که بیانگر افزایش نسبت انرژی لازم برای به وجود آمدن ترک‌ها³ و لایه‌لایه شدن

رسیده است. با ادامه افزایش انرژی ضربه تا آستانه فرورفتگی نرخ افزایش نیروی تماسی میان پرتابه و نمونه کاهش یافته و به حدود 5 درصد می‌رسد. نهایتاً با افزایش انرژی ضربه به مقدار 80 ژول که آستانه سوراخ شدگی می‌باشد این روند ادامه یافته و مقدار نیروی تماسی با 2/37 درصد افزایش به 9960 نیوتن می‌رسد. مقادیر بیشینه انرژی جذب شده برای ضربات با انرژی‌های مختلف در شکل 11 مقایسه شده‌اند.

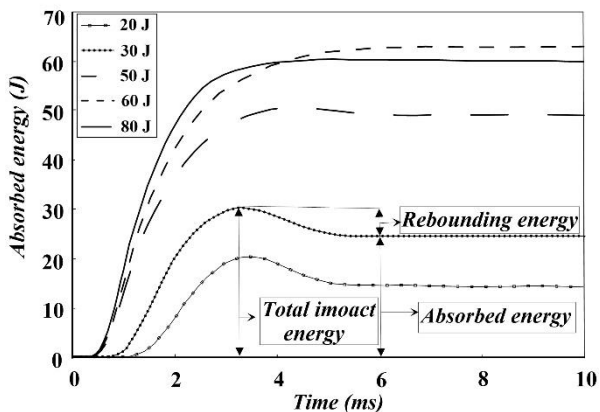


Fig. 9 Absorbed energy- time diagram of carbon-fiber-epoxy composites for different applied impact energies

شکل 9 نمودار انرژی-زمان کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن در انرژی‌های مختلف

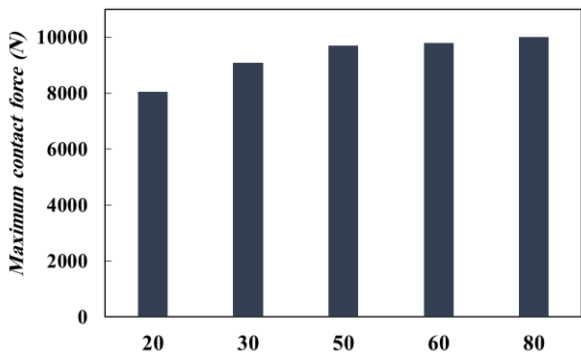


Fig. 10 Maximum contact force of carbon-fiber-epoxy composites for different applied impact energies

شکل 10 مقادیر ماکزیمم نیروی تماس در ضربه با انرژی‌های مختلف

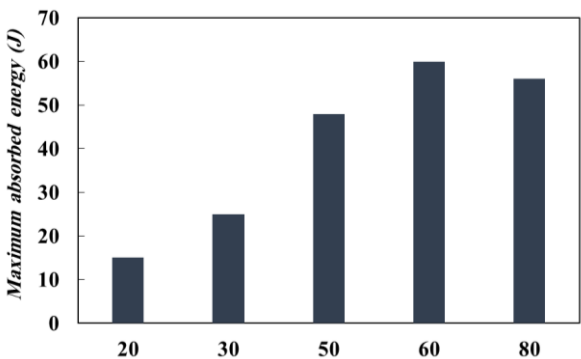


Fig. 11 Maximum absorbed energy of carbon-fiber-epoxy composites for different applied impact energies

شکل 11 مقادیر بیشینه انرژی جذب شده در ضربه با مقادیر انرژی‌های مختلف

Fig. 7 Contact force- time diagram of carbon-fiber-epoxy composites for different applied impact energies

شکل 7 نمودار نیروی تماس-زمان کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن در انرژی‌های مختلف

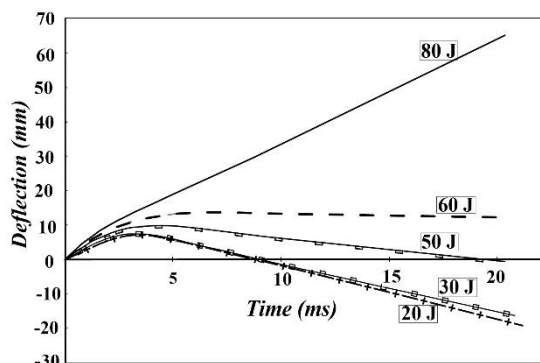


Fig. 8 Deflection- time diagram of carbon-fiber-epoxy composites for different applied impact energies

شکل 8 نمودار خیز برحسب زمان کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن در انرژی‌های مختلف

نمودار خیز-زمان نیز مشابه نیرو-خیز می‌تواند حاوی اطلاعاتی در مورد عکس‌العمل نمونه در مقابل بار ضربه‌ای باشد. با توجه به منحنی‌های موجود در نمودار شکل 6 می‌توان به تفاوت حالت‌های مختلف بارگذاری ضربه‌ای شامل بازخورد، فرورفتگی و سوراخ شدگی پی برد. در آزمایش‌های انجام‌شده با انرژی‌های 20، 30، و 50 ژول، پرتابه پس از برخورد به سطح نمونه تغییر جهت داده و به حرکت خود ادامه داده است که در این حالت منحنی ضربه در ابتدا صعودی بوده و دارای شیب مثبت می‌باشد ولی پس از برخورد با سطح نمونه تغییر جهت داده و شیب نمودار منفی می‌شود. در حالت فرورفتگی منحنی در ابتدای حرکت دارای شیب مثبت است و پس از برخورد با نمونه و فرو رفتن در آن شیب تقریباً صفر شده و نمودار افقی می‌شود که این حالت در ضربه با انرژی 50 ژول رخ داده است. در ضربه با انرژی 80 ژول سوراخ شدگی روی داده و شیب منحنی خیز-زمان در کل فرآیند تست ضربه مثبت می‌ماند با این تفاوت که شیب منحنی در زمان‌های قبل از برخورد بیشتر از حالت بعد از سوراخ شدگی است. شکل 9 نمودارهای انرژی جذب‌شده-زمان نمونه‌های کامپوزیتی را برای انرژی‌های 20، 30، 50، 60 و 80 ژول تحت بارگذاری با سرعت کم نشان می‌دهد. به‌طور کلی منحنی انرژی برحسب زمان بیانگر تمامی نکات موجود در مورد وضعیت انرژی‌های جذب‌شده، انرژی برگشت و انرژی کل ضربه است. با توجه به نتایج شکل 9 و با در نظر گرفتن منحنی انرژی برای تست ضربه با انرژی 30 ژول می‌توان نتیجه گرفت که در این حالت انرژی کل ضربه برای نفوذ به نمونه کافی نبوده و پس از تماس پرتابه با سطح نمونه در طی فرآیند ضربه، مقداری از انرژی آن توسط نمونه جذب‌شده و سپس جهت حرکت پرتابه عوض می‌شود. میزان انرژی صرف شده در این مرحله انرژی بازخورد نامیده می‌شود که تبدیل به انرژی جنبشی شده و سبب بازگشت پرتابه از سطح نمونه می‌گردد. همچنین مقدار انرژی برگشت تفاضل انرژی کل ضربه و انرژی جذب‌شده توسط نمونه معادل خواهد بود [25].

در حالت کلی همان‌گونه که از نتایج شکل 10 می‌توان استنباط نمود نیروی تماس بیشینه میان پرتابه و نمونه، با افزایش مقدار انرژی ضربه افزایش می‌یابد. مقدار نیروی تماسی در حالت ضربه با انرژی 20 ژول 8040 نیوتن بوده که با افزایش انرژی ضربه به 30 ژول با 14/18 درصد افزایش به 9180 نیوتن

Fig. 12 Maximum deflection of carbon-fiber-epoxy composites for different applied impact energies

شکل 12 مقادیر ماکزیمم خیز در ضربه با انرژی‌های مختلف

جدول 1 مقادیر ماکزیمم نیروی تماسی و ماکزیمم خیز در انرژی‌های مختلف
Table 1 Maximum contact force and deflection of carbon-fiber-epoxy composites for different applied impact energies

انرژی ضربه (ژول)	20	30	50	60	80
بیشینه نیروی تماس (نیوتن)	8.04	9.18	9.64	9.73	9.96
بیشینه خیز (میلی‌متر)	6.99	5.86	5.54	5.04	4.85
بیشینه انرژی جذب شده (ژول)	14.71	24.64	49.15	59.87	55.4

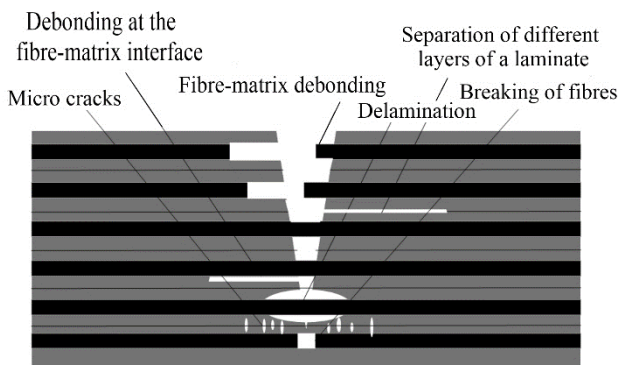


Fig. 13 Failure modes of composite specimens in impact tests

شکل 13 موده‌های شکست مواد کامپوزیت در تست ضربه

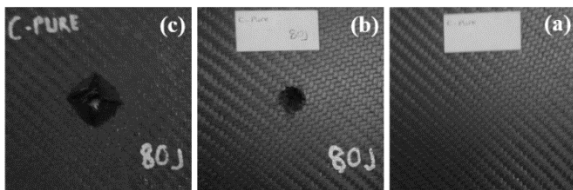


Fig. 14 Carbon-fiber-epoxy composite impact test specimen, a) rough test specimen, b) front face of damaged specimen, c) back face of damaged specimen

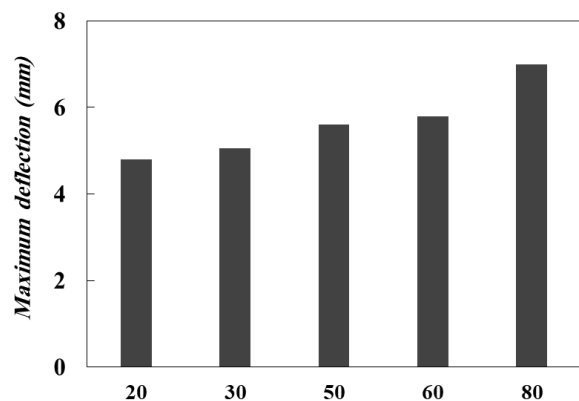
شکل 14 نمونه تست ضربه از جنس کامپوزیتی زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن، (a) نمونه تست ضربه، (b) سطح جلویی نمونه آسیب دیده، (c) سطح پشت نمونه آسیب دیده

تصاویر مربوط به جلو و پشت نمونه آسیب دیده کامپوزیتی زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن در اثر تست ضربه با سرعت پایین در شکل 14 نمایش داده شده است. با توجه به سطوح شکست به وجود آمده در نمونه نمایش داده شده در شکل 14 می‌توان به ماهیت شکست کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن در اثر ضربه تا حدودی پی برد. با دقت در نوع سوراخ ایجاد شده که در سطح جلویی نمونه که به شکل دایره است و با توجه به سطح پشت نمونه می‌توان به وقوع شکست ترد در این نوع از کامپوزیت‌ها اذعان کرد. اکثر مدهای شکست بحث شده در شکل 13 در این نمونه‌ها رخ داده است اما نتایج نشان دادند که اصلی‌ترین مود شکست رخ داده، شکست ترد فاز تقویت کننده یا همان الیاف کربن می‌باشد.

همان‌گونه که نتایج شکل 11 نشان می‌دهند بیشینه انرژی جذب شده توسط نمونه با افزایش مقدار انرژی ضربه افزایش می‌یابد. مقدار بیشینه انرژی در حالت ضربه با انرژی 20 ژول 14/71 ژول بوده که با افزایش انرژی ضربه به 30 ژول با 67/5 درصد افزایش به 22/64 ژول رسیده است. با ادامه افزایش انرژی ضربه تا 50 و 60 ژول که آستانه فرورفتگی می‌باشد بیشینه انرژی جذب شده 50 و 143 درصد افزایش یافته و به ترتیب به مقادیر 49/15 و 59/87 ژول می‌رسد. به عبارت دیگر با نزدیک شدن به مرحله فرورفتگی، نرخ افزایش انرژی جذب شده بیشتر می‌شود و نسبت بزرگ‌تری از کل انرژی جذب می‌شود. در حالی که با افزایش انرژی ضربه به مقدار 80 ژول که آستانه سوراخ شدگی می‌باشد مقدار بیشینه انرژی با 6/77 درصد کاهش به 55/43 ژول می‌رسد که نشان‌دهنده کاهش انرژی جذب شده ضربه توسط نمونه می‌باشد. مقادیر ماکزیمم خیز برای انرژی‌های مختلف در شکل 12 مقایسه شده‌اند.

با توجه به نتایج، افزایش مقدار خیز ناشی از ضربه در نمونه‌های کامپوزیتی با زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن کاملاً مشهود است. مقدار کمینه خیز برای تست ضربه با انرژی 20 ژول 4/85 میلی‌متر بوده که با افزایش انرژی ضربه این مقدار نیز افزایش می‌یابد. البته این افزایش خطی نبوده و با نزدیک شدن به آستانه سوراخ شدگی مقدار افزایش خیز شیب تندتری به خود می‌گیرد. مقادیر دقیق نتایج تست برای به دست آوردن بیشینه نیروی تماسی، بیشینه انرژی جذب شده و بیشینه خیز در انرژی‌های مختلف برای کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن در جدول 1 داده شده است.

شکل 13 موده‌های شکست احتمالی مواد کامپوزیت در فرایند تست ضربه را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. در بارگذاری ضربه‌ای پرتابه با مقدار انرژی مشخص (که می‌تواند از دستگاه ضربه به جسم منتقل شده و یا اینکه در اثر سقوط آزاد پرتابه از یک ارتفاع و تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی در آن ذخیره شده باشد) با نمونه هدف برخورد کرده و انرژی خود را به نمونه انتقال می‌دهد. انرژی جذب شده توسط نمونه می‌تواند به طرق مختلف در داخل نمونه مصرف گردد. از موارد مصرف انرژی در داخل نمونه کامپوزیتی می‌توان به مواردی همچون ایجاد میکروتکرک‌ها در داخل ماتریس و یا فصل مشترک بین الیاف و ماتریس، جدایش، لایه‌لایه شدن در ناحیه فصل مشترک بین الیاف و ماتریس، لایه‌لایه شدن بین لایه‌های تشکیل دهنده کامپوزیت اشاره کرد که در این حالت‌ها انرژی جذب شده توسط نمونه صرف ایجاد سطوح جدید می‌گردد [26]. کشیده شدن الیاف از داخل ماتریس، شکست الیاف در اثر به وجود آمدن نیروهای کششی و فشاری در ساختار داخلی کامپوزیت در اثر برخورد جسم ضربه زنده از دیگر موارد مصرف انرژی در داخل نمونه می‌باشد.



۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن تحت بارگذاری ضربه‌ای با سرعت کم مورد بررسی قرار گرفت. از نتایج حاصل می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- مقدار انرژی آستانه فرورفتگی و سوراخ‌شدگی کامپوزیت با روش پروفایل انرژی به دست آمد که برای این نوع کامپوزیت مقادیر 60 و 80 ژول استخراج گردید.
- در مقادیر انرژی کمتر از 60 ژول، حالت بازخورد رخ داده و پرتابه پس از برخورد با نمونه قسمتی از انرژی خود را به نمونه داده و سبب آسیب‌دیدگی داخلی و خارجی نمونه شده و از سطح نمونه برگشت داده شده است. در انرژی 80 ژول، پرتابه در نمونه فرورفته و تمام انرژی خود را به نمونه داده است. در انرژی‌های بالای 80 ژول سوراخ‌شدگی رخ داده و انرژی جذب‌شده توسط نمونه کمتر از انرژی ضربه است.
- کاهش انرژی جذب شده در 80 ژول به علت ایجاد پدیده لایه لایه شدن در تعداد سیکل بالا می‌باشد که باعث کاهش مقاومت کامپوزیت نیز می‌شود. لذا در این نمونه‌ها مقاومت در مقابل ضربه کم شده و انرژی جذب شده نیز کمتر خواهد بود. از طرفی افزایش مقدار ماکزیمم نیرو و خیز نشان دهنده شروع نفوذ و شروع سوراخ شدن نمونه می‌باشد.
- منحنی نیرو-خیز برای انرژی‌های کمتر از 60 ژول بسته بوده و انتهای نمونه تا مبدأ یا خیز صفر ادامه پیدا کرده است. با افزایش انرژی ضربه شیب منحنی‌های نیرو-خیز و نیرو-زمان افزایش یافته و زمان رخ دادن بیشینه نیرو کاهش یافته است. سطح زیر نمودار نیرو-خیز معادل با انرژی جذب‌شده توسط نمونه بوده و برای ضربه با انرژی 60 ژول دارای بیشترین مقدار است.
- با افزایش انرژی ضربه، بیشینه نیروی تماسی، انرژی جذب‌شده و خیز افزایش یافته است. کم بودن چقرمگی الیاف کربن و بدین ترتیب ترد بودن کامپوزیت ساخته شده مهم‌ترین عامل ضعف این نوع کامپوزیت‌ها در برابر بارهای ضربه‌ای می‌باشد.
- با توجه به سطوح شکست تقریباً تمامی مودهای شکست از جمله ترک در ماتریس، جدایش، کشیده شدن الیاف از ماتریس و شکست الیاف در طی بارگذاری ضربه رخ داده است، ولی آنچه مسلم است عمده‌ترین مود، شکست ترد فاز تقویت‌کننده یا همان الیاف کربن می‌باشد.

7- مراجع

- Integrated Carbon Fiber/Epoxy Hybrid Composites Manufactured by Ooa-Vbo Process" Composite Structures, Vol. 120, pp. 32-40, 2015.
- [6] Farahat, H. and Brooghani, S. Y. A., "Studying the Behavior of A356/Sicp Composite Foam under Low-Velocity Impact Loading" Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 7, No. 2, pp.129-147, 2017.
- [7] Sarasini, F., Tirillo, J., Ferrante, L., Valente, M., Valente, T., Lampani, L., Gaudenzi, P., Cioffi, S., Iannace, S. and Sorrentino, L., "Drop-Weight Impact Behaviour of Woven Hybrid Basalt-Carbon/Epoxy Composites" Composites Part B-Engineering, Vol. 59, pp. 204-220, 2014.
- [8] Ghajar, R. and Sohi, A. R., "Effect of Impactor Shape and Temperature on the Behavior of E-Glass/Epoxy Composite Laminates" Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 1-8, 2014 (In Persian).
- [9] Eslami-Farsani, R. and Shahrabi-Farahani, A., "Investigation on the High-Velocity Impact Resistance in Grid Composite Plates Containing Carbon Nanotubes" Tabriz journal of mechanical engineering, Vol. 48, No. 1, pp. 19-26, 2018 (In Persian).
- [10] Hosur, M. V. and Abdullah, M., "Studies on the Low-Velocity Impact Response of Woven Hybrid Composites" Composite Structures, Vol. 67, No. 3, pp. 253-262, 2005.
- [11] Khasrag, E. K., Siadati, H. and Eslami-Farsani, R., "Effect of Surface Modification of Graphene Nanoplatelets on the High Velocity Impact Behavior of Basalt Fibers Reinforced Polymer-Based Composites" J Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 109-116, 2018 (In Persian).
- [12] Icten, B. M., Atas, C., Aktas, M. and Karakuzu, R., "Low Temperature Effect on Impact Response of Quasi-Isotropic Glass/Epoxy Laminated Plates" Composite Structures, Vol. 91, pp. 318-323, 2009.
- [13] Ghasemi, F. A., Ghasemi, I. and Daneshpayeh, S., "A Study on Effect of Titanium Dioxide Nanoparticles on the Elastic Modulus, Impact and Tensile Strengths of Polypropylene/Linear Low Density Polyethylene (Pp/Lldpe) Blends" J Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 386-390, 2018 (In Persian).
- [14] Bigdilou, M. B., Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "The Effect of Carbon Nanotubes on High Velocity Impact Behavior of Hybrid Kevlar- Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Fibers Composite with Interlayer Configuration" J Journal of Science and Technology of Composites, pp. -, 2018 (In Persian).
- [15] Dizaji, R. A. and M.Yazdani, "Low Velocity Impact Response of Carall Composites Reinforced with Nano Particles" Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 58-64, 2017 (In Persian).
- [16] Khosravi, H., Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "An Experimental Study on Mechanical Properties of Epoxy/Basalt/Carbon Nanotube Composites under Tensile and Flexural Loadings" J Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 2, pp. 187-194, 2016 (In Persian).
- [17] Korsavi-Kashani, S. A., "Exprimental Investigation on Effect of Functionalized Nano Silica and Nano Graphene on Basalt Fibers-Epoxy Composite under High Velocity Impact" J Journal of Science and Technology of Composites, pp. -, 2019 (In Persian).
- [18] Nouri-Niyaraki, M., Ashenai Ghasemi, F., Ghasemi, I. and Daneshpayeh, S., "Experimental Analysis of Graphene Nanoparticles and Glass Fibers Effect on Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene/Epdm Based Nanocomposites" Journal of Science and Technology of Composites", Vol. 5, No. 2, pp. 169-176, 2018. (In Persian)
- [19] ASTM, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, , ASTM International . ,
- [20] Sayer, M., Bektaş, N. B. and Sayman, O., "An Experimental Investigation on the Impact Behavior of Hybrid Composite Plates" Composite Structures ,Vol. 92, No. 5, pp. 1256-1262, 2010.
- [1] Izigany, T., "Special Manufacturing and Characteristics of Basalt Fiber Reinforced Hybrid Polypropylene Composites: Mechanical Properties and Acoustic Emission Study" Composites Science and Technology, Vol. 66, No. 16, pp. 3210-3220, Dec, 2006.
- [2] Iahmoud, B., Manseri, L., Rogani, A., Navarro, P., Marguet, S., Ferrero, J. F. and Tawk, I., "Experimental and Numerical Study of the Damage Mechanisms in Hybrid Unidirectional/Woven Composites under Impact Loading" Composite Structures, Vol. 209, pp. 606-615, 2019.
- [3] Han, S. H., Oh, H. J., Lee, H. C. and Kim, S. S., "The Effect of Post-Processing of Carbon Fibers on the Mechanical Properties of Epoxy-Based Composites" Composites Part B-Engineering, Vol. 45, No. 1, pp. 172-177, 2013.
- [4] de Vasconcellos, D. S., Sarasini, F., Touchard, F., Chocinski-Arnault, L., Pucci, M., Santulli, C., Tirillo, J., Iannace, S. and Sorrentino, L., "Influence of Low Velocity Impact on Fatigue Behaviour of Woven Hemp Fibre Reinforced Epoxy Composites" Composites Part B: Engineering, Vol. 66, pp. 46-57, 2014.
- [5] Rahman, M. M., Hosur, M., Hsiao, K.-T., Wallace, L. and Jeelani, S., "Low Velocity Impact Properties of Carbon Nanofibers

- [21] Atas, C. and Sayman, O., "An Overall View on Impact Response of Woven Fabric Composite Plates" *Composite Structures*, Vol. 82, No. 3, pp. 336–345, 2008.
- [22] Aktaş, M., Atas, C., İçten, B. M. and Karakuzu, R., "An Experimental Investigation of the Impact Response of Composite Laminates" *Composite Structures*, Vol. 87, No. 4, pp. 307–313, 2009.
- [23] Ideon, R. K., Hu, H., Wambua, P. and Gu, B., "Characterizations of Basalt Unsaturated Polyester Laminates under Static Three-Point Bending and Low-Velocity Impact Loadings" *Polymer Composites*, Vol. 35, No. 11, pp. 2203–2213, 2014.
- [24] Sayer, M., Bektas, N. B. and Sayman, O., "An Experimental Investigation on the Impact Behavior of Hybrid Composite Plates" *Composite Structures*, Vol. 92, No. 5, pp. 1256-1262, Apr, 2010.
- [25] Sarasini, F., Tirillo, J., Valente, M., Ferrante, L., Cioffi, S., Iannace, S. and Sorrentino, L., "Hybrid Composites Based on Aramid and Basalt Woven Fabrics: Impact Damage Modes and Residual Flexural Properties" *Materials & Design*, Vol. 49, pp. 290-302, Aug, 2013.
- [26] Richardson, M. O. W. and Wisheart, M. J., "Review of Low-Velocity Impact Properties of Composite Materials" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 27, No. 12, pp. 1123–1131, 1996.

