



# Nondestructive Evaluation of Impact Area on Glass Fiber Reinforced Polymer Composite by Digital Image Correlation Method: Experimental Study

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Pakravan M.J.<sup>1</sup>,  
Farahani M.<sup>1\*</sup>,  
Barzegar A.<sup>1</sup>,  
Mahmoudi M.<sup>1</sup>

### How to cite this article

Pakravan M J, Farahani M, Barzegar A, Mahmoudi M. Nondestructive Evaluation of Impact Area on Glass Fiber Reinforced Polymer Composite by Digital Image Correlation Method: Experimental Study. Modares Mechanical Engineering. 2022; 22(03):179-190.

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

### \*Correspondence

Address: School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

mrfarahani@ut.ac.ir

### Article History

Received: July 06, 2021  
Accepted: October 25, 2021  
ePublished: January 14, 2022

## ABSTRACT

The use of non-destructive tests on composite materials to inspect, identify, and observe defects to locate discontinuities or defects has received considerable attention in recent years. Among the existing methods, the use of a non-contact digital image overlay system for troubleshooting composites has been considered because of its advantages. In this research, using the digital image overlay method, the shape, position, and area of the failure area in six-layer glass/epoxy samples with impact damage with different energies under different loads have been investigated. Five composite specimens with impact energies of 5, 10, 20, 30, and 40 joules were tested. At an energy of 5 joules, the damage to the piece was very small, and at an energy of 40 joules, the amount of damage to the piece was such that the bullet got stuck inside the piece and the impact site remained as a hole in the piece. The areas obtained for the impact area in the strain contours at loads of 40% have values close to the actual area of damage. By comparing the area obtained from the strain contour at 40% load and the actual damage area, for the 10 joules, 20 joules, and 30-joule conditions, the difference in area is about 2.3%, about 2.5%, and 3.1%, respectively.

**Keywords** Composites, Digital Image Correlation, Damage Diagnosis, Impact Testing, Nondestructive Evaluation.

## CITATION LINKS

[1] Identification of Delamination Defects in Metal-Composite Shells ... [2] Investigation on the reinforcing effects of using nanoparticle on quasi-static loading ... [3] A cohesive model with a multi-stage softening behavior to predict fracture in nano composite joints. [4] Characterizing the elastic and plastic properties of the multilayered Al/Brass composite ... [5] Local zone wise elastic and plastic properties of electron beam welded Ti-6Al-4V alloy using digital image correlation technique... [6] Using digital image correlation for characterizing the elastic and plastic parameters ... [7] Structural health monitoring of adhesive joints under pure mode I loading using the electrical impedance measurement. [8] Structural health monitoring of defective single lap adhesive joints using graphene nanoplatelets. [9] Determination of damage evolution in CFRP subjected to cyclic loading using DIC. [10] Correlation between full-field measurements and numerical simulation results for multiple ... [11] Damage detection in composite materials using deflectometry, a full-field slope measurement technique. [12] Digital image correlation (DIC) for measurement of strains and displacements in coarse, low volume-fraction ... [13] On the Use of Acoustic Emission and Digital Image Correlation for Welded Joints Damage Characterization. [14] Determination of the properties of composite materials thanks to digital image correlation ... [15] Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs ... [16] Strength degradation and stress analysis of composite plates with circular, square and rectangular notches using ... [17] Feasibility of Digital Image Correlation for railroad tie inspection and ballast support assessment. [18] Detection of Delamination in Polymer Composites by Digital Image Correlation... [19] Evaluation of Damage in Composite Laminated Sheets with Circular Defects under Tensile Loading Using Digital Image ... [20] Experimental assessment of low velocity impact damage in flax fabrics ... [21] Damage evolution analysis of open-hole tensile laminated composites using a progress damage model ... [22] The behaviour of thermoplastic and thermoset carbon fibre composites subjected to low-velocity ... [23] Condition monitoring of crack extension in the reinforced ... [24] Evaluation of local constitutive properties of Al2024 friction stir-welded joints using ...

## ارزیابی غیرمخرب ناحیه عیب ناشی از ضربه در کامپوزیت پایه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه با روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال: بررسی تجربی

محمدجواد پاکروان

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

محمدرضا فراهانی\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

امین برزگر

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مهدی محمودی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### چکیده

استفاده از تست‌های غیرمخرب بر روی مواد کامپوزیتی برای بازرسی، شناسایی و مشاهده عیوب به منظور موقعیت‌یابی ناپیوستگی‌ها یا عیوب در طی سال‌ها اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در بین روش‌های موجود استفاده از سیستم غیرتماسی برهمنگاری تصاویر دیجیتال برای عیب‌یابی کامپوزیت‌ها به دلیل مزایای آن مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش با استفاده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال شکل، موقعیت و مساحت ناحیه خرابی در نمونه‌های شش لایه شیشه / اپوکسی دارای آسیب ضربه با انرژی‌های متفاوت تحت مقدار بارگذاری‌های مختلف بررسی شده است. پنج نمونه کامپوزیتی با انرژی ضربه ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ژول مورد آزمایش قرار گرفتند. در انرژی ۵ ژول، آسیب وارد شده به قطعه بسیار کم بوده است و در انرژی ۴۰ ژول میزان آسیب وارده به قطعه به نحوی بوده است که گلوله داخل قطعه‌گیر کرده و محل ضربه به‌صورت یک سوراخ در قطعه باقی مانده است. مساحت‌های به دست آمده برای ناحیه متأثر از ضربه در کانتورهای کرنش در بارگذاری ۴۰ درصد دارای مقادیر نزدیک به مساحت واقعی آسیب می‌باشند. با مقایسه مساحت به دست آمده از کانتور کرنش در بارگذاری ۴۰ درصد و مساحت واقعی آسیب، برای حالت ۱۰ ژول، ۲۰ ژول و ۳۰ ژول تفاوت مساحت‌های به دست آمده به ترتیب حدود ۲/۳ درصد، حدود ۲/۵ درصد و ۳/۱ درصد می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** کامپوزیت‌ها، برهمنگاری تصاویر دیجیتال، تشخیص آسیب، تست ضربه، ارزیابی غیرمخرب.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۳

\*نویسنده مسئول: mrfarahani@ut.ac.ir

### ۱- مقدمه

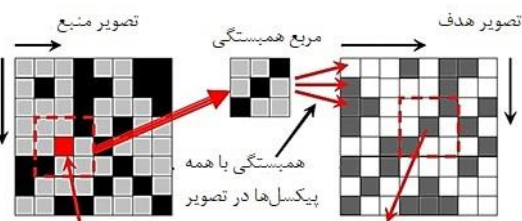
با وجود کاربرد فراوان و رو به رشد مواد کامپوزیتی در مصارف گوناگون صنعتی، سازه‌های کامپوزیتی بالاخص در صنایع مهم و حساس نظیر هوافضا و سازه‌های عمرانی باید کاملاً تحت بازرسی باشند. هرچند سازه‌های کامپوزیتی مزایای فراوانی دارند، لیکن به هنگام رخداد خرابی، تقریباً بدون نشانه و هشدار خاصی، به شکل فاجعه آمیزی دچار شکست می‌شوند. آسیب‌های ناشی از برخورد اجسام که منجر به خرابی‌هایی از نوع شکاف یا سوراخ می‌شوند و همچنین سوراخ‌کاری جهت مونتاژ کردن، گونه‌ای از عیوب در مواد

کامپوزیتی است که در صورت عدم انجام اقدامات موثر در حوزه تعمیرات و نگهداری، در سازه آسیب دیده گسترش یافته و می‌تواند منجر به از هم گسیختگی کامل سازه کامپوزیتی شود<sup>[1]</sup>. نظر به محدودیت‌های موجود در اجرای روش‌های معمول ارزیابی غیرمخرب، از قبیل عدم کارایی مناسب در شناسایی برخی عیوب به خصوص در مواد کامپوزیتی به دلیل ساختار پیچیده و غیرهمسانگرد، نیاز به روش‌های نوین بیش از پیش احساس می‌شود. به عنوان مثال لزوم امکان دسترسی مستقیم به ناحیه تحت بازرسی در روش‌های ارزیابی غیرمخرب و از آنجا که این امر تنها در زمان انجام عملیات نگهداری و تعمیرات با خارج شدن سازه از حالت عملیاتی امکان‌پذیر است، انجام بازرسی‌های مداوم و مستمر، مبتنی بر آزمون‌های غیرمخرب متداول از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود<sup>[2]</sup>. توسعه دوربین‌های دیجیتال پیچیده و تکنیک‌های پردازش تصویر، فناوری جدید اندازه‌گیری غیرتماسی به نام برهمنگاری تصاویر دیجیتال را بسیار توانمند ساخته است. این تکنیک روشی برای اندازه‌گیری تغییر شکل به صورت پیوسته می‌باشد، که قادر است مواد را تحت بارگذاری حرارتی، مکانیکی تحلیل کند<sup>[3]</sup>. این روش در بسیاری از زمینه‌ها مانند مهندسی عمران<sup>[4]</sup> مهندسی مکانیک<sup>[5]</sup> علم مواد<sup>[6,7]</sup> و بیومکانیک<sup>[8]</sup> کاربردی شده است. این روش عکس‌های گرفته شده در حین تست از نمونه را تحلیل می‌کند تا میزان جابجایی نمونه را اندازه‌گیری کند. وقتی جابجایی نقاط مختلف در نمونه مشخص گردید، امکان محاسبه کرنش، چرخش، برش یا هر تغییر شکل مرتبطی که کاربر در نظر دارد، میسر می‌شود. از میان روش‌های مختلف طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های مبتنی بر بازرسی، استفاده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال در سال‌های اخیر به خصوص در بازرسی سازه‌های کامپوزیتی، رشد چشمگیری داشته است. به طور خاص، با نظارت کامل سطح توسط روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال می‌توان توزیع کرنش را در سطح نمونه اندازه‌گیری کرد. در دهه گذشته، بسیاری از محققان برای اندازه‌گیری جابجایی سطح، کرنش و مطالعه مکانیزم تغییر شکل از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال استفاده کرده‌اند. ون و همکارانش<sup>[9]</sup> پیشنهاد روش محلی‌سازی حداقل مربعات برای بدست آوردن میدان کرنش قابل اعتماد پیشنهاد داد که در آن شرایط مرزی ناحیه سوراخ و منطقه ترک مورد بحث قرار گرفت. دیویور و همکارانش<sup>[10,11]</sup> تمرکز کرنش ناشی از دیلمینیشن مصنوعی و نقص فرآیند را از طریق برهمنگاری تصاویر دیجیتال شناسایی کردند. کاستیلو و همکارانش<sup>[12]</sup> امکان استفاده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال را برای اندازه‌گیری میدان‌های کرنش بر روی مواد پلیمری تقویت شده با فیبر مورد بررسی قرار دادند و مزیت‌ها و میزان خطا را با روش‌های قدیمی‌تر مقایسه کردند. علاوه بر این، برخی از محققان دیگر از این روش برای بررسی عملکرد مواد از طریق تغییر شکل استفاده کردند. شراما و همکاران<sup>[13]</sup> به منظور

نگاری دیجیتال یک فناوری بر پایه تصویر است، سیستم مختصاتی بر پایه پیکسل مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجایی که اغلب استفاده از یک پیکسل منفرد برای یافتن نقطه انطباق غیرممکن است، از یک ناحیه با چندین پیکسل استفاده می‌شود تا فرآیند انطباق انجام پذیرد. در این روش قبل و بعد تغییر شکل از نمونه، عکس گرفته می‌شود و به صورت دیجیتال ذخیره می‌شود. به منظور مقایسه بهتر، نمونه‌ها با اسپری سفید پوشش داده می‌شوند و بعد از خشک شدن، نقاط سیاه رنگ به صورت تصادفی روی نمونه‌ها ایجاد می‌شود. در اثر تغییر شکل نقطه‌های موجود بر روی سطح نمونه نیز جابجا می‌شوند. دو عکس از قبل و بعد از تغییر شکل برای مقایسه و همپوشانی مختصات گرفته می‌شود. سپس با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر و ارتباط بین عکس‌ها، جابجایی‌ها و مشتقات آنها به دست می‌آید. تابع برهمنگاری تصاویر دیجیتال به صورت ردگیری موقعیت الگوهای تعیین شده عکس اول، در عکس‌های بعدی و استخراج مختصات طول و عرض آنها است. ترتیب کار تابع برهمنگاری تصاویر دیجیتال برای ردگیری موقعیت الگوی عکس اول در عکس‌های بعدی نیز براساس تطابق میزان شدت نور خاکستری است. این ناحیه دارای یک توزیع منحصر به فرد از شدت نور است که بعد از فرآیند تغییر شکل، با یافتن ناحیه‌ای با شدت نور مشابه در تصویر بعد از تغییر شکل، جابجایی زیرمجموعه مذکور پیدا می‌شود. همچنین در این روش برای افزایش رزولوشن اندازه‌گیری مقادیر شدت نور برای هر پیکسل توسط توابع، درون‌یابی می‌شود تا بتوان جابجایی در گستره یک صدم پیکسل را نیز شناسایی نمود.

مطابق شکل ۱ به منظور محاسبه جابجایی نقطه نمونه P، یک محدوده مربعی به نام زیر مجموعه مرجع با ابعاد  $(2n + 1) \times (2n + 1)$  پیکسل و به مرکزیت P از تصویر مرجع انتخاب و برای ردگیری موقعیت متناظر آن در تصویر تغییر شکل یافته استفاده می‌شود.

دلیل انتخاب یک زیرمجموعه مربعی نسبت به یک پیکسل مشخص جهت انطباق این است که یک زیرمجموعه تنوع وسیعی در سطوح خاکستری دارد که آن را از دیگر زیرمجموعه‌ها مجزا می‌کند. بنابراین می‌توان به صورت اختصاصی در تصاویر تغییر شکل یافته جستجو شود. برای ارزیابی درجه تشابه بین



شکل ۱) نمایی از یک زیر مجموعه مربع در اطراف نقطه P در تصویر مرجع و تصویر تغییر شکل

بررسی خصوصیات آسیب خستگی در صفحات فلزی جوش خورده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال برای مشاهده هندسه ترک و تایید نتایج انتشار صوت استفاده کردند. لورین و همکارانش<sup>[14]</sup> از اندازه‌گیری میدان کامل با استفاده از برهمنگاری تصاویر دیجیتال برای تجزیه و تحلیل تست‌ها در ساختارهای کامپوزیتی آسیب دیده تحت بارگذاری کششی استفاده کرد، صفحات آسیب دیده با دیلمینیشن‌های ابتدایی تحت بار فشاری قرار گرفتند. کامینرو و همکارانش<sup>[15]</sup> از این روش برای نظارت بر کامپوزیت لمنیت‌ها با سوراخ باز استفاده کرد و سپس آسیب و عملکرد تعمیرات پچ چسبنده را تحت بارگذاری کششی بررسی کرد. خجایی و همکاران<sup>[16]</sup> تنزل استحکام و تنش را در صفحات کامپوزیتی دارای شکاف‌های دایره‌ای، مربعی و مستطیلی را با استفاده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال بررسی و اندازه‌گیری کردند. الکساندرو و کریستوفر<sup>[17]</sup> امکان سنجی روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال را برای بازرسی خطوط ریلی بررسی کردند. ویکتور و همکارانش<sup>[18]</sup> دیلمینیشن در کامپوزیت‌های پلیمری را توسط روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال بررسی کردند. پاکروان و فراهانی<sup>[19]</sup> آسیب دایره‌ای را در ورق‌های کامپوزیتی چند لایه توسط روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال مورد بررسی قرار دادند.

راما کریشن و همکاران<sup>[20]</sup> در پژوهشی به بررسی رفتار یک بیوکامپوزیت آسیب دیده در اثر برخورد با انرژی کم به کمک روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال پرداختند و نشان دادند که امکان تشخیص کرنش منطقه آسیب دیده و شروع رشد ترک توسط روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی وجود دارد. هان و همکاران<sup>[21]</sup> به ارائه یک مدل جدید برای بررسی مدهای شکست در کامپوزیت‌های دارای سوراخ باز و صحت‌سنجی با استفاده از روش‌های آکوستیک امیشن و برهمنگاری تصاویر دیجیتال پرداختند. لیو و همکاران<sup>[22]</sup> در تحقیقی به بررسی تاثیر ضربه روی کامپوزیت‌های الیاف کربن با پایه ماتریس پیک و اپکسی پرداختند و دریافتند که نوع ماتریس استفاده شده (ترموست یا ترموپلاست) در مساحت ناحیه آسیب ایجاد شده تاثیر بسیار کمی دارد.

علیرغم کاربردهای موفقیت‌آمیز این روش در اندازه‌گیری تغییر شکل سطح، عدم درک ویژگی‌های کرنش در پوسته‌های کامپوزیتی که دارای آسیب ضربه می‌باشند این مقاله در نظر دارد، با استفاده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال شکل، موقعیت و مساحت ناحیه خرابی در نمونه‌های شیشه/اپوکسی دارای آسیب ناشی از ضربه را تحت بارگذاری کششی در ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ بار مورد نیاز شکست برای نمونه دارای آسیب ضربه را ارزیابی کند.

## ۲- اصول تئوری حاکم بر روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال

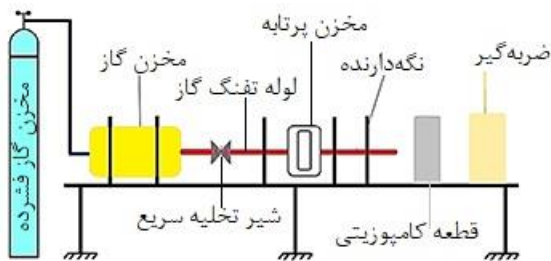
اساس کار روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال در حالت دو بعدی، ردگیری و یافتن نقاط یا پیکسل‌های با شدت نور واحد بین دو تصویر ثبت شده در قبل و بعد از تغییر شکل است. چون کرنش



شکل ۲) نمونه ساخته شده

### ۳-۲-آزمون ضربه

آزمون‌های ضربه با استفاده از تفنگ گاز انجام شد، شکل ۳ تفنگ گاز متشکل از قسمت‌های لوله تفنگ صاف و طولانی (به طول ۶ متر) با قطر داخلی ۸/۷ میلی‌متر، شیر بازکننده فشار سریع، واحد بارگیری پرتابه، مخزن گاز، یک مخزن گاز ۵۰۰ میلی‌لیتر برای هر گلوله، نگه‌دارنده هدف و ضربه‌گیر بود. پرتابه کروی فولادی سخت با قطر ۸/۷ میلی‌متر برای تمام آزمون‌های ضربه استفاده شد. پرتابه در این سامانه به دلیل فشار گاز در لوله تفنگ به جلو رانده شده و به نمونه برخورد می‌کند. اگر پرتابه دارای سرعت بالا باشد، از نمونه عبور کرده و توسط ضربه‌گیر متوقف می‌گردد. بر اثر ضربه پرتابه به نمونه کامپوزیتی عیوب مختلفی به وجود می‌آید که این عیوب در سطح انرژی پایین به صورت شکست زمینه بوده و در سطوح بالاتر از انرژی ضربه به صورت عیوب جدایش لایه‌ای، جدایش الیاف از زمینه، شکست الیاف و برخی مواقع نفوذ پرتابه به داخل نمونه کامپوزیتی ظاهر می‌گردند. عیوب هندسی مثل ایجاد فرورفتگی سطح نمونه در اثر ضربه و اعوجاج مدنظر نبوده‌اند که به صورت چشمی قابل شناسایی هستند؛ بنابراین مقدار فشار گاز به اندازه‌های مختلف تغییر داده شد که ساچمه از نمونه عبور نکرده و ناحیه ضربه قابل مشاهده نباشد.



شکل ۳) شماتیک آزمون‌های ضربه با استفاده از تفنگ گاز

زیرمجموعه مرجع و زیرمجموعه تغییر شکل یافته لازم است یک معیار همبستگی تعیین گردد که ضریب همبستگی نامیده می‌شود. با بدست آوردن اکستریم ضریب همبستگی موقعیت زیر مجموعه تغییر شکل یافته تعیین می‌شود. اختلاف در موقعیت مرکز زیرمجموعه مرجع و مرکز زیرمجموعه هدف منجر به بردار جابجایی P می‌شود [23]. از معادله (۱) به عنوان تابع همبستگی برای تطبیق استفاده می‌شود. جابجایی مرکز زیرمجموعه پیکسل‌ها هنگامی که بهترین تطابق شناسایی شد، ثبت می‌شود. میدان‌های کرنش از گرادیان میدان‌های جابجایی با استفاده از یک روش تمایز عددی مطابق با معادلات (۲) و (۳) به دست می‌آید [24].

$$C(u, v) \quad (1)$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_i) - \bar{f}][g(x'_i, y'_i) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_i) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [g(x'_i, y'_i) - \bar{g}]^2}}$$

$$x' = x + u_0 + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy \quad (2)$$

$$y' = y + v_0 + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy \quad (3)$$

در معادلات بالا،  $\bar{f}$  متوسط مقدار شدت زیرمجموعه مرجع،  $\bar{g}$  متوسط مقدار شدت از زیر مجموعه‌های تغییر شکل،  $m$  پهنای زیرمجموعه در پیکسل و  $u_0$  و  $v_0$  تغییر شکل از مرکز زیرمجموعه در جهت  $x$  و  $y$  است.

### ۳- روش تحقیق

#### ۳-۱- مواد و آماده سازی نمونه‌ها

در این پژوهش از نمونه‌های کامپوزیت شیشه / اپوکسی در شش لایه با چیدمان لایه‌ای  $[\pm 45/0/90]_s$  استفاده شده است که مشخصات مربوط به هر نمونه در جدول ۱ و شکل ۲ آورده شده است. برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از روش تزریق در خلاء استفاده شد. از اپوکسی EPR1۰۸۰ و هاردنر EPH1۰۸۰ به عنوان ماده زمینه و پارچه الیاف شیشه COLANAF۲۵۱ به عنوان تقویت کننده استفاده شده است. پس از اتمام فرایند ساخت، نمونه‌ها به مدت یک هفته در هوای آزاد و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار داده شده است. درصد حجمی الیاف برای هر نمونه  $60 \pm 3\%$  و ضخامت میانگین آن‌ها نیز ۲/۶۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. پس از آماده‌سازی صفحات کامپوزیتی، توسط اسپری رنگ آمیزی و الگوی تصادفی از خال‌های سیاه در زمینه سفید ایجاد شده است.

جدول ۱) ابعاد مربوط به نمونه‌ها

بخش	اندازه (میلی‌متر)
طول	۱۵۰
عرض	۵۰
ضخامت	۲
طول تب	۳۵
ضخامت تب	۲
ضخامت هر لایه	۰/۳۴
طول ناحیه مورد بازرسی	۸۰
عرض ناحیه مورد بازرسی	۵۰



بار کششی با نرخ جابجایی ثابت ۲ میلی متر بر دقیقه در دمای ۲۴ درجه سانتیگراد اعمال شده است. تصاویر برداری توسط دوربین فرکانس یک فریم بر ثانیه در قبل بارگذاری و در حین بارگذاری ضبط شده است، همچنین به طور همزمان مقادیر نیرو و جابجایی بطور پیوسته در حین آزمایش توسط دستگاه تست کشش اندازه‌گیری و ثبت شده است. بارگذاری در این آزمون غیرمخرب برای هر سه نمونه انجام شده است و مقدار آن معادل ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ بار مورد نیاز شکست برای نمونه دارای آسیب ضربه می‌باشد.

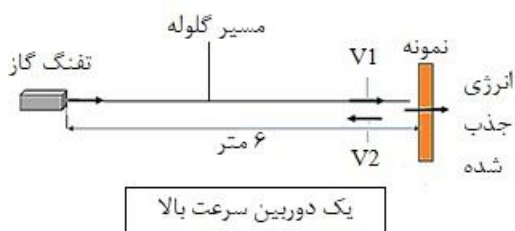
#### ۴- تحلیل نتایج و بحث

##### ۴-۱- بررسی میزان انرژی ضربه جذب شده در آزمون ضربه

به‌منظور ارزیابی میزان انرژی جذب شده ناشی از ضربه توسط کامپوزیت، تجهیزاتی مانند شکل ۵ فراهم شده است. گوله تفنگ گاز به سمت کامپوزیت شلیک شده و پس از برخورد گوله به سطح کامپوزیت، مقداری از انرژی گوله جذب شده و بقیه انرژی که به انرژی بازتابی شده شناخته می‌شود، موجب برگشت گوله از سطح کامپوزیت خواهد شد. با اندازه‌گیری میزان انرژی بازتابی شده (انرژی گوله پس از برخورد به سطح کامپوزیت) می‌توان به مقدار انرژی جذب شده توسط کامپوزیت دست پیدا کرد. تفاوت مقدار انرژی اولیه (انرژی ساچمه پس از خروج از دهانه تفنگ گاز) و انرژی بازتابی شده برابر مقدار انرژی جذب شده توسط کامپوزیت خواهد بود.

همان‌طور که در شکل ۵ قابل مشاهده است، گوله با سرعت ۷۱ از دهانه تفنگ گاز خارج شده و با سرعت ۷۲ از سطح کامپوزیت برمی‌گردد. با فرض یکسان بودن ارتفاع گوله نسبت به سطح زمین (تراز بودن لوله تفنگ گاز)، تفاوت انرژی جنبشی گوله برابر میزان انرژی جذب شده توسط کامپوزیت خواهد بود. توجه به این نکته ضروری است که سرعت گوله در هنگام خروج از لوله تفنگ گاز مشخص بوده و صرفاً نیاز است که سرعت گوله پس از برخورد با سطح کامپوزیت توسط دوربین اندازه‌گیری شود. همان‌طور که قبلاً اشاره گردید، میزان انرژی‌های ضربه وارده توسط تفنگ گاز ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ژول بوده است که مطابق توضیحات بالا، کلیه انرژی ضربه توسط کامپوزیت جذب نشده است. انرژی جذب شده از رابطه (۴) نیز قابل محاسبه می‌باشد:

$$E = \frac{1}{2}m(V_1^2 - V_2^2) \quad (4)$$



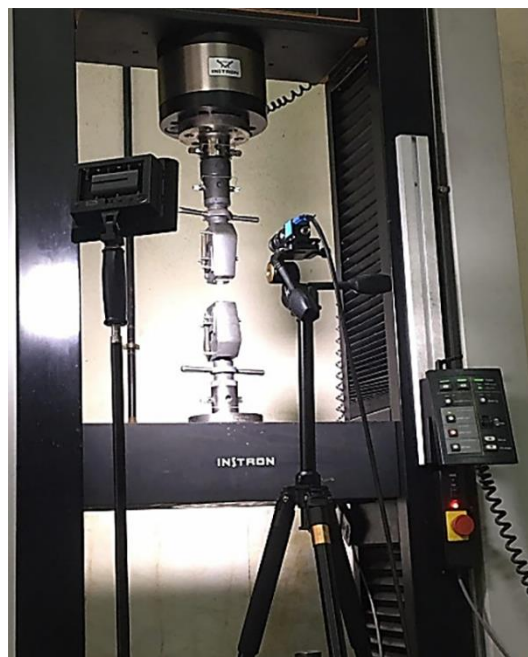
شکل ۵) شماتیک انرژی جذب شده، انرژی بازتابی شده و انرژی کل

##### ۳-۳- تجهیزات آزمایش

یک دستگاه تست کشش هیدرولیکی اینسترون R0000 با ظرفیت بار ۲ تن و با قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری بین ۰/۱ تا ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد. مقدار بار مورد نیاز برای شکست نمونه کاملاً سالم و بدون پارگی الیاف، مطابق با آزمون کشش، ۱/۵ تن اندازه‌گیری شده است. به‌صورت جداگانه برای هر نمونه مقدار بارگذاری در ۳ مقدار بار متفاوت (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰) به‌صورت درصدی از بار مورد نیاز برای شکست نمونه سالم  $100 \times \frac{F_{max}}{F}$  انجام شده است ( $F_1 = 20\% F$ ،  $F_2 = 30\% F$ ،  $F_3 = 40\% F$ ). همچنین مقدار نیرو و جابجایی به‌طور پیوسته در حین آزمایش اندازه‌گیری و ثبت شده است. بار کششی با نرخ جابجایی ثابت ۲ میلی‌متر بر دقیقه در دمای ۲۴ درجه سانتیگراد اعمال شده است. تجهیزات و نحوه نصب آن‌ها در شکل ۴ قابل مشاهده است.

##### ۴-۳- روش انجام آزمایش

از یک سیستم دو بعدی با یک دوربین CCD با رزولوشن ۵ مگاپیکسل استفاده شده است. در ابتدا دوربین در فاصله مناسبی در روبروی نمونه و محدوده اندازه‌گیری قرار داده شده است. سپس برای کالیبره کردن دوربین و بالا بردن دقت اندازه‌گیری و ثبت تصاویر با وضوح بیشتر از نرم‌افزار ای سی کیپر استفاده شده است. بعد از قرار دادن دوربین در فاصله مناسب، لنز دوربین در فکوس و وضوح مطلوبی تنظیم شده است. از یک منبع نور برای کاهش نویزهای نوری نسبت به محیط پیرامون استفاده شده است. تنظیمات مربوط به روشنایی، رنگ، زوم در نرم افزار ای سی کیپر انجام شده است. از چندین تراز که بر روی پایه نگه‌دارنده دوربین و همچنین قرار دادن تراز بر روی دوربین برای اطمینان از عمود بودن دوربین بر سطح نمونه‌های کامپوزیتی استفاده شده است.



شکل ۴) آزمون تست کشش

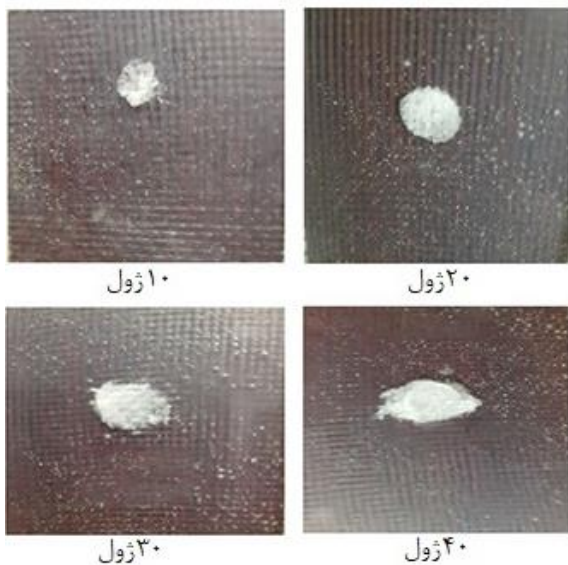
این محل‌ها مستعد رشد ترک بوده و نتایج به‌خوبی در روش استفاده از برهمنگاری تصاویر دیجیتال قابل مشاهده نمی‌باشد. در شکل ۷ محل برخورد گلوله به سطح کامپوزیت و اثر تخریب در مقادیر مختلف ضربه قابل مشاهده می‌باشد.

به منظور محاسبه مساحت ناحیه ناشی از ضربه در نمونه‌های کامپوزیتی قبل از بارگذاری، از روش شمارش پیکسل‌ها استفاده شده است. ابتدا به کمک خطکش کالیبراسیون در یک زوم مشخص (۲۵ برابر) اندازه یک پیکسل مربعی بر حسب میلی‌متر مربع به‌دست آورده شده است. پس از مشخص شدن اندازه یک پیکسل تعداد پیکسل‌های قرار گرفته در محل آسیب ضربه شمارش شده و در اندازه میلی‌متری یک پیکسل ضرب شده است. نتیجه حاصل بیانگر مساحت ناحیه برخورد ضربه می‌باشد. با استفاده از این روش مساحت ناحیه ضربه در ۱۰ ژول، ۲۰ ژول، ۳۰ ژول و ۴۰ ژول در جدول ۲ آورده شده است.

#### ۲-۴- بررسی کرنش طولی در راستای طول و عرض در نمونه‌های

##### مختلف به‌دست آمده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال

با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال، امکان مشاهده کانتور کرنش در سطح نمونه تحت بارگذاری وجود دارد. بنابراین از این روش برای مشاهده کانتور کرنش طولی در نمونه‌های کامپوزیتی دارای آسیب ضربه در مقادیر متفاوت استفاده شده است.



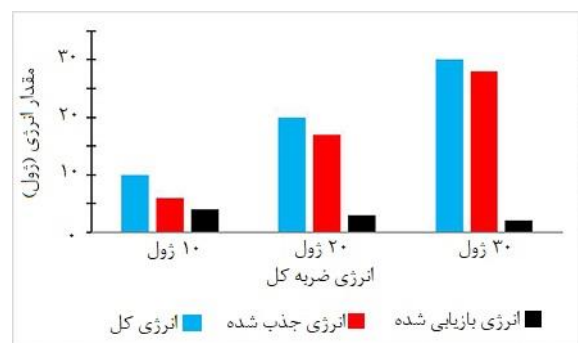
شکل ۷ اثر ضربه روی کامپوزیت الیاف شیشه به ازای مقادیر مختلف ضربه

##### جدول ۲ مساحت ناحیه ناشی از ضربه بر حسب میلی‌متر مربع

	انرژی ضربه ۱۰ ژول	انرژی ضربه ۲۰ ژول	انرژی ضربه ۳۰ ژول	انرژی ضربه ۴۰ ژول
مساحت ناحیه بر حسب میلی‌متر مربع	۱۱۶	۱۷۲	۲۲۵	۲۴۷

نتایج مربوط به کل انرژی (انرژی گلوله خارج‌شده از تفنگ گاز قبل از برخورد با سطح کامپوزیت)، انرژی جذب‌شده توسط کامپوزیت و انرژی بازبایی شده در شکل ۶ قابل مشاهده است.

همان‌طور که در شکل بالا قابل مشاهده است، با افزایش میزان انرژی ضربه واردشده به کامپوزیت، درصد انرژی بازبایی شده کاهش پیدا کرده است. دلیل این امر به خاطر تفاوت در مکانیزم‌های تخریب ایجادشده در کامپوزیت است. در سطح انرژی پایین (۱۰ ژول)، مکانیزم آسیب به کامپوزیت صرفاً لایه‌لایه شدن کامپوزیت است به‌نحوی که در اثر برخورد گلوله با انرژی ۱۰ ژول به سطح کامپوزیت صرفاً لایه‌های تشکیل‌دهنده کامپوزیت از هم جدا شده‌اند و آسیبی به ماتریس و یا الیاف نرسیده است. جدا شدن این بخش‌ها از یکدیگر، تأثیر کمتری نسبت به سایر مکانیزم‌های شکست دارد. با افزایش میزان نیرو از ۱۰ ژول به ۲۰ ژول، مکانیزم تخریب کامپوزیت از لایه‌لایه‌ای شدن به سمت مکانیزم تخریب آسیب ماتریس می‌رود. در این حالت به خاطر شدت ضربه، علاوه بر لایه‌لایه‌ای شدن پدیده‌ای دیگر به اسم آسیب ماتریس اتفاق می‌افتد که در آن ماتریس تشکیل‌دهنده کامپوزیت در اثر رشد ترک‌ها و به هم پیوستن میکروتخلخل‌ها، استحکام خود را از دست داده و قابلیت تحمل نیرو را نخواهد داشت. در این حالت با تمرکز روی محل ضربه امکان مشاهده ترک‌ها و همچنین میزان رشد آن‌ها در اثر ضربه قابل مشاهده خواهد بود. با افزایش نیرو از ۲۰ ژول به ۳۰ ژول، مکانیزم تخریب کامپوزیت از حالت لایه‌لایه‌ای شدن و آسیب ماتریس وارد فاز جدیدی به اسم آسیب الیاف خواهد شد. در این حالت علاوه بر لایه‌لایه‌ای شدن و آسیب به ماتریس و ایجاد ترک‌ها در ماتریس، الیاف نیز دچار آسیب شده و پاره می‌شوند. در این حالت کامپوزیت در پایین‌ترین استحکام خود قرار دارد. توجه به این نکته ضروری است که انرژی‌های ۵ ژول و ۴۰ ژول نیز تست گرفته شده‌اند. در انرژی ۵ ژول، آسیب واردشده به قطعه بسیار کم بوده (ماتریس دچار آسیب لایه‌لایه شدن نشده است) است. در انرژی ۴۰ ژول نیز میزان آسیب وارده به قطعه به نحوی بوده است که گلوله داخل قطعه گیر کرده و محل ضربه به‌صورت یک سوراخ در قطعه باقی مانده است. وجود این آسیب خود موجب تمرکز تنش در بخش‌های اطراف محل آسیب شده که



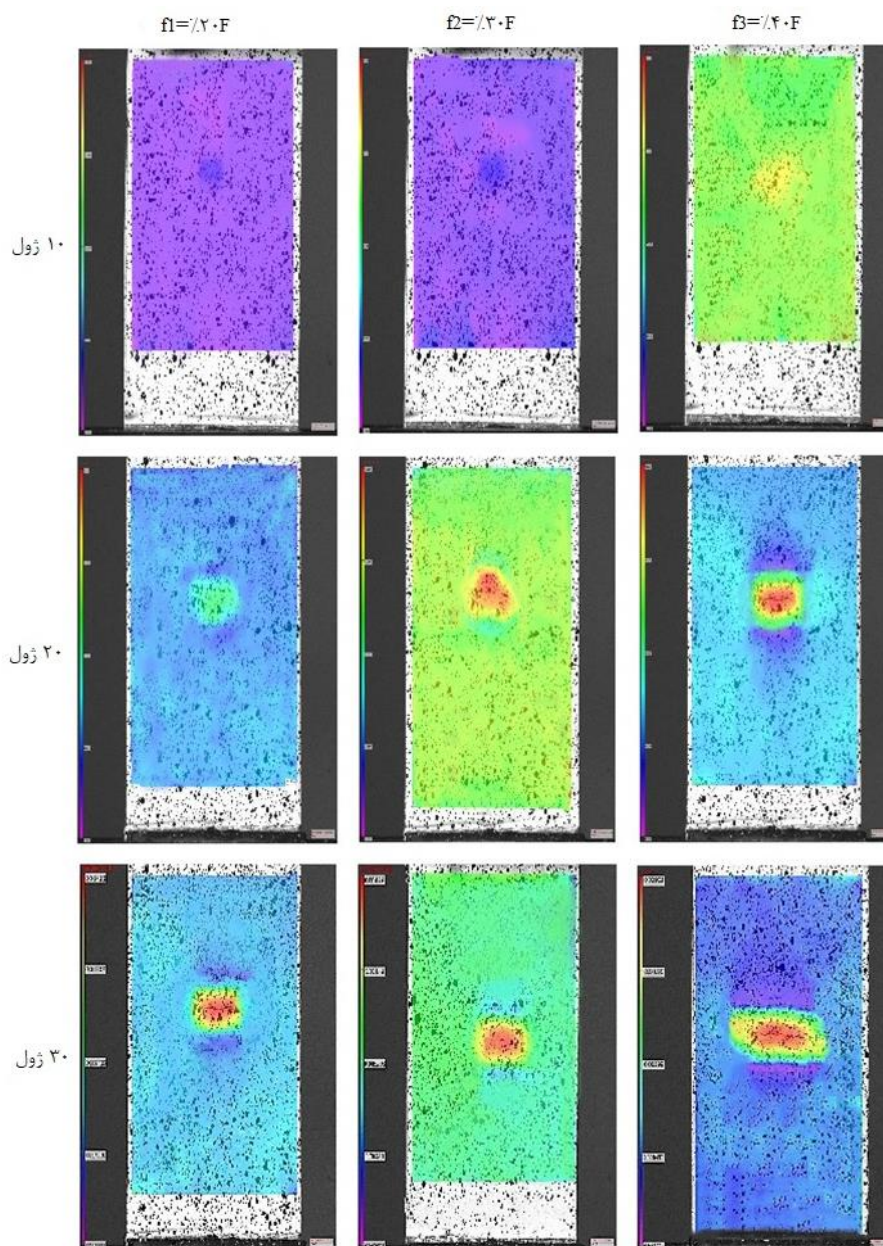
شکل ۶ مقادیر انرژی کل، انرژی جذب‌شده و انرژی بازبایی شده



ارتباط بین عکس‌ها، جابجایی‌ها و مشتقات آنها بدست می‌آید. کانتورهای کرنش طولی برای نمونه‌های مختلف دارای آسیب ضربه در بارگذاری‌های مختلف استخراج گردید. شکل ۸ کانتورهای کرنش طولی را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد.

برای استخراج مقدار مساحت ناحیه تمرکز کرنش که نشانگر محل ضربه است، از روش پردازش تصویر استفاده شده است. با مشاهده کانتورهای بدست آمده از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال مشخص است که مقادیر کرنش طولی به‌طور یکنواخت روی سطح نمونه توزیع نشده است. کرنش طولی برای هر نمونه در یک ناحیه مشخص متمرکز شده است که به‌طور قابل ملاحظه‌ای با مکان آسیب ضربه ارتباط دارد. برای بررسی دقیق‌تر ناحیه تمرکز کرنش در کانتورهای بدست آمده مقادیر کرنش طولی در امتداد یک خط

از یک نرم‌افزار پردازش تصویر که اساس کار آن تابع همبستگی تصاویر دیجیتال می‌باشد استفاده شده است، به این صورت که ردگیری موقعیت الگوهای تعیین شده عکس اول در عکس‌های بعدی و استخراج مختصات می‌باشد. ترتیب کار تابع همبستگی تصاویر دیجیتال جهت ردگیری موقعیت الگوی عکس اول در عکس‌های بعدی نیز بر اساس تطابق میزان شدت نور خاکستری می‌باشد. از آنجا که اغلب استفاده از یک پیکسل منفرد برای یافتن نقطه انطباق غیر ممکن است از یک ناحیه با چندین پیکسل استفاده شده است، تا فرآیند انطباق انجام پذیرد. این ناحیه (زیرمجموعه) دارای یک توزیع منحصر به فرد از شدت نور است که بعد از فرآیند تغییر شکل، با یافتن ناحیه‌ای با شدت نور مشابه در تصویر بعد از تغییر شکل، جابجایی زیرمجموعه مذکور پیدا خواهد شد. سپس با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر و



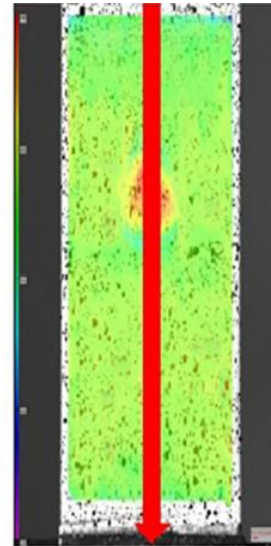
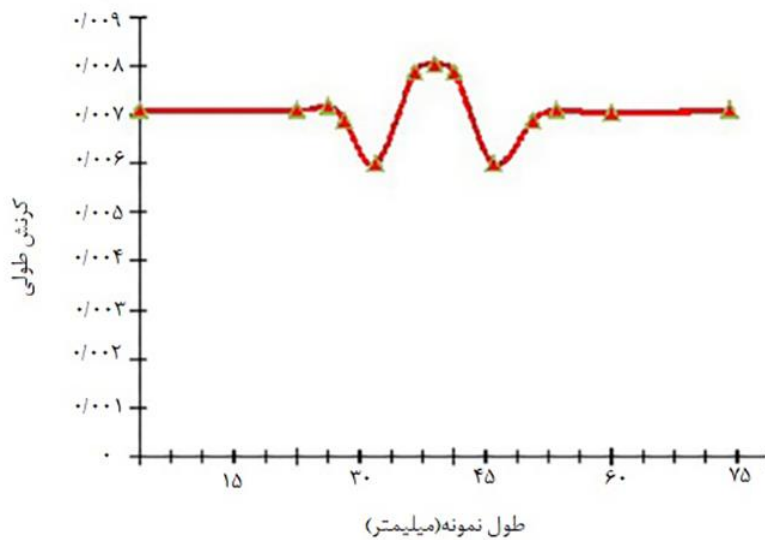
شکل ۸) کانتورهای کرنش طولی را برای نمونه‌های مختلف

در اثر برخورد گلوله به سطح کامپوزیتی، ناحیه‌ای از سطح کامپوزیت در اثر ضربه دچار آسیب شده که این آسیب می‌تواند بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت تأثیرات منفی داشته باشد. به دلیل این تأثیرات منفی بررسی مساحت ناحیه متأثر از ضربه امری مهم و ضروری است. به منظور بررسی ناحیه متأثر از ضربه ابتدا یک نمونه کامپوزیتی بدون عیب توسط دستگاه تست کشش، تحت نیروی کششی قرار گرفته و کانتور کرنش در راستای اعمال نیرو تحت بارگذاری ۲۰٪، ۳۰٪، و ۴۰٪ بار شکست، توسط روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال مطابق جدول ۳ به دست آمده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، سطح کانتور به صورت یکنواخت تحت اثر نیروهای مختلف تغییر طول پیدا می‌کند. این نمونه‌ها به عنوان مرجع برای مقایسه مقدار کرنش در هر نقطه با کرنش‌های به دست آمده از نمونه‌های آسیب دیده استفاده می‌شود. مقدار کرنش در قطعات آسیب دیده با مقدار کرنش در قطعه سالم

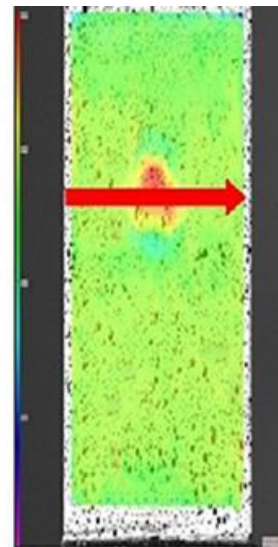
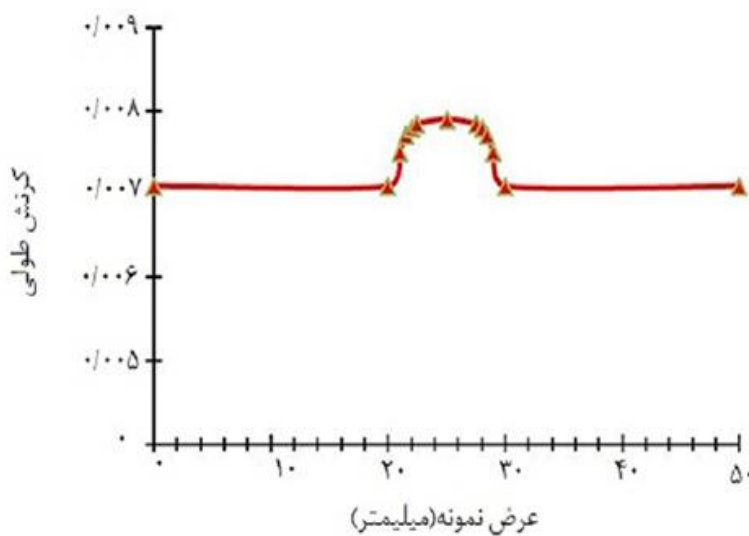
مستقیم در راستای طول و عرض نمونه بدست آورده شده است. انتخاب مسیر تحلیل به گونه‌ای بوده است که از محل آسیب ناشی از ضربه عبور کند، که با توجه به آن می‌توان اندازه ناحیه متأثر از ضربه با مقادیر مختلف را در بارگذاری‌های متفاوت اندازه‌گیری کرد. در شکل ۹ و ۱۰ به ترتیب مقادیر کرنش طولی در امتداد یک خط مستقیم در راستای طول نمونه و عرض برای نمونه دارای آسیب ضربه ۲۰ ژول در ۴۰٪ بار موردنیاز برای شکست نمونه سالم نشان داده شده است.

#### ۳-۴- مشاهده اثر اندازه کشش در آزمون DIC بر بزرگی تشخیص

در این بخش به صورت جداگانه برای هر نمونه مقدار بارگذاری در ۳ مقدار بار متفاوت ( $f_1$ ,  $f_2$  و  $f_3$ ) به صورت درصدی از بار موردنیاز برای شکست نمونه سالم ( $\frac{f_i}{f_p} \times 100$ ) انجام شده است. کانتورهای کرنش طولی را برای نمونه‌های دارای مقادیر متفاوت ضربه ۳۰ ژول تحت بارگذاری‌های مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

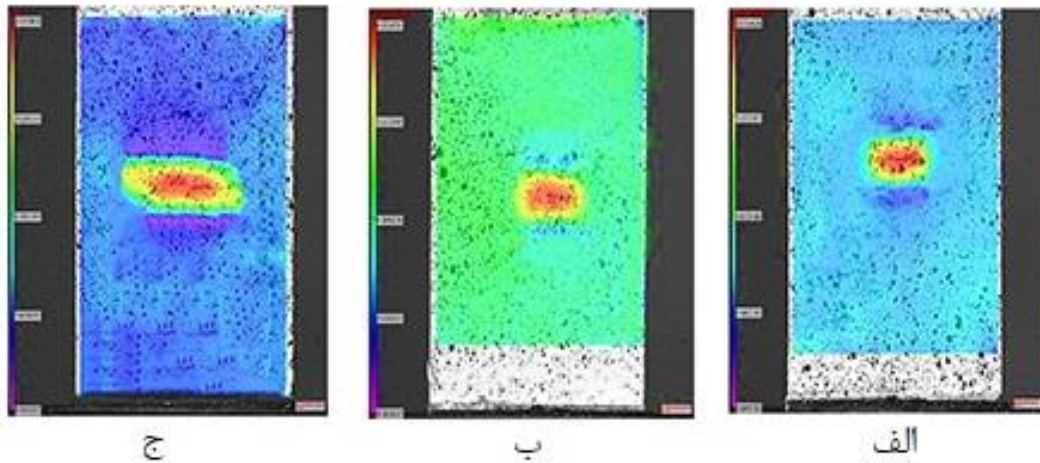


شکل ۹ (الف) مسیر تحلیل (ب) نمودار کرنش طولی - طول نمونه

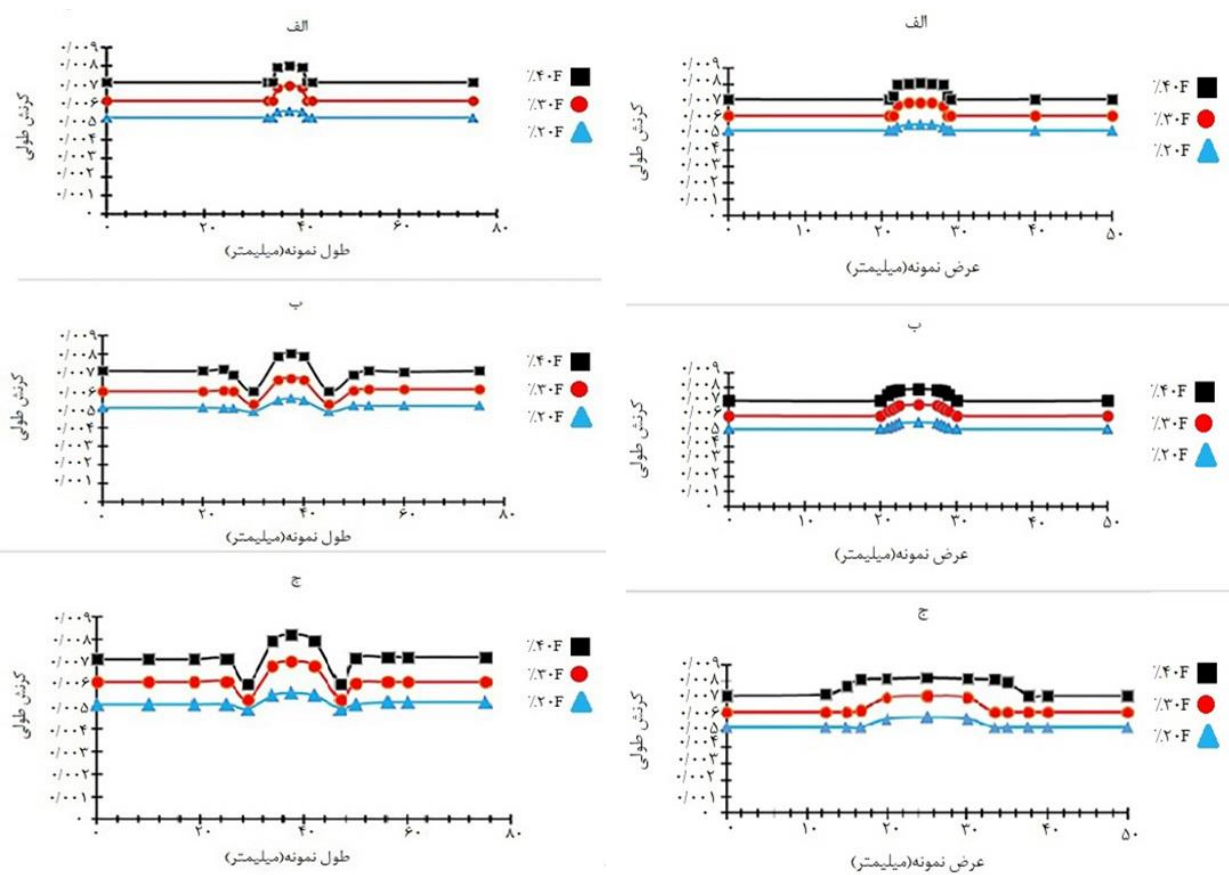


شکل ۱۰ (الف) مسیر تحلیل (ب) نمودار کرنش طولی - عرض نمونه





شکل ۱۱) کانتور کرنش طولی را برای نمونه‌های دارای آسیب ضربه ۳۰ ژول در بارگذاری‌های مختلف الف)  $f_1$ ، ب)  $f_2$ ، ج)  $f_3$

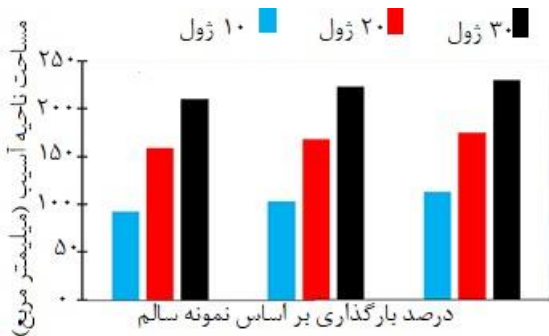


شکل ۱۲) مقادیر کرنش طولی اندازه‌گیری شده در راستای عرض نمونه برای شکل ۱۳) مقادیر کرنش طولی اندازه‌گیری شده در راستای طول نمونه برای نمونه‌های دارای آسیب ضربه الف) ۱۰ ژول، ب) ۲۰ ژول و ج) ۳۰ ژول در نمونه‌های دارای آسیب ضربه الف) ۱۰ ژول، ب) ۲۰ ژول و ج) ۳۰ ژول در بارگذاری‌های مختلف

مقایسه می‌شود و در صورتی که مقدار کرنش مقداری بیشتر یا کمتر از کرنش قطعه سالم داشته باشد، آن نقطه به عنوان نقطه متأثر از ضربه شناخته می‌شود. به همین منظور مقادیر کرنش طولی در راستای عرض نمونه و طول نمونه مطابق با روش گفته شده در بخش (۲-۴) اندازه‌گیری شده است و نتایج حاصله در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۳) مقادیر کرنش طولی در ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ بار مورد نیاز شکست نمونه سالم

	۲۰٪F	۳۰٪F	۴۰٪F
کرنش طولی نمونه سالم	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۷۲



شکل ۱۴) مساحت ناحیه متأثر از ضربه‌های مختلف تحت بارگذاری‌های مختلف

است. سپس مساحت‌های بدست آمده برای هر نمونه در بارگذاری‌های مختلف که از روی کانتورهای کرنش با مساحت‌های به دست آمده از روی نمونه‌های واقعی در حالت بدون بارگذاری مقایسه گردیده است و نتایج آن در شکل ۱۵ قابل مشاهده است. مساحت‌های به دست آمده برای ناحیه متأثر از ضربه در کانتورهای کرنش در بارگذاری ۴۰ درصد دارای مقادیر نزدیک به مساحت واقعی آسیب می‌باشند. با مقایسه مساحت به دست آمده از کانتور کرنش در بارگذاری ۴۰ درصد و مساحت واقعی آسیب، برای حالت ۱۰ ژول، ۲۰ ژول و ۳۰ ژول تفاوت مساحت‌های به دست آمده به ترتیب حدود ۳ درصد، حدود ۲/۵ درصد و ۲ درصد می‌باشد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به صورت غیر مخرب به بررسی آسیب ضربه در انرژی‌های ضربه مختلف بر روی ساختار کامپوزیتی به روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال پرداخته شده است. این روش با اندازه‌گیری کانتور کرنش در سطح نمونه تحت بارگذاری، قادر به شناسایی و ارزیابی محل ضربه در پوسته می‌باشد. وجود آسیب ناشی از ضربه باعث ایجاد تمرکز کرنش در نمونه تحت بارگذاری شده است و این نتیجه از روی کانتور کرنش طولی در سطح نمونه مشخص شده است. دو پارامتر نیرو کششی و انرژی ضربه در ارزیابی بهتر و دقیق‌تر از اهمیت زیادی برخوردار است. به صورتی که برای کمی سازی فرایند ارزیابی آسیب ناشی از ضربه باید هر دو پارامتر ذکر شده مورد توجه قرار گیرند. بر اساس نتایج حاصل از این



شکل ۱۵) مساحت ناحیه متأثر از ضربه‌های مختلف بدون بارگذاری

همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ قابل مشاهده است، پیک موجود نمودار نشان‌دهنده محل تمرکز کرنش می‌باشد. این محل تمرکز کرنش همان محل برخورد گلوله به سطح کامپوزیتی در آزمون ضربه به کمک تفنگ گاز است. بیشترین مقدار کرنش طولی اندازه‌گیری شده در محل آسیب ضربه توسط روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی مربوط به نمونه دارای آسیب ضربه با انرژی ۳۰ ژول و در بارگذاری ۴۰٪ بار موردنیاز برای شکست نمونه سالم برابر با ۰/۰۰۸۲ شده است. همچنین کمترین مقدار کرنش طولی اندازه‌گیری شده در محل آسیب مربوط به نمونه دارای آسیب ضربه با انرژی ۱۰ ژول و بارگذاری ۲۰٪ بار موردنیاز برای شکست نمونه سالم برابر با ۰/۰۰۵۵ شده است. محل‌های افت مقدار کرنش که در مرز محل ضربه خورده می‌باشد، به دلیل فرورفتن و تنش فشاری اطراف محل برخورد می‌باشد که این تنش فشاری موجب کاهش سطح تنش کششی اعمال شده از طرف دستگاه تست کشش شده و باعث افت مقدار کرنش در ناحیه مرز محل ضربه خورده خواهد شد. همچنین، با دور از شدن از محل برخورد گلوله به سطح کامپوزیت، مقدار کرنش‌ها شروع به کاهش می‌کنند به طوری که مقدار کرنش در فاصله‌ای به اندازه قطر گلوله از محل برخورد، بسیار نزدیک به کرنش در قطعه سالم خواهد بود. به بیان دیگر در مناطق دور از محل ضربه تمرکز کرنش بیشتر از کرنش برای نمونه سالم دیده نشد.

در اثر ضربه ۱۰ ژول، صرفاً تخریب لایه‌لایه‌ای شدن به صورت موضعی اتفاق می‌افتد در حالی که با افزایش مقدار انرژی ضربه، مکانیزم تخریب در محل ضربه تغییر کرده و لایه‌لایه‌ای شدن نیز در محل اطراف برخورد گلوله که انرژی کمتری هم دارند اتفاق می‌افتد. این پدیده موجب افزایش بیشتر ناحیه متأثر از ضربه در انرژی‌های ۲۰ ژول و ۳۰ ژول نسبت به ۱۰ ژول خواهد شد. همان‌طور که در شکل ۱۳ قابل مشاهده است، ناحیه متأثر از ضربه در حالت ضربه با انرژی ۲۰ ژول نسبت به انرژی ۳۰ ژول تفاوت زیادی ندارد. دلیل این امر را می‌توان تفاوت مکانیزم تخریب در کامپوزیت با افزایش انرژی از ۲۰ ژول به ۳۰ ژول دانست. با افزایش انرژی ضربه از ۲۰ ژول به ۳۰ ژول، مکانیزم تخریب از شکست ماتریس به پارگی الیاف تغییر می‌کند و این افزایش انرژی صرف پارگی الیاف می‌شود. این پارگی الیاف به دلیل اینکه در محل شکست ماتریس اتفاق می‌افتد باعث افزایش سطح ناحیه متأثر از ضربه نخواهد شد با بدست آوردن تعداد نقاطی که کرنش متفاوتی با مقدار کرنش نمونه سالم و یا بخش‌های دور از آسیب ضربه دارند، مساحت سطح متأثر از ضربه به دست می‌آید. در شکل ۱۴ مساحت ناحیه متأثر از ضربه قابل مشاهده است.

برای بررسی دقیق‌تر ناحیه آسیب ضربه، مقدار مساحت‌های اندازه‌گیری شده از روی کانتورهای کرنش طولی مربوط به ضربه‌هایی با انرژی مختلف در بارگذاری‌های متفاوت بدست آمده

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند، از مسئولان و کارشناسان مرکز پژوهش کاربردی جوش و آزمون‌های غیرمخرب دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران برای در اختیار قراردادن تجهیزات این پژوهش، کمال تشکر و قدردانی را بنمایند.

**تاییدیه اخلاقی:** محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و صحت نتایج آن نیز بر عهده آن‌ها است.

**تعارض منافع:** مقاله حال حاضر هیچ‌گونه تعارض منافی با اشخاص و سازمان‌های دیگر ندارد.

**سهم نویسندگان:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**منابع مالی:** منابع مالی این مقاله توسط نویسندگان تامین گردیده است.

### منابع

- 1- Ardebili A, Farahani M. Identification of Delamination Defects in Metal-Composite Shells Using Pulse Thermography. *Modares Mechanical Engineering*. 2020; 20 (9): 2303-2312
- 2- Hosseinlghab S, Farahani M, Safarabadi Farahani M. Investigation on the reinforcing effects of using nanoparticle on quasi-static loading of the glass-epoxy composites. *Modares Mechanical Engineering*. 2021; 21 (8): 541-549
- 3- Ghabezi, P.; Farahani, M. A cohesive model with a multi-stage softening behavior to predict fracture in nano composite joints. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019; 219: 106611.
- 4- Rahmatabadi D, Shahmirzaloo A, Farahani M, Tayyebi M, Hashemi R. Characterizing the elastic and plastic properties of the multilayered Al/Brass composite produced by ARB using DIC. *Materials Science and Engineering: A*. 2019; 753:70-78.
- 5- Saranath. KM, Ramji. M. Local zone wise elastic and plastic properties of electron beam welded Ti-6Al-4V alloy using digital image correlation technique: A comparative study between uniform stress and virtual fields method. *Optics and Lasers in Engineering*. 2015; 68: 222-234.
- 6- Rahmatabadi D., Shahmirzaloo A., Hashemi R., Farahani, M. Using digital image correlation for characterizing the elastic and plastic parameters of ultrafine-grained Al 1050 strips fabricated via accumulative roll bonding process. *Materials Research Express* 2019; 6(8): 086542.
- 7- Sam-Daliri O., Faller L. M., Farahani M., Zangl H. Structural health monitoring of adhesive joints under pure mode I loading using the electrical impedance measurement. *Engineering Fracture Mechanics*. 2021; 245: 107585.
- 8- Sam-Daliri O., Farahani M., Faller L. M., Zangl H. Structural health monitoring of defective single lap adhesive joints using graphene nanoplatelets. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020; 55: 119-130.
- 9- Venkatachalam S, Khaja Mohiddin S. M, Murthy H, Determination of damage evolution in CFRP subjected to cyclic loading using DIC. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 2018;1-14.
- 10- Wisnom M, Pierron F, Devivier C and Thompson D. Correlation between full-field measurements and

پژوهش و با توجه به تطابق قابل قبول نتایج حاصل از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال با ویژگی‌های مربوط به هر نمونه می‌توان این روش را به‌عنوان یک روش کارآمد در تشخیص و ارزیابی خرابی‌ها در سازه‌های کامپوزیتی استفاده نمود. برخی از نتایج مهم در این تحقیق به‌صورت زیر است:

- مساحت‌های به دست آمده برای ناحیه متأثر از ضربه در کانتورهای کرنش در بارگذاری ۴۰ درصد دارای مقادیر نزدیک به مساحت واقعی آسیب می‌باشند. با مقایسه مساحت به دست آمده از کانتور کرنش در بارگذاری ۴۰ درصد و مساحت واقعی آسیب، برای حالت ۱۰ ژول، ۲۰ ژول و ۳۰ ژول تفاوت مساحت‌های به دست آمده به ترتیب حدود ۳ درصد، حدود ۲/۵ درصد و ۲ درصد می‌باشد.
- با توجه به تفاوت مکانیزم‌های آسیب در انرژی‌های مختلف ضربه تغییرات درصد مساحت ناحیه آسیب‌دیده به‌صورت خطی رفتار نکرده است. به‌طوری‌که در سطح انرژی پایین (۱۰ ژول) فقط آسیب لایه‌لایه‌ای شدن رخ داده است اما در سطح بالاتر (انرژی ضربه ۲۰ ژول) آسیب لایه‌لایه‌ای شدن و آسیب ماتریس مشاهده شد و برای انرژی ضربه ۳۰ ژول آسیب لایه‌لایه‌ای شدن شدید، شکست ماتریس و آسیب به الیاف رخ داده است.
- بیشترین مقدار کرنش طولی اندازه‌گیری شده در محل آسیب ضربه توسط روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی مربوط به نمونه دارای آسیب ضربه با انرژی ۳۰ ژول و در بارگذاری ۴۰٪ بار مورد نیاز برای شکست نمونه سالم برابر با ۰/۰۰۸۲ شده است. همچنین کمترین مقدار کرنش طولی اندازه‌گیری شده در محل آسیب مربوط به نمونه دارای آسیب ضربه با انرژی ۱۰ ژول و بارگذاری ۲۰٪ بار مورد نیاز برای شکست نمونه سالم برابر با ۰/۰۰۵۵ شده است.
- توجه به این نکته ضروری است که انرژی‌های ۵ ژول و ۴۰ ژول نیز تست گرفته شده‌اند. در انرژی ۵ ژول، آسیب وارد شده به قطعه بسیار کم بوده (ماتریس دچار آسیب لایه‌لایه شدن نشده است) است. در انرژی ۴۰ ژول نیز میزان آسیب وارده به قطعه به نحوی بوده است که گلوله داخل قطعه گیر کرده و محل ضربه به‌صورت یک سوراخ در قطعه باقی مانده است. وجود این آسیب خود موجب تمرکز تنش در بخش‌های اطراف محل آسیب شده که این محل‌ها مستعد رشد ترک بوده و نتایج به‌خوبی در روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال قابل مشاهده نمی‌باشد.



adhesive joint by carbon nanotubes. *Welding Technology Review*. 2019; 91(12): 7-15.

24- Shahmirzaloo, A.; Farahani, M.; Farhang, M. Evaluation of local constitutive properties of Al2024 friction stir-welded joints using digital image correlation method. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2021, 56.7: 419-429.

numerical simulation results for multiple delamination composite specimens in bending. *Applied Mechanics and Materials*. 2010; 24:109-14.

11- Devivier C, Pierron F and Wisnom M. Damage detection in composite materials using deflectometry, a full-field slope measurement technique. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012; 43: 1650-66.

12- Del Rey Castillo, E., Allen, T., Henry, R., Griffith, M., Ingham, J., Digital image correlation (DIC) for measurement of strains and displacements in coarse, low volume-fraction FRP composites used in civilinfrastructure, *Composite Structures* 2019;212:43-57.

13- Shrama K, Al-Jumaili S, Pullin R, Clarke A, Evans S. On the Use of Acoustic Emission and Digital Image Correlation for Welded Joints Damage Characterization. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, Vol. 5, No. 2, 2019;381-389.

14- Laurin F, Charrier J-S, Lévêque D, Maire J-F, Mavel A and Nuñez P. Determination of the properties of composite materials thanks to digital image correlation measurements. *Procedia IUTAM*. 2012; 4: 106-15.

15- Caminero M, Lopez-Pedrosa M, Pinna C and Soutis C. Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs using digital image correlation. *Composites Part B: Engineering*. 2013.

16- Khechai A, Tati A, Guerira B, Guettala A, Mohite P.M. Strength degradation and stress analysis of composite plates with circular, square and rectangular notches using digital image correlation. *Composite Structures*. 2017; 699-715.

17- Sabato A, Niezrecki C. Feasibility of Digital Image Correlation for railroad tie inspection and ballast support assessment. *Measurement*. 2017; 103:93-105.

18- Szebenyi G, Hliva V. Detection of Delamination in Polymer Composites by Digital Image Correlation-Experimental Test. *Polymers*. 2019; 11(3), 523.

19- Pakravan M, Farahani M. Evaluation of Damage in Composite Laminated Sheets with Circular Defects under Tensile Loading Using Digital Image Correlation Method. *Modares Mechanical Engineering*. 2020; 20(4):1025-1031.

20- Ramakrishnan KR, Corn S, Le Moigne N, Ienny P, Slangen P. Experimental assessment of low velocity impact damage in flax fabrics reinforced biocomposites by coupled high-speed imaging and DIC analysis. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020;106137

21- Han W, Hu K, Shi Q, Zhu F. Damage evolution analysis of open-hole tensile laminated composites using a progress damage model verified by AE and DIC. *Composite Structures*. 2020; 11:112452.

22- Liu H, Liu J, Ding Y, Zheng J, Kong X, Zhou J, Harper L, Blackman BR, Kinloch AJ, Dear JP. The behaviour of thermoplastic and thermoset carbon fibre composites subjected to low-velocity and high-velocity impact. *Journal of Materials Science*. 2020; 55(33):15741-68.

23- Sam-daliri, O, Farahani M, Araei A. Condition monitoring of crack extension in the reinforced