مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1393، دوره 14، شماره 10، ص‌ص 1-8

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی اثرشکل ضربه زننده و دمابر رفتار صفحات کامپوزیت شیشه/اپوکسی در ضربات سرعت کم

رحمت اله قاجار[1*]، اکبر رصاف[2]

1- استاد، آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2-کارشناس ارشد، آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 1999143344، ghajar@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 07 اردیبهشت 1393
پذیرش: 22 خرداد 1393
ارائه در سایت: 02 مهر 1393

کلید واژگان:
ضربه سرعت پایین
ورق کامپوزیتی
شکل ضربه زننده
دما

چکیده

در پژوهش حاضر اثر شکل ضربه زننده و دماهای بالا بر روی پاسخ صفحات کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است. کامپوزیت مورد استفاده از جنس شیشه/اپوکسی، ابعاد 3×120×120 میلیمتر، جرم ضربه زننده 7 کیلوگرم و سرعت برخورد 1/4 متر بر ثانیه می‌باشد. جهت انجام آزمایش ضربه از دستگاه وزنه افتان، و برای بررسی اثر شکل ضربه زننده از چهار نوع ضربه زننده تخت، نیم کروی، مخروطی و سهموی استفاده شده است. میزان آسیب، زمان برخورد، بیشینه‌ی نیروی برخورد، انرژی جذب شده و جابجایی برای چهار ضربه زننده مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. هرچه سر ضربه زننده پهن‌تر باشد زمان برخورد کمتر و بیشینه‌ی نیروی برخورد بیشتر خواهد بود. ناحیه آسیب ضربه زننده مخروطی از همه بیشتر است. ضربه زننده تخت بر خلاف سه نمونه دیگر دارای مرز ناحیه آسیب مشخصی نمی‌باشد. همچنین جهت بررسی اثر دما بر روی پاسخ کامپوزیت، دماهای آزمایش را بین دمای اتاق و 150 درجه سانتیگراد تغییر داده و پارامترهایی مانند بیشینه‌ی نیروی برخورد، جابجایی و انرژی جذب شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با افزایش دما بیشینه‌ی نیروی برخورد کاهش و جابجایی افزایش می‌یابد ولی انرژی جذب شده با تغییر دما تغییر چندانی نمی‌کند.

Effect of impactor shape and temperature on the behavior of E-glass/epoxy composite laminates

Rahmatollah Ghajar*, Akbar Rassaf

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi Univ. & Tech., Tehran, Iran.
* P.O.B. 1999143344 Tehran, Iran, ghajar@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 27 April 2014
Accepted 12 June 2014
Available Online 24 September 2014

Keywords:
Low velocity impact
Composite laminate
Impactor shape
Temperature

ABSTRACT

In this research, low velocity impact tests have been carried out on laminated composite plates to investigate the impactor shape and temperature effect on the dynamic behavior and material damage. The woven Eglass/epoxy laminates were manufactured. The studies have been done on plate with dimensions of 120 mm×120 mm×3 mm, impactor with 1.4 m/s incident velocity and 7 kg mass. Specimens have been impacted by using steel flat, hemispherical, ogival and conical impactors, all 12.7 mm in diameter. The specimens impacted by the conical impactor absorbed most energy because of local penetration. The flat impactor caused the highest peak force and lowest contact duration as expected. The force history of the impactor, projectile displacement and absorbed energy of different impactor shapes has been measured and compared with each other. The temperatures were in the range of room temperature to 150 °C. The parameters including maximum contact force, projectile displacement and the absorbed energy of different temperature have been investigated. Maximum contact force decreased with increasing of temperature, and deflection of impactor increased with increasing of temperature.

1- مقدمه

تاریخچه استفاده از کامپوزیت‌های تقویت شده الیافی به چهار دهه اخیر باز می‌گردد، استفاده از این مواد در صنایع مختلف مانند هوا و فضا، خودرو، ساختمان و .... از رشد چشمگیری برخوردار بوده‌است. رفتار این مواد در مقابل بارهای ضربه‌ای یکی از بزرگترین نگرانی‌ها در مورد آن‌ها می‌باشد.

بارهای ضربه‌ای می‌توانند در اثر سقوط اجسام به وجود آیند و آسیب‌های داخلی قابل توجهی را ایجاد و موجب کاهش شدید مقاومت باقیمانده ورق‌های کامپوزیتی گردند. بنابراین رفتار این مواد در مقابل ضربه بایستی به دقت مورد مطالعه قرار گیرد. محققین مختلفی به بررسی رفتار کامپوزیت‌ها در مقابل ضربات سرعت پایین پرداخته‌اند. حسین‌زاده و همکاران [1] به بررسی اثر جنس و ضخامت بر روی رفتار کامپوزیت و اندازه ناحیه آسیب پرداختند. آن‌ها برای انجام آزمایش از چهار نمونه با ابعاد یکسان، رزین اپوکسی و الیاف شیشه و کربن استفاده کردند. کامپوزیت شیشه اپوکسی در بین ساختارها از بقیه ضعیف‌تر می‌باشد. به طوری که صفحه نازک انرژی بیش از 10 ژول و صفحه

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
R. Ghajar, A. Rassaf, 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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.10.1.8]

ضخیم بیش از 15 ژول را نمی‌توانند تحمل کنند و پس از آن دچار آسیب می‌شوند. اما رفتار کامپوزیت کربن اپوکسی کاملا برعکس است. در این ماده در برخوردهای با انرژی پایین تا 30 ژول هیچ‌گونه آسیبی مشاهده نمی‌شود. برای استفاده از مزایای هر دو این مواد می‌توان آن‌ها را با هم ترکیب کرد و کامپوزیت هیبرید کربن/ شیشه/ اپوکسی را ساخت.

نیک و همکاران [2] به بررسی رفتار ضربه‌ای و خصوصیات پس از ضربه کامپوزیت شیشه/ کربن/ اپوکسی با لایه چینی‌های مختلف پرداختند. برای مقایسه، کامپوزیت شیشه و کربن را هم به طور مجزا مورد مطالعه قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که کامپوزیت هیبریدی که در آن کربن در خارج و شیشه در داخل است، دارای بهترین مقاومت فشاری است. بنابراین با این چیدمان، ناحیه آسیب و اندازه ترک نسبت به بقیه کمتر است. رضا پاک نژاد و همکاران [3] اثرات بار ضربه‌ای با جرم کوچک و سرعت پایین روی یک ورق کامپوزیت با تکیه‌گاه تمام گیردار را با استفاده از روش گالرکین بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سرعت ضربه زننده نسبت به جرم آن در نیروی تماسی، کاهش خیز ورق و زمان اعمال ضربه موثرتر است. آن‌ها همچنین نشان دادند که در ضربه زنندهٔ جرم کوچک، با تغییر زوایای چیدمان الیاف، تغییر چندانی در نیروی تماسی و خیز ایجاد نمی‌گردد، در حالی که برای ضربه زنندهٔ جرم بزرگ، اختلاف در مقدار خیز قابل ملاحظه است. فرامرز آشنای قاسمی و همکاران [4] پاسخ دینامیکی ورق یکسرگیردار کامپوزیتی با لایه فلزی تحت ضربه با اجرام کوچک و بزرگ را با استفاده از مدل دو درجه آزادی جرم و فنر و نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از ورق آلومینیوم با ضخامت کم بین لایه‌های کامپوزیت باعث بهبود مقاومت ورق در اثر اعمال ضربه می‌شود. محمد حسین پل و همکاران [5] یک مدل تحلیلی بر اساس تقسیم مدت زمان نفوذ به فواصل زمانی نفوذ کوچک و محاسبه انرژی جذب شده توسط مکانیزم‌های مختلف جذب انرژی در هر یک از فواصل زمانی برای نفوذ پرتابه‌های سر تخت در اهداف ساخته شده از مواد مرکب شیشه/اپوکسی با بافت دو بعدی ارائه کردند. میلی و نسیب [6] به بررسی اثر لایه چینی بر روی رفتار کامپوزیت پرداختند. این محققین کامپوزیت شیشه اپوکسی را در سه لایه چینی $[0_2/90_6/0_2]$، $[0_3/90_4/0_3]$ و $[0_4/90_2/0_4]$ تهیه و مورد آزمایش قرار دادند. کانتول [7] به بررسی اثر شکل هندسی و ابعاد درون صفحه‌ای قطعات، روی رفتار کامپوزیت و میزان آسیب پرداخت. او کامپوزیت‌هایی از جنس شیشه پلی‌استر در اشکال مختلف را مورد آزمایش قرار داد. نمونه‌ها به شکل دایروی با قطر 50 تا 300 میلیمتر و مربعی به ابعاد 75 و 200 میلیمتر بودند. شاپنر و ابریت [8] به بررسی نیروی آستانه شروع تورق (DTL) در ضربه سرعت کم پرداختند. آن‌ها با بررسی حدود 500 نمودار نیروی برخورد بر حسب زمان، دریافتند که زمانی تورق رخ خواهد داد که نمودار نیرو بر حسب زمان دچار یک افت ناگهانی گردد.

صالحی خوجین و همکاران [9] اثر تغییرات دما را بر روی رفتار صفحات کامپوزیتی مورد بررسی قرار دادند. انرژی‌های مورد استفاده 5، 15 و 25 ژول، وتغییرات دما از 50- تا 120 درجه سانتیگراد است. پارامترهای مورد بررسی عبارتند از: بیشینه‌ی انرژی، انرژی الاستیک، بیشینه‌ی جابجایی، بیشینه‌ی نیروی برخورد و مقاومت فشاری پس از برخورد. این محققین نتیجه گرفتند که اندازه انرژی برخورد و تغییرات دما اثرات قابل ملاحظه‌ای بر روی رفتار کامپوزیت دارد. پارک و جنگ [10] اثر ضخامت بر روی رفتار کامپوزیت آرامید/ وینیلستر را مورد بررسی قرار دادند. انرژی برخورد و مساحت ناحیه تورق به عنوان تابعی از ضخامت لایه‌ها بررسی شده‌اند. آکتاش و همکاران [11] به بررسی اثر دماهای بالا و لایه چینی‌های مختلف بر روی مقاومت فشاری پس از برخورد پرداختند.

تا کنون اکثر کارهایی که در مورد ضربات سرعت پایین انجام شده به وسیله ضربه زننده نیم کروی بوده است. برای شناخت کامل رفتار کامپوزیت-ها در برابر بارهای ضربه‌ای، لازم است که پاسخ آن‌ها در مقابل اشکال دیگر ضربه زننده‌ها بررسی شود. همچنین پژوهش‌های نسبتا کمی به خصوص بر روی کامپوزیت شیشه-اپوکسی در بازه‌های دمایی مختلف انجام گرفته است. برای درک رفتار و شناخت کامل خصوصیات کامپوزیت‌ها در ضربات سرعت پایین، لازم است که مطالعات بیشتری بر روی این مواد و در دماهای مختلف انجام گیرد. به همین خاطر در پژوهش حاضر اثر شکل ضربه زننده و دما مورد بررسی قرار می‌گیرند. چهار شکل ضربه زننده تخت، نیم کروی، مخروطی و سهموی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اثر شکل ضربه زننده بر بیشینه‌ی نیروی برخورد، زمان برخورد، بیشینه‌ی جابجایی، انرژی جذب شده و میزان آسیب مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی اثرات دما بر روی رفتار ورق‌های کامپوزیتی، دما را از دمای اتاق تا 150 درجه سانتیگراد تغییر و پارامترهایی مانند نیروی برخورد، جابجایی و انرژی جذب شده مورد بررسی قرار می‌گیرند. جنس نمونه‌ها شیشه/اپوکسی، و برای انجام آزمایش از دستگاه وزنه افتان استفاده می‌شود.

2- دستگاه وزنه افتان و نمونه‌های آزمایش

2-1- دستگاه وزنه افتان

یکی از عوامل مهم در بررسی ضربه، انرژی جنبشی اولیه پرتابه می‌باشد. عوامل دیگری نیز بر پاسخ سازه تاثیر گذار خواهند بود. به عنوان مثال، با فرض انرژی جنبشی یکسان، تاثیر یک جرم بزرگ با سرعت اولیه کم و یا یک جرم کوچک با سرعت اولیه زیاد بر روی کامپوزیت متفاوت خواهد بود.

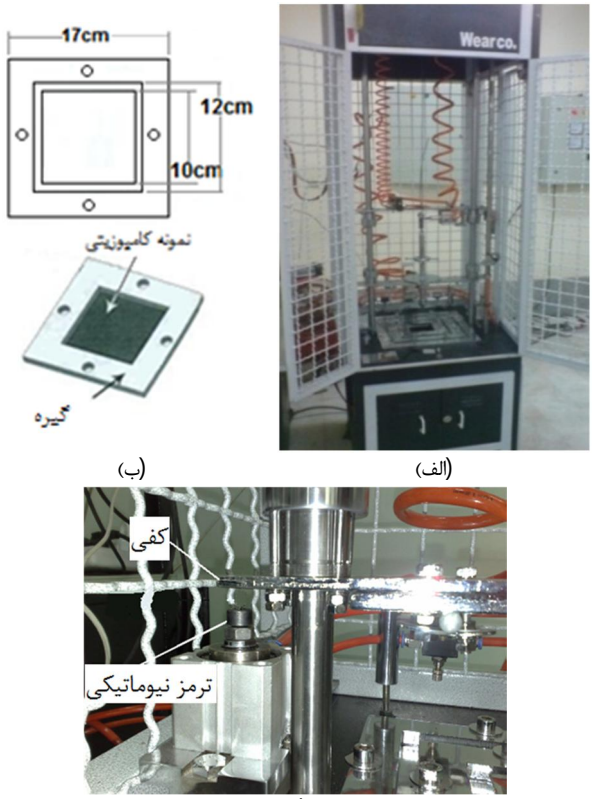
یک ضربه ممکن است بر روی همه سازه اثر بگذارد و یا منطقه کوچکی در اطراف ناحیه ضربه را تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین انتخاب فرآیند آزمایش، باید به گونه‌ای باشد که بتواند شرایطی مشابه با مدل و حالت واقعی به وجود آورد. با توجه به شرایط واقعی، شبیه‌سازی در آزمایشگاه صورت می‌گیرد و برای انطباق با شرایط واقعی، نوع آزمایش مشخص می‌گردد. برای مثال در طول مدتی که یک هواپیما از زمین بلند می‌شود و یا فرود می‌آید، ذرات معلق در هوا، خاک و شن، می‌توانند باعث آسیب رساندن به بدنه هواپیما گردند. این شرایط سرعت زیاد و جرم کم پرتابه، می‌تواند با استفاده از تفنگ گازی مدل شود. ضربه بر روی سازه‌های کامپوزیتی می‌تواند به وسیله یک پرتابه بزرگتر و با سرعت کمتر وارد شود. مانند سقوط ناگهانی ابزار کار در هنگام تعمیر و نگهداری. این شرایط با آزمایش وزنه افتان مدل‌سازی می‌شوند.

دستگاه مورد استفاده، دستگاه وزنه افتان آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد. این دستگاه ساخت شرکت سایش ایران است. پرتابه بر روی یک ریل با اصطکاک بسیار کم قرار دارد که می‌تواند سقوط آزاد نماید. شکل الف-1 نمای کلی دستگاه را نشان می‌دهد. ظرفیت حسگر نیرو 10kN و با فرکانس داده برداری 25 کیلو هرتز است. ارتفاع و جرم پرتابه هر دو قابل تغییر هستند. در نتیجه می‌توان انرژی‌های جنبشی متفاوتی را اعمال کرد.

مطابق شکل ب-1 نمونه کامپوزیتی که یک مربع به ابعاد 12×12 سانتیمتر می‌باشد را روی تکیه‌گاه قرار داده و سپس یک گیره مربعی شکل تو خالی روی آن قرار گرفته و توسط 4 پیچ محکم می‌گردد. به طوری که هر 4 لبه به پهنای 10 میلیمتر گیردار و به ابعاد 10×10 سانتیمتر آزاد می‌باشد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.10.1.8]



شکل 1 (الف) نمای کلی دستگاه وزنه افتان (ب) تکیه‌گاه‌ها و طرز قرار گرفتن نمونه کامپوزیتی (ج) ترمز نیوماتیکی دستگاه

بر اساس استاندارد ASTM D5628 [12] ضربه زننده با نوک نیم‌کروی و با قطر 12/7 میلیمتر در آزمایش‌ها استفاده می‌شود. جنس پرتابه از فولاد 4340 سخت کاری شده است. حسگر نیرو به انتهای ضربه زننده متصل شده است و در هنگام ضربه مقدار نیرو را اندازه‌گیری می‌کند. در انتها نموداری که دستگاه ثبت می‌کند، نمودار نیرو-زمان می‌باشد. جهت جلوگیری از برخوردهای مجدد ضربه زننده بر روی قطعه، از یک جک نیوماتیکی استفاده شده است که پس از اتمام برخورد اول، به سرعت عمل کرده و ضربه زننده را متوقف می‌کند و از برخوردهای ثانویه جلوگیری می‌نماید (شکل ج-1).

2-2- نمونه‌های آزمایش

برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از الیاف شیشه نوع E به صورت پارچه‌ای بافت ساده استفاده شده است. هر کدام از لایه‌های شیشه دارای ضخامت 0/2 میلیمتر و جرم 200 گرم در هر متر مربع می‌باشد. الیاف شیشه به دلیل مشخصات مکانیکی خوب، قیمت ارزان و در دسترس بودن، کاربرد زیادی دارد. به همین خاطر شناخت رفتار آن در مقابل ضربات سرعت کم از اهمیت زیادی برخوردار است. رزین مورد استفاده اپوکسی ML 503 و هاردنر HA 12 ساخت ایران می‌باشد که یکی از رایج‌ترین رزین‌های مورد استفاده در صنعت است. مقاومت فشاری و کششی آن به ترتیب 74 و 49 مگاپاسکال و دمای Tg آن بین80 تا 90 درجه سانتیگراد است. روش ساخت نمونه‌ها به صورت دستی می‌باشد. نمونه‌ها به صورت مربعی و با ابعاد 120×120 میلیمتر و با ضخامت 3 میلیمتر ساخته شده‌اند. تمامی مشخصات مکانیکی ورق کامپوزیتی که از طریق آزمایش به دست آمده، در جدول 1 درج شده است. چون الیاف به کار رفته در کامپوزیت به صورت پارچه‌ای است، مقادیر مدول الاستیسیته در دو جهت الیاف و عمود بر الیاف برابر هستند.

3- اثر شکل ضربه زننده

هدف این بخش بررسی اثر شکل ضربه زننده‌های مختلف بر روی پاسخ صفحات کامپوزیتی می‌باشد. معمول‌ترین نوع ضربه زننده، نیم کروی است که در اکثر پژوهش‌های معمول از آن استفاده می‌شود. ضربه زننده‌های دیگر عبارتند از ضربه زننده‌های تخت، سهموی و مخروطی. هر چهار نوع ضربه زننده دارای قطر 12/7 میلیمتر و از جنس فولاد سخت کاری شده می‌باشند. شکل 2 این چهار نوع ضربه زننده را نشان می‌دهد. در دستگاه یک فیکسچر تعبیه شده‌است که می‌توان با استفاده از چهار عدد پیچ، ضربه زننده را به دستگاه متصل کرد. جرم ضربه زننده‌ها و متعلقات متصل به آن (حسگر نیرو، یاتاقان‌ها و .....) 7 کیلوگرم است و از ارتفاع 10 سانتیمتری بر روی هدف پرتاب می‌شود، در نتیجه انرژی ضربه برای هر 4 نوع ضربه زننده تقریبا 6/87 ژول خواهد بود. ضخامت قطعات کامپوزیتی 3 میلیمتر و ابعاد آنها 120×120 میلیمتر می‌باشد. شکل 3 مقایسه نمودارهای نیرو-زمان برای چهار ضربه زننده مختلف را نشان می‌دهد. این نمودارها توسط حسگر نیروی دستگاه استخراج شده‌است. مشاهده می‌شود که، بیشترین نیروی برخورد و کمترین زمان برخورد مربوط به ضربه زننده تخت، و کمترین نیروی برخورد و بیشترین زمان برخورد مربوط به ضربه زننده مخروطی می‌باشد. این نتایج با نتایج کیم و گو [13] و میتروسکی [14] همخوانی دارد. کمترین نیروی برخورد برای ضربه زننده مخروطی می‌باشد که به خاطر نفوذ ضربه زننده درون قطعه است. این نفوذ همچنین باعث ایجاد اصطکاک بین ضربه زننده و قطعه می‌شود. این نفوذ و اصطکاک ناشی از آن، علت افزایش زمان برخورد ضربه زننده مخروطی می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت هرچه سر ضربه زننده پهن‌تر باشد بیشینه‌ی نیروی برخورد آن بیشتر، و هر چه ضربه زننده تیزتر باشد زمان برخورد آن بیشتر است. جدول 2 مقایسه بین زمان برخورد و بیشینه‌ی نیروی برخورد برای هر چهار ضربه زننده را نشان می‌دهد.

جدول 1 مشخصات مکانیکی صفحات کامپوزیتی [15]

ρ(kg/m³)	1700
E_1 (GPa)	9
E_2 (GPa)	9
ν_{12} (بزرگترین ضریب پواسون)	0/46
G_{12} (GPa)	2/11
G_{13} (GPa)	0/8
G_{23} (GPa)	0/8

جدول 2 مقایسه بین زمان و بیشینه‌ی نیروی برخورد برای چهار شکل ضربه زننده

نوع ضربه زننده	زمان برخورد (ms)	بیشینه‌ی نیروی برخورد (kN)
تخت	15/7	2/8
نیم کروی	17	2/25
سهموی	18/1	2/05
مخروطی	19/2	1/7

شکل 2 چهار نوع ضربه زننده استفاده شده (الف) تخت (ب) نیم کروی (ج) سهموی (د) مخروطی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.10.1.8]

در نمودار مربوط به ضربه زننده‌ی تخت و در 1 میلی ثانیه ابتدایی، نوساناتی دیده می‌شود. افت ناگهانی نمودار تاریخچه‌ی نیرو نشان دهنده شروع آسیب در ورق - می‌باشد [8]. ضربه زننده‌ی تخت به دلیل هندسه‌ای که دارد نمی‌تواند درون قطعه نفوذ کند و در همان ابتدای برخورد نیروی زیادی را به ورق وارد می‌کند. در نتیجه در همان نقطه برخورد، در رزین ترک ایجاد می‌گردد. همین ترک‌ها باعث کاهش مقاومت موضعی ورق و کاهش محسوس نمودار نیرو-زمان است.

از روی نمودار نیرو-زمان و استفاده از رابطه (1)، شتاب ضربه زننده، $a(t)$ بدست می‌آید:

$$F(t) = ma(t) \tag{1}$$

که در آن m جرم ضربه زننده است. برای به دست آوردن رابطه سرعت-زمان می‌توان از رابطه (2) استفاده کرد.

$$V(t) = V_o - \int a(t)dt \tag{2}$$

V_o سرعت پرتابه در لحظه برخورد است. با انتگرالگیری مجدد از رابطه (2) می‌توان رابطه جابجایی بر حسب زمان ضربه زننده را استخراج نمود. طبق رابطه (3) داریم:

$$\delta(t) = \int V(t)dt \tag{3}$$

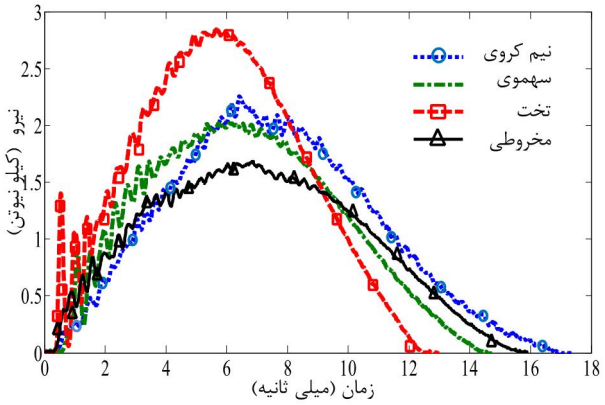
اگر از نفوذ ضربه زننده درون قطعه صرف نظر نماییم، می‌توان جابجایی ضربه زننده را معادل جابجایی ورق قرار دهیم. پس از استخراج رابطه جابجایی، می‌توان مقادیر بیشینه‌ی جابجایی برای ضربه زننده‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه نمود (شکل 4). هرچه سر ضربه زننده پهن‌تر شود، مقدار جابجایی کاهش می‌یابد. در نتیجه همانطور که مشاهده می‌شود، جابجایی ضربه زننده‌ی مخروطی از همه بیشتر و جابجایی ضربه زننده‌ی تخت از همه کم‌تر است.

انرژی جذب شده توسط ورق عبارت است از مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی که با انتگرالگیری به دست می‌آید. شکل 5 مقایسه مقادیر انرژی جذب شده توسط ورق برای چهار نوع ضربه زننده را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که انرژی جذب شده ورق به وسیله ضربه زننده‌ی مخروطی بیشترین و برای تخت کمترین می‌باشد. در اینجا نیز هرچه سر ضربه زننده پهن‌تر شود، انرژی جذب شده ورق نیز کاهش می‌یابد.

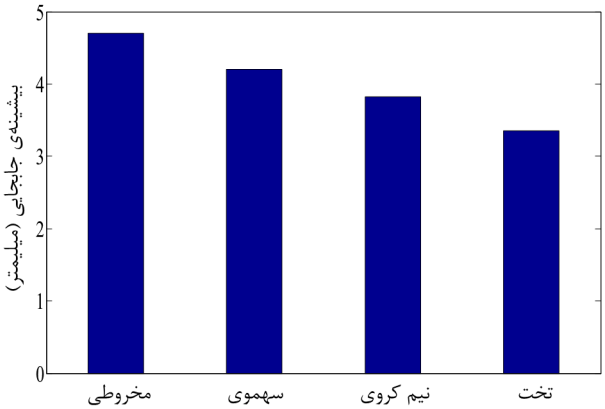
شکل 6 تصاویر نواحی آسیب و مساحت آن را برای هر کدام از ضربه زننده‌ها نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مساحت ناحیه آسیب زننده مخروطی 315، سهموی 284 و نیم کروی 241 میلیمتر مربع می‌باشد. ضربه زننده‌ی تخت هیچگونه مرز آسیب مشخصی ندارد و نمی‌توان مساحت آن را اندازه‌گیری نمود. این مطلب در مرجع [14] نیز بیان شده است. مساحت بیشتر ناحیه آسیب ایجاد شده توسط ضربه زننده‌ی مخروطی به این علت است که این ضربه زننده به دلیل سر تیز خود بیشتر درون کامپوزیت نفوذ می‌کند و همین نفوذ بیشتر باعث ایجاد ترک بین لایه‌ای بیشتر می‌شود. همچنین به دلیل نفوذ بیشتر و خمش بیشتر ورق در اثر ضربه زننده‌ی مخروطی، آسیب ناشی از خمشی که در پشت کامپوزیت ایجاد می‌شود نیز افزایش می‌یابد. این عوامل در مجموع می‌تواند باعث ایجاد ناحیه آسیب بزرگتر برای ضربه زننده‌ی مخروطی گردد. این روند برای ضربه زننده‌های سهموی و نیم کروی نیز حاکم است. بدین معنی که ضربه زننده‌ی تیزتر دارای نفوذ بیشتر و در نتیجه آسیب بیشتر می‌باشد. میزان نفوذ ضربه زننده‌ی تخت درون ورق صفر، و پس از برخورد به سطح قطعه از آن جدا می‌شود. تنها آسیب‌هایی که در ورق ایجاد می‌گردد، ترک‌های ماتریسی است که در رو و پشت قطعه ایجاد می‌گردد. ترک‌های روی قطعه به دلیل نیروی وارده از طرف ضربه زننده در نقطه برخورد است و ترک‌های پشت قطعه به دلیل خمش ناشی از برخورد می‌باشد. همانطور که در شکل 6 مشاهده می‌شود، ترک‌ها از ناحیه برخورد شروع، و به سمت اطراف گسترش می‌یابند و دارای ناحیه آسیب مشخصی نمی‌باشند. مشاهدات آسیب و خرابی در قطعات به اینگونه بوده است که یک منبع نور قوی در پشت قطعه قرار داده می‌شود و در نتیجه می‌توان آسیب رخ داده درون قطعات را تا حدودی با چشم مشاهده نمود.

4- اثر دما

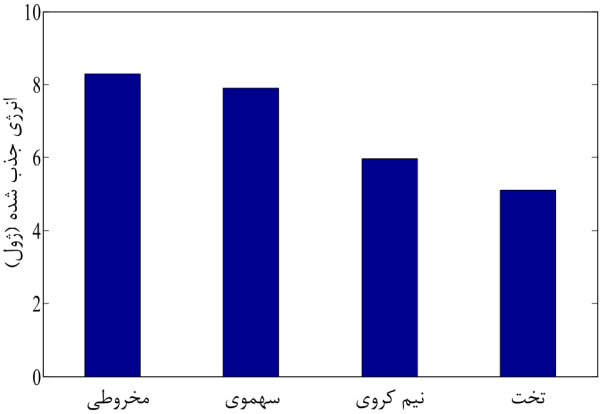
در این بخش اثر تغییرات دما روی پاسخ کامپوزیت در مقابل ضربه سرعت کم بررسی می‌گردد. سازه‌های کامپوزیتی در شرایط دمایی متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هواپیماها، خودروها و.... ممکن است در دماهای بالا و یا پایین کار کنند، بنابراین شناسایی رفتار کامپوزیت در دماهای مختلف اهمیت خود را نشان می‌دهد.



شکل 3 مقایسه نمودار نیرو-زمان تجربی چهار نوع ضربه زننده

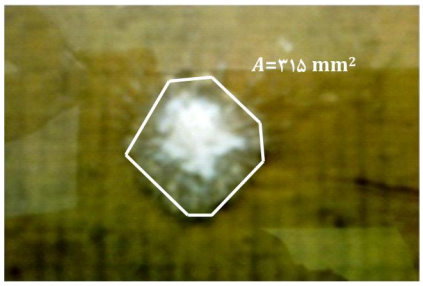


شکل 4 بیشینه‌ی جابجایی صفحه کامپوزیتی ناشی از ضربه زننده‌های مختلف



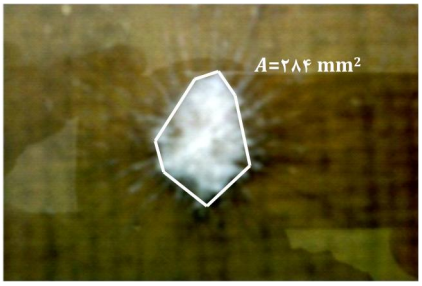
شکل 5 انرژی جذب شده صفحه کامپوزیتی ناشی از ضربه زننده‌های مختلف

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.10.1.8]

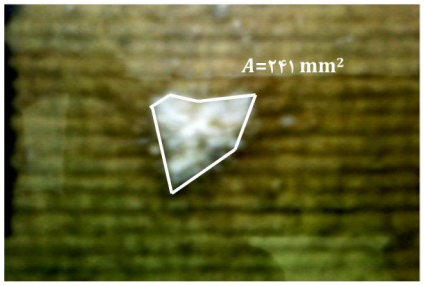


(الف)

(ب)



(ج)



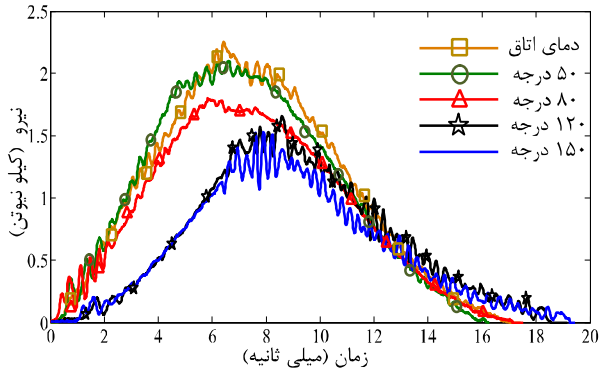
(د)

شکل 6 آسیب ایجاد شده در صفحه کامپوزیتی در اثر ضربه زننده‌های مختلف: (الف) مخروطی (ب) تخت (ج) سهموی (د)نیم‌کروی

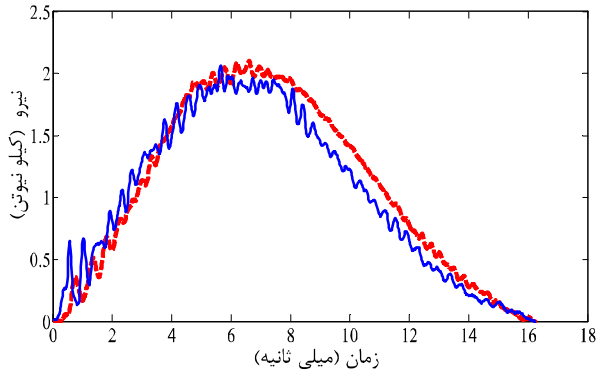
دماهای انتخابی عبارتند از: دمای اتاق، 50، 80، 120 و 150 درجه سانتیگراد. گرم کردن کامپوزیت‌ها به وسیله کوره‌ای که در دستگاه موجود است انجام می‌شود. اندازه‌گیری دمای قطعات هم به وسیله دما سنج داخل کوره و هم به وسیله یک سنسور دمای PT100 که بر روی قطعه نصب می‌شود انجام شده است. ضخامت تمامی قطعات کامپوزیتی 3 میلیمتر و ابعاد آن‌ها 120×120 میلیمتر می‌باشد.

جرم ضربه زننده‌ها 7 کیلوگرم است و از ارتفاع 10 سانتیمتری بر روی هدف پرتاب می‌شود، در نتیجه انرژی ضربه برای هر 4 نوع ضربه زننده تقریبا 6/87 ژول خواهد بود. برای انجام آزمایش‌ها، از ضربه زننده‌ی نیم کروی استفاده شده است.

در شکل 7 مقایسه نمودارهای نیرو-زمان برای تمامی دماها آورده شده است. جهت تایید صحت و اطمینان از نتایج آزمایشات، نمودار نیرو-زمان برای دمای 50 درجه سانتیگراد و برای دو آزمایش مشابه در شکل 8 آورده شده است.



شکل 7 نمودار نیرو-زمان در دماهای مختلف و انرژی ضربه 6/87 ژول

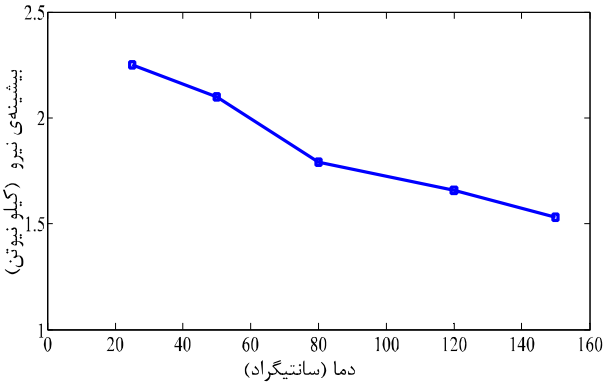


شکل 8 مقایسه نمودار نیرو-زمان ورق به ضخامت 3 میلیمتر برای دو آزمایش یکسان در دمای 50 درجه سانتیگراد و انرژی ضربه 6/87 ژول

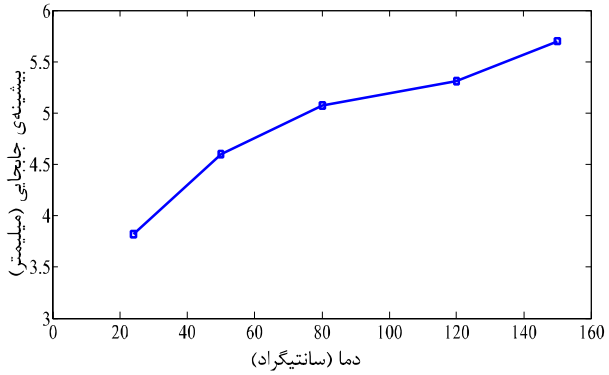
همانطور که مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی نیروی برخورد، زمان برخورد و همچنین روند هر دو نمودار با یکدیگر یکسان است. به همین خاطر می‌توان نتیجه گرفت که تکرارپذیری آزمایشات قابل قبول است. شکل 9 تغییرات بیشینه‌ی نیروی برخورد بر حسب دما را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش دما، مقدار بیشینه‌ی نیروی برخورد به تدریج کاهش می‌یابد. کاهش نیروی برخورد به این علت است که با افزایش دما، سفتی ورق کاهش می‌یابد و ورق نسبت به دماهای پایین‌تر رفتار نرمتری از خود نشان می‌دهد. کاهش سفتی ورق با افزایش دما در مقاله صالحی خوجین و همکاران [9] نیز دیده می‌شود. از دمای اتاق تا دمای 80 درجه سانتیگراد نمودار تقریبا خطی، و از دمای 80 تا 150 درجه سانتیگراد بازهم خطی ولی با شیب کمتر می‌باشد. این شکستگی و تغییر شیب را می‌توان اینگونه تفسیر کرد که در ابتدا و در دماهای پایین، افزایش دما تاثیر زیادی بر روی رفتار کامپوزیت دارد ولی با افزوده شدن بیشتر دما (دمای 80 درجه به بالا)، بالا رفتن دما تاثیر کمتری بر روی رفتار کامپوزیت خواهد داشت. تغییر رفتار کامپوزیت و تغییر شیب آن در نقطه 80 درجه سانتیگراد، نشان دهنده تاثیر نقطه *Tg* و نرم شدن کامپوزیت در این نقطه است. یعنی با گذر از این نقطه تغییر محسوس در رفتار ورق اتفاق می‌افتد.

شکل 10 بیانگر تغییرات بیشینه‌ی جابجایی بر حسب دما می‌باشد. ملاحظه می‌شود که با افزایش دما، بیشینه‌ی جابجایی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش دما، سفتی کامپوزیت کاهش می‌یابد و در نتیجه جابجایی و خمش صفحه افزایش خواهد یافت. شکل 11 نمودار انرژی جذب شده بر حسب دما را نشان می‌دهد. در دماهای پایین، ترک خوردن ماتریس سطح پشتی، خمش صفحه و تغییر شکل پلاستیک ماتریس مهمترین عوامل حاکم بر انرژی جذب شده می‌باشند. در دماهای پایین، سفتی صفحه بیشتر می‌باشد و مکانیزم حاکم بر انرژی جذب شده ترک خوردن صفحه پشتی و ماتریس می‌باشد.

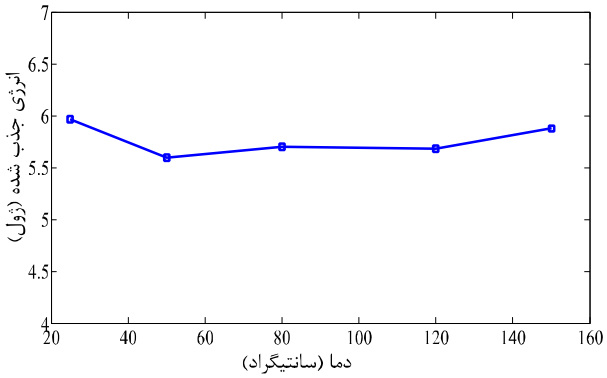
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.10.1.8]



شکل 9 تغییرات بیشینه‌ی نیروی ضربه در دماهای مختلف و انرژی ضربه 6/87 ژول



شکل 10 تغییرات بیشینه‌ی جابجایی در دماهای مختلف و انرژی ضربه 6/87 ژول



شکل 11 تغییرات انرژی جذب شده در دماهای مختلف و انرژی ضربه 6/87 ژول

با افزایش دما، ترک خوردن پشت صفحه کاهش می‌یابد و در نتیجه تعداد و اندازه ترک‌ها کاهش خواهد یافت. افزایش خمش صفحه و تغییر شکل پلاستیک ماتریس با افزایش دما، جبران کاهش تعداد و اندازه ترک‌های صفحه پشتی را می‌نماید. در نتیجه تعادل بین این عوامل باعث می‌شود که تغییرات انرژی جذب شده با دما زیاد قابل توجه نباشد.

همچنین نواحی آسیب در دماهای مختلف اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با افزایش دما، مساحت ناحیه آسیب دیده کامپوزیت به مقدار اندکی کاهش پیدا کرده است. در دماهای بالا به دلیل نرمتر شدن کامپوزیت، ضربه زننده به مقدار بیشتری درون قطعه نفوذ می‌کند. ولی به دلیل نرم شدن قطعه در دماهای بالا، نفوذ بیشتر، باعث ایجاد ترک بین لایه‌ای و یا ترک ماتریس بیشتر نخواهد شد. همچنین در دماهای بالا ترک ماتریس ناشی از خمش در پشت قطعه نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه می‌توان گفت با افزایش دما مساحت ناحیه آسیب دیده کاهش و میزان نفوذ ضربه زننده درون قطعه افزایش می‌یابد. همانطور که در نمودارهای نیرو-زمان مشاهده می‌گردد، نمودار نیرو-زمان دارای فراز و فرودهای متعددی می‌باشد. این فراز و فرودها را می‌توان اینگونه تفسیر کرد که با برخورد ضربه زننده به قطعه و شروع نفوذ در آن، نیرویی به ضربه زننده وارد می‌شود که توسط لودسل متصل به آن اندازه‌گیری می‌گردد. با شروع فرآیند برخورد و نفوذ ضربه زننده درون قطعه، نیروی برخورد نیز افزایش پیدا می‌کند. با ادامه نفوذ ضربه زننده درون قطعه، آسیب هایی شامل تورق، ترک ماتریس و پارگی الیاف در کامپوزیت به وجود می‌آید که باعث کاهش مقاومت قطعه می‌گردد. این کاهش مقاومت درون قطعه به افت ناگهانی نمودار نیرو منجر می‌شود. به بیان دیگر می‌توان گفت که با افزایش نفوذ، میزان نیرو افزایش می‌یابد تا آن جا که آسیبی درون کامپوزیت رخ دهد. به محض ایجاد آسیب، مقاومت قطعه کاهش می‌یابد و باعث کاهش ناگهانی نمودار نیرو نیز می‌گردد. بنابراین فراز و فرودهای اصلی مشاهده شده در نمودارهای نیرو-زمان را می‌توان به لحظات ایجاد آسیب در کامپوزیت مرتبط دانست.

شکل 12 نمودارهای نیرو-جابجایی برای دماهای مختلف را نشان می‌دهد. با استفاده از نمودار نیرو-زمان می‌توان نمودار نیرو-جابجایی را رسم نمود. به این ترتیب که ابتدا نمودار نیرو-زمان را بر جرم ضربه زننده تقسیم می‌کنیم تا نمودار شتاب-زمان بدست آید، سپس با دو بار انتگرالگیری از این نمودار می‌توان نمودار جابجایی-زمان را استخراج کرد. اکنون با داشتن نمودارهای نیرو-زمان و جابجایی-زمان می‌توان نمودار نیرو-جابجایی را بدست آورد. این نمودار مربوط به ضربه زننده می‌باشد. بدین معنا که جابجایی و نیروی وارده بر ضربه زننده را نشان می‌دهد و اطلاعاتی در مورد جابجایی قطعه کامپوزیتی نمی‌دهد. نمودار نیرو-جابجایی در ابتدا دارای یک قسمت نسبتا خطی می‌باشد که با افزایش میزان نفوذ، اندازه نیرو نیز افزایش می‌یابد. این قسمت در هر 5 نمودار شکل 12 به خوبی دیده می‌شود.

شیب قسمت خطی ابتدایی نمودار نیرو-جابجایی را می‌توان به عنوان سفتی خمشی ورق در نظر گرفت. همانطور که با دقت در نمودارهای شکل 12 مشاهده می‌شود که با افزایش دما، شیب قسمت خطی یعنی سفتی خمشی ورق کاهش می‌یابد. اندازه این شیب برای دمای اتاق، 50، 80، 120و 150 درجه سانتیگراد به ترتیب عبارتند از: 6/7، 4/6، 1/43، 1/25 و 0/9 کیلونیوتن بر میلیمتر. با افزایش دما و در نتیجه کاهش سفتی خمشی، قطعه رفتار نرمتری از خود نشان می‌دهد.

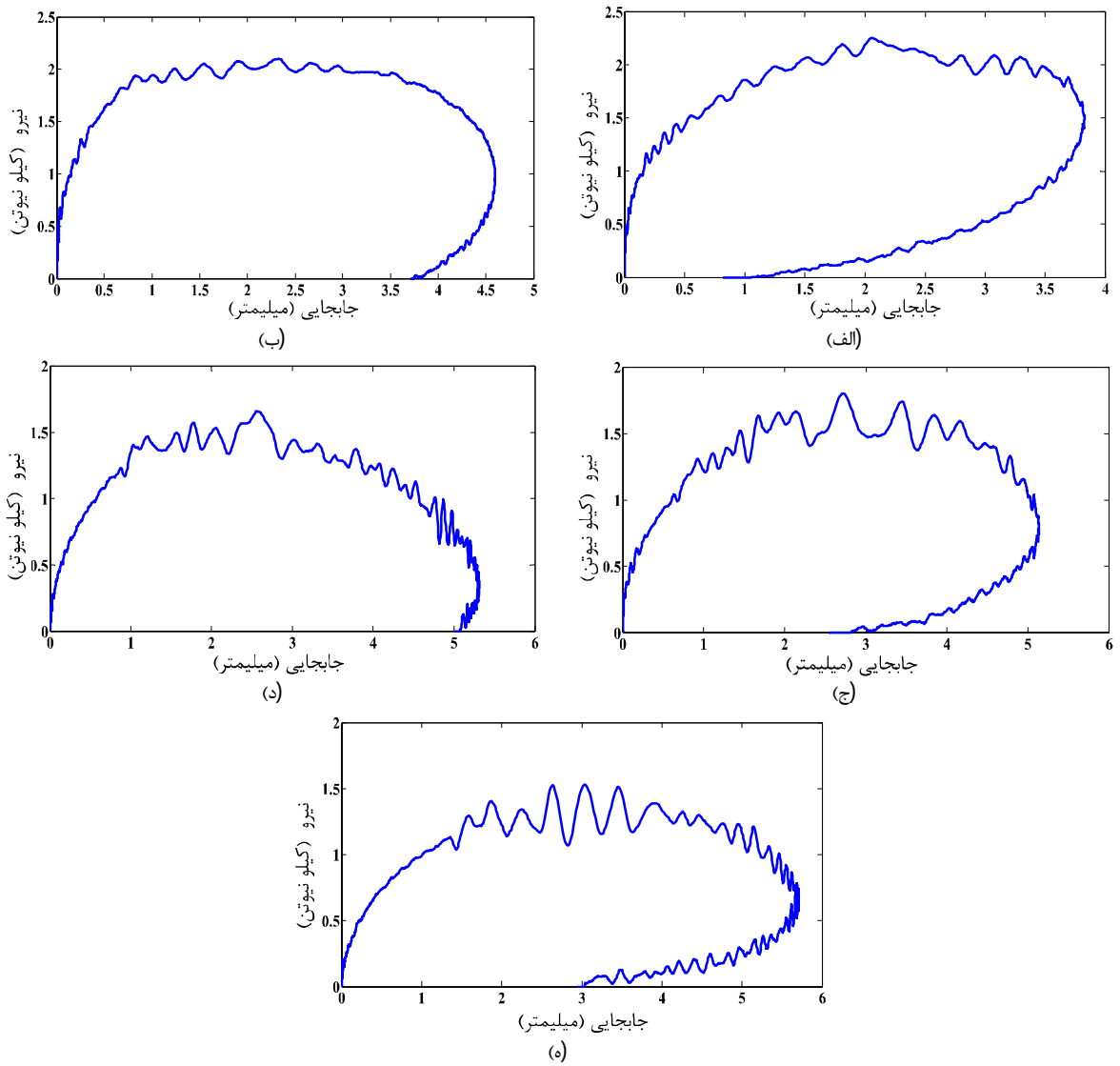
در قسمت بعدی نمودار، با افزایش نفوذ، اندازه نیرو تقریبا ثابت باقی می‌ماند. پس از این قسمت مرحله باربرداری آغاز می‌شود. در این مرحله با ثابت ماندن تقریبی میزان نفوذ، اندازه نیرو به تدریج کاهش می‌یابد. یعنی ضربه زننده دیگر درون قطعه نفوذ نمی‌کند و در حال جدا شدن از آن می‌باشد. سپس در مرحله آخر، ضربه زننده شروع به جدا شدن از قطعه می‌کند. نیرو تا آنجا کاهش پیدا می‌کند تا ضربه زننده از قطعه جدا شود و در نتیجه اندازه نیرو به صفر برسد.

5- نتیجه گیری

در مورد اثر شکل ضربه زننده:

- بیشترین نیروی برخورد مربوط به ضربه زننده‌ی تخت و کمترین نیروی برخورد مربوط به ضربه زننده‌ی مخروطی می‌باشد.
- بیشترین زمان برخورد مربوط به ضربه زننده‌ی مخروطی و کمترین زمان مربوط به ضربه زننده‌ی تخت می‌باشد. به طور کلی هرچه سر ضربه زننده پهن‌تر باشد بیشینه‌ی نیروی برخورد آن بیشتر، و هر چه ضربه زننده تیزتر باشد زمان برخورد بیشتر است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.10.1.8]



شکل 12 نمودار نیرو-جابجایی نمونه با ضخامت 3 میلیمتر، انرژی ضربه 6/87 ژول (الف) دمای اتاق (ب) 50 درجه سانتیگراد (ج) 80 درجه سانتیگراد (د) 120 درجه سانتیگراد (ه) 150 درجه سانتیگراد

- جابجایی ضربه زننده‌ی مخروطی از همه بیشتر و جابجایی ضربه زننده‌ی تخت از همه کم‌تر می‌باشد. می‌توان گفت که هرچه سر ضربه زننده پهن‌تر باشد جابجایی آن کمتر، و هر چه ضربه زننده تیزتر باشد جابجایی آن بیشتر است.
- ضربه زننده‌ی مخروطی دارای بیشترین انرژی جذب شده و ضربه زننده‌ی تخت دارای کمترین انرژی جذب شده می‌باشد. به طور کلی هر چه ضربه زننده تیزتر باشد، مقدار انرژی جذب شده آن هم بیشتر خواهد بود.
- ضربه زننده‌ی مخروطی بیشترین مقدار نفوذ و آسیب به قطعه را دارد و ضربه زننده‌ی تخت کم‌ترین میزان آسیب را دارد.
- ضربه زننده‌ی تخت هیچگونه نفوذی درون قطعه نمی‌کند و تنها اثر آن ایجاد آسیب به صورت ترک‌های ماتریس ناشی از خمش در پشت نمونه است.

نتایج مربوط به تغییرات دما را نیز می‌توان به صورت زیر نوشت:

- با افزایش دما، مقدار بیشینه‌ی نیروی برخورد کاهش، و بیشینه‌ی جابجایی افزایش می‌یابد.
- تغییرات انرژی جذب شده صفحه کامپوزیتی با دما قابل توجه نمی‌باشد و از روند مشخصی پیروی نمی‌کند.
- اندازه ناحیه آسیب دیده در قطعات، با افزایش دما کاهش یافته است.
- با افزایش دما، شیب قسمت خطی نمودار نیرو-جابجایی که معرف سفتی خمشی ورق می‌باشد کاهش می‌یابد. اندازه این شیب برای دمای اتاق، 50، 80، 120 و 150 درجه سانتیگراد به ترتیب عبارتند از: 6/7، 4/6، 1/43، 1/25 و 0/9 کیلونیوتن بر میلیمتر. یعنی با افزایش دما، سفتی خمشی ورق کاهش می‌یابد و قطعه رفتار نرمتری از خود نشان می‌دهد.

6- مراجع

[1] R. Hosseinzadeh, M. M. Shokrieh, L. Lessard, Damage behavior of fibre reinforced composite plates subjected to drop weight impacts, *Composite Science and Technology,* Vol. 66, pp. 61-68, 2006.

[2] N. K. Naik, R. Ramasimaha, H. Arya, S. V. Prabhu, N. ShamaRao, Impact response and damage tolerance characteristics of glass-carbon/epoxy hybrid composite plates, *Composite: Part B,* Vol. 32, pp. 565-574, 2001.

[3] R. Paknejada, F. Ashenai Ghasemi, K. Malekzadeh Fard, Response of fully-clamped composite laminated plate subjected to low velocity impact using Galerkin method, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 1, pp. 45-50, 2014. (In Persian)

[4] F. Ashenai Ghasemi, K. Malekzadeh Fard, R. Paknejada, Response of cantilever fiber metal laminate (FML) plates using an analytical-numerical method, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 13, No. 3, pp. 57-67, 2013. (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.10.1.8]

[5] M. H. Pol, G. H. Liaghat, M. Sedighi, Analytical modeling of perforation projectile into glass/epoxy composites, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 12, No. 2, pp. 11-19, 2012. (In Persian)

[6] F. Mili, B. Necib, Impact behavior of cross-ply laminated composite plates under low velocities, *Composite Structures,* Vol. 51, pp. 237-244, 2001.

[7] W. J. Cantwell, Geometrical effects in the low velocity impact response of GFRP, *Composite Science and Technology,* 2006.

[8] G. A. Schoeppner, S. Abrate, Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates, *Composites: Part A,* Vol. 31, pp. 903-915, 2000.

[9] A. Salehi-Khojin, R. Bashirzadeh, M. Mahinfala, R. Nakhaei-Jazar, The role of temperature on impact properties of Kevlar/fiberglass composite laminates, *Composites: Part B,* Vol. 37, 2006.

[10] R. Park, J. Jang, Effect of laminate thickness on impact behavior of aramid fiber/vinylester composites, *Polymer Testing,* Vol. 22, pp. 939-946, 2003.

[11] M. Aktas, R. Karakuzu, Y. Arman, Compression-after impact behavior of laminated composite plates subjected to low velocity impact in high temperatures, *Composite Structures,* Vol. 89, pp. 77-82, 2009.

[12] Standard test method for impact resistance of flat, rigid plastic specimen by means of a falling dart (tup of falling mass), *ASTM International,* D 5628-96, 2001.

[13] S.J. Kim, N. S. Goo, Dynamic contact responses of laminated composite plates according to the impactor's shapes, *Composite Structures,* Vol. 65(1), pp. 83-90, 1997.

[14] T. Mitrevski, I. H. Marshall, R. Thomson, R. Jones, Low-velocity impacts on preloaded GFRP specimens with various impactor shapes, *Composite Structures*, Vol. 76, pp. 209-217, 2006.

[15] S. Naderi, *Effect of low-speed impact on fatigue behavior of composite laminates,* MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, K. N. T University, Tehran, 2010. (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.10.1.8]