



ارزیابی ناحیه عیب ناشی از ضربه در کامپوزیت پایه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن با دو روش رادیوگرافی و آزمون فراصوتی روبش C

سید عباس ارحام نمازی¹، نصرالله بنی مصطفی عرب^{2*}، امیر رفاهی اسکویی³، فرانچسکو آیمریک⁴

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
2-دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
4-استاد تمام، مهندسی مکانیک، دانشگاه کالیاری، کالیاری، ایتالیا
*تهران، صندوق پستی 16785136، n.arab@srttu.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 26 آذر 1396
پذیرش: 23 بهمن 1396
ارائه در سایت: 11 اسفند 1396
کلید واژگان:
کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن
آزمون غیرمخرب
رادیوگرافی
آزمون فراصوتی روبش C

چکیده

امروزه استفاده از مواد کامپوزیتی پایه پلیمری در صنایع مختلف به دلیل خواص مکانیکی خوب، سبکی و عایق بودن نسبت به حرارت و صوت و مقاومت به خوردگی با استقبال روزافزونی مواجه شده است. طی دو دهه اخیر کامپوزیت‌های پایه پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن دارای ساختار لایه‌ای کاربرد فراوانی در صنایع هوافضا و اتومبیل یافته‌اند. این مواد ممکن است در زمان تولید یا سرویس تحت ضربه قرار گرفته و ناحیه عیب کوچکی در آن‌ها به وجود آید. این عیب کوچک می‌تواند باعث کاهش خواص مکانیکی سازه شده و منجر به شکست آن گردد. از این رو لزوم بهره‌گیری از روشی جهت تشخیص عیوب در این مواد احساس می‌شود. در این مقاله نمونه کامپوزیتی پایه پلیمری از الیاف کربن در رزین پلی استر ساخته شد و تحت آزمون ضربه قرار گرفت. به منظور در نظر گرفتن تکرارپذیری در فرایند عیب یابی، نمونه تحت 4 آزمون متفاوت ضربه قرار گرفت و نواحی عیب با استفاده از روش‌های آزمون رادیوگرافی با مایع نافذ و آزمون فراصوتی بازتابی به روش غوطه‌وری روبش C، مورد ارزیابی قرار گرفت. تصویر حاصل از روش رادیوگرافی با استفاده از دستگاه اسکنر دیجیتال اسکن شد و همچنین تصویر حاصل از آزمون فراصوتی روبش C با در نظر گرفتن مقدار رزولوشن در آزمون کالیبره گردید. مساحت نواحی عیب با استفاده از نرم‌افزار ایمج جی به دست آمد. بررسی نتایج حاصل حاکی از توانایی دو روش یادشده در تشخیص و اندازه‌گیری نواحی عیب در نمونه کامپوزیتی است و روش روبش C ناحیه عیب را با دقت بیشتری می‌یابد.

Impact Area Assessment in the Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite using Radiography and Ultrasonic C-scan testing methods

Seyyed Abbas Arhamnamazi¹, Nasrollah Banimostafa Arab^{1*}, Amir Refahi Oskouei¹, Francesco Aymerich²

1- Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

2- Mechanical Engineering, University of Cagliari, Cagliari, Italy.

* P.O.B. 16785136, Tehran, Iran, n.arab@srttu.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 December 2017
Accepted 12 February 2018
Available Online 02 March 2018

Keywords:

Carbon Fibre Reinforced Polymer
Non-Destructive Testing
Radiography
Ultrasonic C-scan

ABSTRACT

Nowadays, the use of polymer composite materials in various industries has been increased due to their good mechanical properties, lightness, sound and thermal insulation and corrosion resistance. Over the past two decades, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) materials have been widely used in aerospace and automotive industries. These materials may be subjected to impact during manufacturing or service period and alsalm impact region may be produced in them. This small defect can reduce the mechanical properties of the structure and lead to its failure. Therefore, it is necessary to use a method for defect detection in these materials. In this study, a polymer composite sample made of carbon fiber in polyester resin was made and subjected to impact test. To consider the repeatability of the defect detection process, the sample was subjected to four various impact tests and the defect areas were evaluated using penetrant-enhanced X-ray radiography and ultrasound immersion pulse-echo C-scan. The image obtained from the penetrant-enhanced X-ray method was scanned using a digital scanner, and the image of the ultrasound C-scan test was calibrated, taking into account the step of scanning. The areas of the defect region were obtained using Imagej software. The results show that these methods are able to detect and measure the impact area in the composite sample and Ultrasonic C-scan method detect impact area more accurately.

کامپوزیت‌های پایه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن¹ با اقبال روزافزونی مواجه بوده است که دلیل این امر را می‌توان در ویژگی‌های خاص این

1- مقدمه
مواد کامپوزیتی در طیف وسیعی از صنایع از جمله هوا- فضا، کشتی سازی و خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این زمینه استفاده از

¹ Carbon Fibre Reinforced polymer (CFRP)

Please cite this article using:

S. A. Arhamnamazi, N. Banimostafa Arab, A. Refahi Oskouei, F. Aymerich, Impact Area Assessment in the Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite using Radiography and Ultrasonic C-scan testing methods, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 03, pp. 332-338, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.mme.modares.ac.ir

نفتنات کبالت⁶ به عنوان آغازکننده و شتاب‌دهنده مورد استفاده قرار گرفتند که به ترتیب از شرکت پراکسید ایران و نوبل⁷ تهیه گردیدند. نمونه مورد استفاده در این مطالعه در مؤسسه پلیمر و پتروشیمی ایران تولید گردید. صفحات کامپوزیت از الیاف کربن و رزین پلی‌استر و با استفاده از روش لایه‌چینی دستی⁸ در شرایط خلاء و در ابعاد 250×100×4 میلی‌متر ساخته شد.

2-2- آزمون ضربه

آزمون‌های ضربه با استفاده از تفنگ گاز انجام شد (شکل 1). تفنگ گاز متشکل از قسمت‌های لوله تفنگ صاف و طولانی (به طول 3 متر) با قطر داخلی 8.7 میلی‌متر، شیر بازکننده فشار سریع، واحد بارگیری پرتابه، مخزن گاز، یک مخزن گاز 500 میلی‌لیتر برای هر گلوله، نگهدارنده هدف و ضربه‌گیر بود. پرتابه کروی فولادی سخت با قطر 8.7 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. با توجه به مقاله ناصرزاده و ثابت [21] بین فشارهای مختلف گاز و سرعت‌های اولیه پرتابه (در نتیجه مقدار انرژی اولیه پرتابه) در محدوده کم فشار رابطه خطی وجود دارد. 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 و جز عیوب داخلی در کامپوزیت‌هاست. عیوب هندسی مثل ایجاد فرورفتگی سطح نمونه در اثر ضربه و اعوجاج مد نظر 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.

2-3- آزمون فراصوتی روبش C

در این مطالعه آزمون فراصوتی روبش C به روش غوطه‌وری و بازتابی برای ارزیابی نمونه ضربه دیده مورد استفاده قرار گرفت. نمونه با استفاده از یک تراگذار متمرکز (قطر 14 میلی‌متر و طول کانونی 27 میلی‌متر) با فرکانس مرکزی 1MHz خریداری شده از شرکت داپلر⁹ چین مورد آزمون قرار گرفت. سیستم آزمون فراصوت از پل روبروشی با رزولوشن 0.025 میلی‌متر، فرستنده/دریافت‌کننده امواج فراصوت مدل کرات کرامر¹⁰ با فرکانس 150MHz و یک اسیلوسکوپ دیجیتال مدل هیولت پاکارد¹¹ با فرکانس 500MHz تشکیل شده است که برای دریافت سیگنال فراصوت استفاده می‌شود. یک رایانه شخصی با نرم‌افزار لب ویو فرایند آزمون را کنترل می‌کند. شکل موج فراصوت در طول زمان روبش کامل در هر نقطه به صورت دیجیتالی‌شده در حافظه بافر اسیلوسکوپ ذخیره شده و هنگامی که بافر پر شد به هارد دیسک رایانه منتقل می‌شود.

شکل 2 چیدمان آزمون فراصوتی به روش غوطه‌وری و بازتابی را نشان می‌دهد. نمونه روی تکیه‌گاهی صاف در داخل مخزن آب قرار گرفته و زاویه پروب تنظیم می‌شود تا بیشترین دامنه اکوها مشاهده شود. این بازرسی طبق

کامپوزیت از جمله نسبت استحکام به وزن بالا، عایق حرارتی و صوتی، مقاومت در برابر خستگی، خوردگی کم و خواص مکانیکی بهتر در مقایسه با فلزات دانست [2,1]. در مراحل تولید یا سرویس مواد کامپوزیتی ممکن است عیوب مختلفی در نمونه ایجاد شود. به طور کلی عیب به هر نوع انحراف از ساختار ایده آل اطلاق می‌گردد. آسیب ناشی از ضربه یکی از عیوب رایج که ممکن است در تولید یا هنگام به کارگیری کامپوزیت ایجاد گردد [3]. از آنجا که ضربه علت اولیه لایه‌لایه‌شدگی¹ است، لازم است منطقه ضربه با استفاده از روش‌های غیرمخرب² پیش از تخریب کامپوزیت شناسایی شود.

مقالات بسیاری بر تشخیص آسیب ضربه با استفاده از روش‌های مختلف غیرمخرب متمرکز شده‌اند. مایرهورفر و همکاران [4]، یوسامنتیاجا و همکاران [5] و مئولا و کارلوماگنو [6] برای تعیین منطقه آسیب ضربه در نمونه‌های کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن از روش ترموگرافی استفاده نمودند. لیانگ و همکاران [7]، چنگ و همکاران [8] و کویاما و همکاران [9] از آزمون‌های جریان گردابی (ET)، رانثور و لامرینگ [10] و کاپریوتی و همکاران [11] از امواج هدایت شده و هاسیوتیسی و همکاران [12] و شن و همکاران [13] از آزمون فراصوتی روبش C برای تشخیص آسیب ضربه در مواد کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن استفاده کردند. اونو و همکاران [14]، آموروسو و همکاران [15] و چاندارانا و همکاران [16] از روش آکوستیک³ برای نظارت بر سلامت ساختمان در طی فرآیند تولید و زمان به کارگیری در شناسایی منطقه آسیب در نمونه‌های کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن استفاده کردند. در برخی از مقالات از دو یا چند روش برای مقایسه توانایی و دقت آن‌ها در تشخیص منطقه آسیب بهره گرفته شده است، برای مثال چانتول و همکاران [17] و راویکیان و همکاران [18] از آزمون فراصوتی روبش C و رادیوگرافی و چمبرز و همکاران [19] از روش آکوستیک و رادیوگرافی اشعه ایکس استفاده کردند. پیکزونکا و همکاران [20] از ترموگرافی ارتعاشی، شروگرافی و از آزمون روبروشی فراصوت C برای پیدا کردن محل آسیب ضربه بهره گرفتند.

در مقالات یاد شده نیاز به روشی احساس می‌شود که بتواند روش‌های آزمون غیرمخرب را به صورت کمی مقایسه کند. در راستای این هدف در این مطالعه نمونه‌ای از جنس کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن در رزین پلی‌استر مورد استفاده قرار گرفت. این نمونه تحت 4 آزمون ضربه قرار گرفته و نواحی عیب با استفاده از دو روش آزمون فراصوتی روبش C و رادیوگرافی با مایع نافذ شناسایی شده و مساحت و مرز عیوب ناشی از ضربه به دست آمد. بدین ترتیب نتایج دو روش آزمون غیرمخرب به کار گرفته شده به صورت کمی و دقیق قابل مقایسه شد. در پایان یکی از نواحی عیب برش خورده و با استفاده از تصویر میکروسکوپی مورد تحلیل قرار گرفت.

2- روش تحقیق

2-1- آماده سازی نمونه مورد آزمایش

در این تحقیق الیاف کربن بافته شده با چگالی سطحی 200g/m² به عنوان تقویت‌کننده از شرکت سازه‌گستر خریداری گردید. ماتریسی از رزین پلی‌استر غیراشباع⁴ با 40% وزنی استایرن به عنوان حلال با ویسکوزیته 6500 cP از شرکت صنعت شیمی از استان بوشهر تهیه شد. متیل اتیل کتون پراکسید⁵ و

⁶ Cobalt naphthenate

⁷ AKZO

⁸ Hand lay-up

⁹ Doppler

¹⁰ Krautkramer HIS2

¹¹ Hewlett Packard 54520A MHz

¹ Delamination

² Non-destructive Testing (NDT)

³ Acoustic Emission (AE)

⁴ BUSHPOL 751129

⁵ Methyl ethyl ketone peroxide

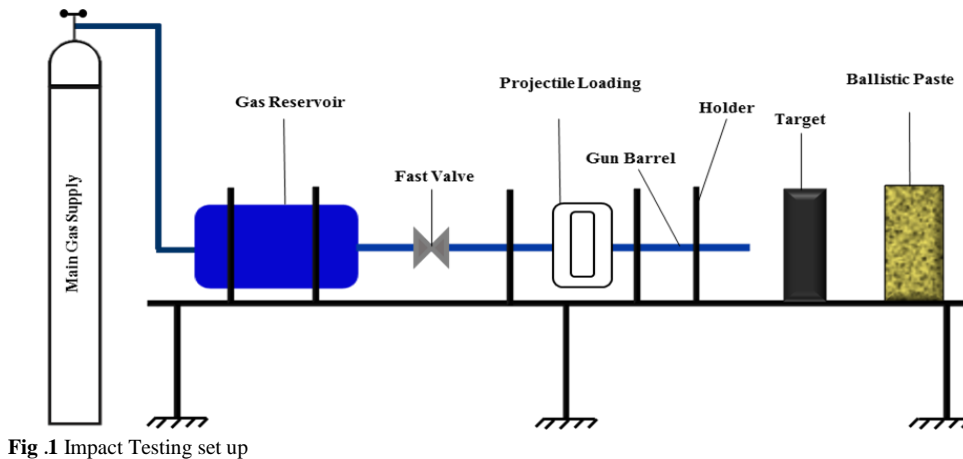


Fig. 1 Impact Testing set up

شکل 1 چیدمان آزمون ضربه

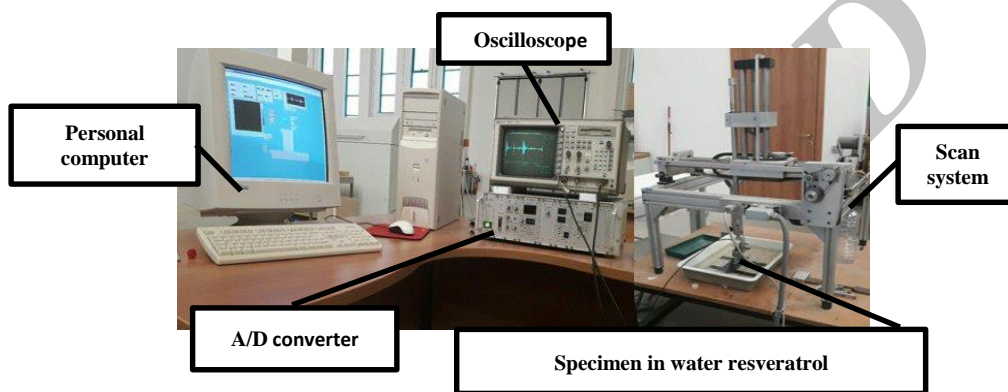


Fig. 2 Ultrasonic Immersion Testing set up

شکل 2 چیدمان آزمون فراصوتی غوطه‌وری

رادیوگرافی با وضوح بالایی را برای نمونه‌های کامپوزیتی با اندازه کوچک تا متوسط ارائه دهد.

برای به دست آوردن تصویر رادیوگرافی از ولتاژ 21 کیلو ولت، جریان 3 میلی‌آمپر، زمان قرار گرفتن نمونه تحت اثر اشعه ایکس برابر 180 ثانیه و فیلم ریز² استفاده شد. فاصله بین فیلم و منبع اشعه ایکس حدود 60 میلی‌متر بود. فیلم در اتاق تاریک پس از تاباندن اشعه ایکس به نمونه طی سه مرحله ظاهر شد. در مرحله اول فیلم در اتاق تاریک در محلول مایع ظهور و آب با درصد حجمی 4 به 1 به مدت 8 دقیقه قرار داده شد. در مرحله دوم فیلم با آب کاملاً شسته شده و در مرحله آخر در محلول مایع تثبیت‌کننده و آب با درصد حجمی 4 به 1 به مدت 2 دقیقه قرار گرفت. در نهایت فیلم ظاهر شده در مجاورت محیط خشک شد. تصویر دیجیتال فیلم پس از پردازش فیلم با استفاده از یک اسکنر نوری با مقدار وضوح 600dpi برای مشاهده و اندازه‌گیری مساحت مناطق آسیب‌دیده مورد استفاده قرار گرفت.

5-2- تصویر میکروسکوپی

نمونه در ابتدا به وسیله اره روکش داده شده با الماس بریده شده و در داخل رزین اکریلیک قرار داده می‌شود تا بتوان نمونه را در مرحله پولیش کردن در دست نگه داشت. سطح برش خورده نمونه طی سه مرحله با استفاده از کاغذهای سمباده سلیکن کاربرد با شماره‌های 300، 600 و 1200 ساییده می‌شود تا اثر مرحله برش از آن حذف شده و سطح نمونه به صورت صفحاتی صاف درآید. نمونه روی چرخ دوار با استفاده از خمیر الماس 3 میکرون و

استاندارد ASTM E494-10 انجام شد. سطح جلویی نمونه طبق این استاندارد باید عمود بر جهت ارسال موج و حداقل دارای صافی سطح 3.2 میکرومتر و حداکثر $\pm 3^\circ$ غیرموازی باشد. گام روبش جهت روبش سطح نمونه در طول و عرض محورها در مرحله اول 1 و در مرحله دوم 0.2 میلی‌متر در نظر گرفته شد.

4-2- روش آزمون رادیوگرافی

در این مطالعه از آنالیز اشعه ایکس برای شناسایی نواحی آسیب‌دیده از ضربه در نمونه کامپوزیتی استفاده شد. ابتدا نمونه به مدت 5 ساعت در محلول یدید روی (شامل 60 گرم یدید روی، 10 میلی‌لیتر آب، 10 میلی‌لیتر الکل ایزوپروپیل و 6 میلی‌لیتر کوداک فوتوفلو¹) که در برابر اشعه ایکس مات است، غوطه‌ور شد [22]. به این ترتیب محلول در مناطق آسیب دیده نفوذ کرده و کنتراست بین مناطق آسیب‌دیده و سالم را با تغییر ضریب جذب اشعه ایکس در مناطق آسیب دیده، افزایش می‌دهد. سپس نمونه با استون به دقت پاک‌سازی شده و رادیوگرافی با استفاده از کابینت² (مدل 43855A) انجام شد.

سیستم رادیوگرافی متشکل از مولد اشعه ایکس خود یک‌سو شده با جریان 3 میلی‌آمپر و ولتاژ خروجی قابل تنظیم بین 10 و 130 کیلو ولت است. سیستم اشعه ایکس با توجه به استفاده از منبع اشعه ایکس با اندازه 0.5 میلی‌متر و ضخامت دریچه برلیوم برابر با 0.64 میلی‌متر می‌تواند تصاویر

¹ Kodak Photoflo

² HP Faxitron

³ AGFA NDT D4

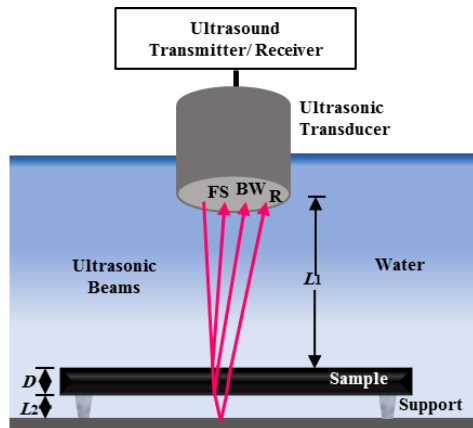


Fig. 3 Ultrasonic Immersion pulse-echo Testing set up

شکل 3 چیدمان آزمون فراصوتی غوطه‌وری بازتابی

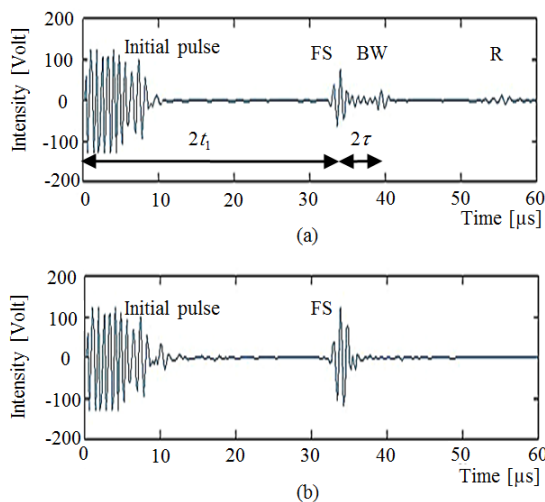


Fig. 4 obtained signal from figure 3 set-up for: a- impacted areas, b- intact areas

شکل 4 سیگنال‌های به‌دست‌آمده از شکل 3 برای الف- ناحیه عیب، ب- ناحیه سالم

3-1-2- روبش C

در شکل 5 روش روبش C به صورت شماتیک نشان داده شده است. در این تصویر مسیر حرکت پروب روی قطعه نشان داده شده است تا بتواند کل سطح قطعه را جاروب کند. مسیر حرکت پروب روی مسیری خطی (محور X) انجام می‌شود. مسیر طولی نمونه با فاصله‌های گام بین دو نقطه متوالی طی شده و فرستادن و دریافتن اکو توسط تراگذار صورت می‌گیرد. با رسیدن پروب به انتهای مسیر طولی، پروب به اندازه گام در راستای عرض (محور Y) جابه‌جا شده و موازی مسیر طولی پیشین و خلاف جهت آن مسیر را طی می‌کند. (لزوماً میزان گام در راستای X و Y برابر نیستند) در هر نقطه سیگنالی مشابه شکل 4-a,b ذخیره می‌شود. با مقایسه دو شکل تفاوت اکوهای به‌دست آمده از دو ناحیه سالم و معیوب نمونه مشخص می‌شود. در ناحیه معیوب دامنه اکوی سطح جلو افزایش یافته و دامنه اکوهای BW و R کاهش یافته یا کاملاً میرا می‌شود. با توجه به تفاوت ذکر شده دو ناحیه سالم یا معیوب مشخص شده و تصویر روبش C به‌دست می‌آید.

زمان آزمون با توجه به مقدار گام در نظر گرفته شده برای روبش C می‌تواند بسیار بالا رود. به منظور جلوگیری از اتلاف زمان و هزینه در ابتدا

سپس پودر آلومینا همراه با آب مقطر پولیش می‌شود تا سطح مورد نظر کاملاً پرداخت شود. سطح پرداخت شده نمونه با کمک میکروسکوپ نوری مدل ویلد¹ مشاهده شد و میکروگراف‌ها توسط دوربین دیجیتال مدل کنون² نصب شده بر لوله نوری میکروسکوپ، تهیه گردیدند.

3- نتایج

3-1- آزمون فراصوتی روبش C

3-1-1- روبش A

در شکل 3 آزمون فراصوتی غوطه‌وری و بازتابی نشان داده شده است. ابتدا نمونه در مخزن آب روی سطح صافی قرار داده شده و توسط تراگذار امواجی به داخل نمونه فرستاده می‌شود. در شکل 4-a,b به ترتیب سیگنال‌های به‌دست‌آمده از قسمت‌های سالم و معیوب نمونه تحت آزمون در شکل 3 آورده شده است. در این تصویر L_1 فاصله بین تراگذار و نمونه، L_2 ارتفاع پایه‌ها، D ضخامت نمونه، FS اکوی حاصل از سطح جلویی نمونه³، BW اکوهای بازتاب از سطح پشتی⁴ نمونه و R اکوی حاصل از سطح جلویی سطح منعکس‌کننده⁵ هستند. با توجه به دو شکل نشان داده شده می‌توان معادلات (2,1) را به‌دست آورد.

$$2t_1 = \frac{2L_1}{V_{\text{water}}} \quad (1)$$

$$2t_2 = \frac{2d}{V_{\text{sample}}} \quad (2)$$

در معادلات (2,1) $2t_1$ تأخیر زمانی⁶ بین اکوهای حاصل از سطح جلویی نمونه و تراگذار، $2t_2$ تأخیر زمانی بین سطح جلویی نمونه و اکوی بازتابیده از سطح پشتی هستند، همچنین V_{sample} سرعت صوت طولی در نمونه و V_{water} سرعت صوت طولی در آب است [23]. با مقایسه شکل 4-a,b مشخص می‌شود که در ناحیه معیوب سیگنال R حذف و سیگنال BW تضعیف یا حذف می‌شود. در مواد کامپوزیتی تضعیف امواج (میرایی) به شدت بالاست، به طوری که سطح نمونه در ناحیه ضربه دچار تغییرات شدیدی شده و موج برگشتی از سطح پشتی را تضعیف کرده و باعث کاهش دامنه آن می‌گردد. چه بسا در افزایش خیلی کم ضخامت، اکوی سطح پشت مشاهده نمی‌شود؛ بنابراین در نواحی که دچار ضربه شده‌اند به دلیل پدیده‌هایی مثل پخش‌شدگی موج برگشتی، خروج از توازی بین سطح پروب فراصوتی با سطح نمونه به دلیل اعوجاج و مواردی از این قبیل تضعیف اکوی سطح پشت و یا کاهش دامنه آن کاملاً قابل توجه است. این پدیده در مورد اکوی R نیز به شدت تشدید می‌شود، زیرا باید مسافت بیشتری را طی کند. از این ویژگی می‌توان برای شناسایی نواحی معیوب و سالم استفاده کرد. برای حصول بیشترین قابلیت تفکیک از تراگذار متمرکزکننده لازم است فاصله کانونی را روی سطح بالایی نمونه متمرکز کنیم. با توجه به فاصله کانونی پروب استفاده شده برابر با 27 میلی‌متر و سرعت صوت طولی در محیط آبی برابر با 1481 متر بر ثانیه [24]، مقدار زمانی پیک در اکوی FS باید مطابق رابطه (3) به‌دست آید.

$$TD = \frac{27\text{mm} \times 2}{1481\text{m/s}} = 36.46 \mu\text{m} \quad (3)$$

¹ Wild M420

² Canon D650

³ Front Surface (FS)

⁴ Back Wall

⁵ Reflector surface

⁶ Time Delay

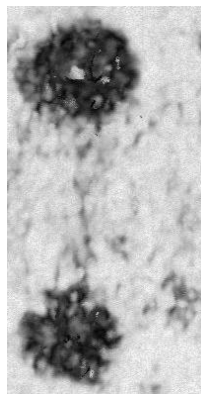
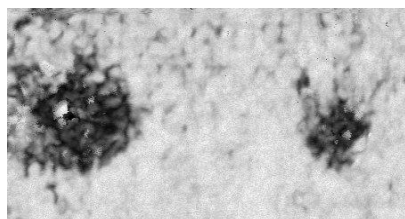


Fig. 7 Ultrasonic C-scan result of specimen with step = 0.2 mm in X and Y direction

شکل 7 تصویر روبش C فراصوتی به دست آمده از نمونه با گام 0.2 میلی‌متر در دو راستای X و Y

جدول 1 مساحت نواحی عیب به دست آمده از روش فراصوتی روبش C و استفاده از نرم افزار ایمج جی

Table 1 Obtained impact region areas by using Ultrasonic C-scan method and ImageJ software

شماره عیب	عیب اول	عیب دوم	عیب سوم	عیب چهارم
مساحت (mm ²)	237.295	418.301	575.690	114.349

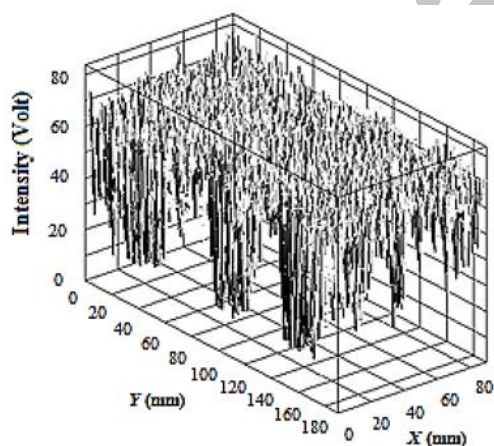


Fig. 8 3D ultrasonic C-scan of sample by Ultrasonic C-scan and ImageJ software.

شکل 8 تصویر روبش C سه بعدی از نمونه با استفاده از روش روبش C و نرم افزار ایمج جی

با مقایسه نتایج موجود در جدول‌های 1 و 2 مشاهده می‌شود که مساحت نواحی عیب با استفاده از روش روبش C بیشتر از روش رادیوگرافی است. این پدیده می‌تواند بدین دلیل باشد که امواج فراصوتی دارای حساسیت بیشتری از امواج رادیوگرافی نسبت به اعوجاج و هرگونه انحراف از وضعیت ایده‌آل در نمونه هستند. شکل 9 به خوبی این مطلب را نشان می‌دهد.

مقدار گام در دو راستای محور X و Y برابر 1 میلی‌متر در نظر گرفته شد. شکل 6 تصویر روبش C برای نمونه با گام 1 میلی‌متر را نشان می‌دهد. در این تصویر نواحی عیب به خوبی مشخص هستند.

به منظور بهبود دقت بعد از مشخص شدن حدود نواحی متأثر از ضربه، همان نواحی با گام 0.2 میلی‌متر مورد ارزیابی قرار گرفتند. شکل 7 تصویر روبش C نواحی عیب را با گام 0.2 میلی‌متر نشان می‌دهد. تصاویر به دست آمده را برای به دست آوردن مساحت ناحیه عیب تحت فیلتر آستانه‌ای قرار داده و تصویر باینری به دست می‌آید. با تنظیم نرم‌افزار ایمج جی روی 5 پیکسل بر میلی‌متر و انتخاب نواحی عیب، مساحت این نواحی مطابق جدول 1 به دست آمد.

شکل 8 تصویر روبش C از نمونه را به صورت سه بعدی نمایش می‌دهد. اثر ضربه وارد شده روی سطح نمونه در این تصویر به خوبی مشهود است. شکل 9 نواحی عیب را به صورت رویه نشان می‌دهد. در این تصویر مشاهده می‌شود نواحی اطراف مناطق ضربه خورده نیز دچار اعوجاج شده‌اند.

3-2- آزمون رادیوگرافی

شکل 10 تصویر حاصل از رادیوگرافی نمونه را نشان می‌دهد. در این تصویر چهار ناحیه متأثر از ضربه به خوبی مشخص هستند. با استفاده از فیلتر آستانه‌ای نواحی عیب و سالم از هم تفکیک شده و مساحت نواحی عیب با استفاده از نرم‌افزار ایمج جی مطابق جدول 2 به دست می‌آید.

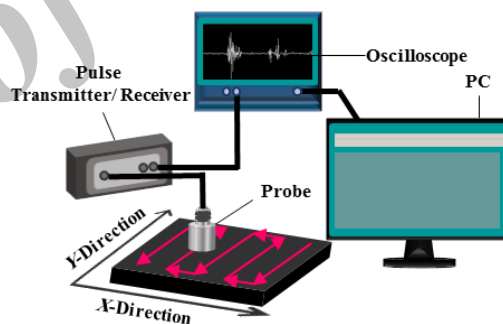


Fig. 5 Ultrasonic C-scan set-up

شکل 5 چیدمان روبش C فراصوتی

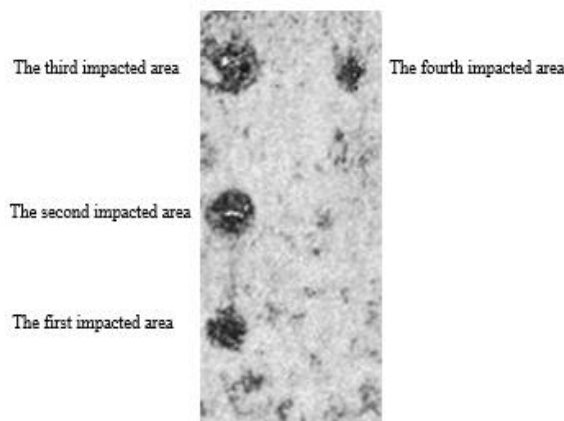


Fig. 6 Ultrasonic C-scan result of specimen with step = 1 mm in X and Y direction

شکل 6 تصویر روبش C فراصوتی به دست آمده از نمونه با گام 1 میلی‌متر در دو راستای X و Y

عنوان نمونه‌ای از عیوب موجود نشان می‌دهد. در این تصویر دو ناحیه ترک خورده مشاهده می‌شود که راستای ضربه در سطح مقطع نمونه را نشان می‌دهد. عیب لایه‌لایه‌شدگی در نزدیکی سطح پشتی به وجود آمده است. لایه‌ها در اثر ضربه وارد شده به نمونه در سطح بالایی نمونه دچار عیب عدم توازی شده‌اند. این بخش تا قسمت‌هایی از نواحی سمت راست عیب نیز مشاهده می‌شود. اندازه ناحیه بین دو ترک ریز حاصل از ضربه با استفاده از نرم‌افزار ایمج جی قابل اندازه‌گیری است که مقدار آن به قطر ناحیه عیب به‌دست‌آمده از روش رادیوگرافی نزدیک است، اما در اطراف ناحیه یادشده لایه‌لایه‌شدگی و عیوب دیگری هست که پس از برش نمونه و بررسی سطح مقطع ناحیه ضربه خورده به وسیله میکروسکوپ نوری مشخص شده‌اند. با در نظر گرفتن کل ناحیه عیوب و مقایسه آن با نتایج حاصل از روبش C مشخص می‌شود که روش روبش C دقت و احتیاط بیشتری در مقایسه با روش رادیوگرافی در شناسایی و اندازه‌گیری عیوب دارد. تعدادی از مک‌های موجود در نمونه که در شکل مشخص هستند در مرحله تولید ایجاد شده‌اند. از پروب متمرکز شونده برای انجام تست روبش C استفاده شده که این عیوب نمی‌تواند داخل پهنای باند موج قرار گرفته و به راحتی قابل تشخیص است. این مطلب برتری پروب متمرکز شونده را نسبت به پروب‌های نرمال نشان می‌دهد.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق دقت اندازه‌گیری ناحیه عیب در مواد کامپوزیتی بررسی شد. بدین منظور نمونه‌ای کامپوزیتی از الیاف تقویت شده کربن در رزین پلی‌استر مورد استفاده قرار گرفت. این نمونه با استفاده از روش دستی تولید شده و تحت آزمون ضربه قرار گرفت. با تغییرات مقدار انرژی اولیه در نمونه 4 ناحیه عیب ایجاد شد. نواحی عیب با استفاده از دو روش آزمون فراصوتی شامل روش رادیوگرافی با مایع نافذ و آزمون فراصوتی روبش C مورد ارزیابی قرار گرفت. تصویرهای به‌دست‌آمده از دو روش با استفاده از نرم‌افزار ایمج جی مورد ارزیابی قرار گرفته و مساحت نواحی عیب محاسبه شد. با مقایسه نتایج حاصل از دو روش مشاهده شد که دو روش توانایی شناسایی ناحیه عیب را به خوبی دارند، اما روش روبش C مساحت ناحیه عیب را بیشتر نشان می‌دهد. این روش حساسیت بیشتری به تغییرات به وجود آمده در نمونه بر اثر ضربه دارد. بر اثر ضربه در سطح نمونه اعوجاج صفحه‌ای ایجاد می‌شود که روش رادیوگرافی توانایی شناسایی آن‌ها را ندارد. با استفاده از خروجی روش روبش C می‌توان تصویری سه بعدی از نمونه به‌دست آورد که تمامی اعوجاج‌های سطح نمونه را به شکل سه بعدی نمایش دهد. با در نظر گرفتن مطالب یادشده به نظر می‌رسد که روش روبش C روش مطمئن‌تری است. البته بیان

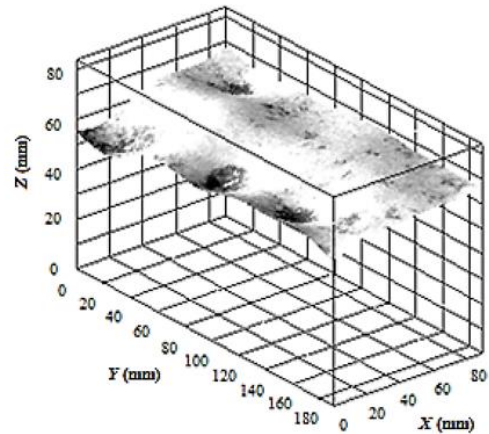


Fig. 9 surface image of sample by Ultrasonic C-scan and ImageJ software

شکل 9 تصویر رویه‌ای از نمونه با استفاده از روش روبش C و نرم‌افزار ایمج جی

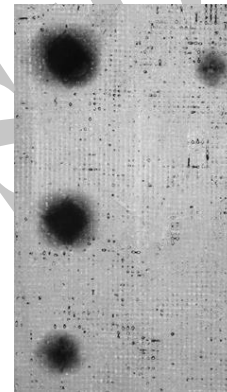


Fig. 10 X-ray radiography result

شکل 10 تصویر حاصل از رادیوگرافی نمونه

جدول 2 مساحت نواحی عیب به‌دست‌آمده از روش رادیوگرافی و استفاده از نرم‌افزار ایمج جی

Table 2 Obtained impact region areas by using X-ray radiography method and ImageJ software

شماره عیب	عیب اول	عیب دوم	عیب سوم	عیب چهارم
مساحت (mm ²)	308.400	444.720	695.200	160.880

3-3- تصویر میکروسکوپی

استفاده از تصویر میکروسکوپی برای مشاهده ریزساختار موجود در نواحی عیب، لازم است. شکل 11 تصویر میکروسکوپی از ناحیه عیب شماره 2 را به

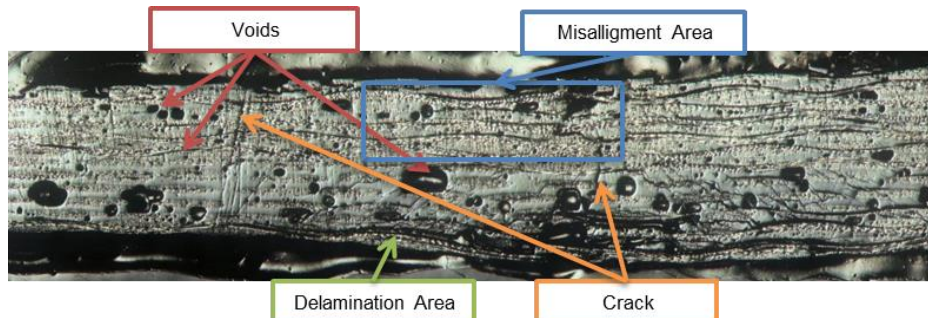


Fig. 11 Microscopic image from second impacted area

شکل 11 تصویر میکروسکوپی از ناحیه عیب دوم

- thermography, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 58, No.1, pp. 36-46, 2013.
- [6] C. Meola, G. M. Carlomagno, Infrared thermography to evaluate impact damage in glass/epoxy with manufacturing defects, *Impact Engineering*, Vol. 67, No. 1, pp. 1-11, 2014.
- [7] T. Liang, W. Ren, G. Y. Tian, M. Elradi, Y. Gao, Low energy impact damage detection in CFRP using eddy current pulsed Thermography, *Composite Structure*, Vol. 143, No. 1, pp. 352-361, 2016.
- [8] L. Cheng, B. Gao, G. Y. Tian, W. L. Woo, G. Berthiau, Impact damage detection and identification using eddy current pulsed thermography through integration of PCA and ICA, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 14, No. 5, pp. 1655-1663, 2014.
- [9] K. Koyama, H. Hoshikawa, T. Hirano, Investigation of impact damage of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) by eddy current non-destructive testing, *International Workshop Smart Materials, Structures & NDT in Aerospace*, Montreal, Canada, 2011.
- [10] N. Rauter, R. Lammering, Impact damage detection in composite structures considering nonlinear lamb wave propagation, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 22, No. 1-2, pp. 44-51, 2014.
- [11] M. Capriotti, H. E. Kim, F. L. D. Scalea, H. Kim, Non-Destructive inspection of impact damage in composite aircraft panels by ultrasonic guided waves and statistical processing, *Materials*, Vol. 10, No. 6, pp. 1-12, 2017.
- [12] Th. Hasiotis, E. Badogiannis, N. G. Tsovalis, Application of ultrasonic c-scan techniques for tracing defects in laminated composite materials, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 57, No. 3, pp.192-203, 2011.
- [13] Q. Shen, M. Omar, Sh. Dongri, Ultrasonic NDE techniques for impact damage inspection on CFRP laminates, *Journal of Materials Science Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 2-16, 2012.
- [14] K. Ono, Y. Mizutani, M. Takemoto, Analysis of acoustic emission from impact and fracture of CFRP laminates, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 25, No. 1, pp. 179-186, 2007.
- [15] M. P. Amoroso, C. Caneva, F. Nanni, M. Valente, Acoustic emission performance for damage monitoring of impacted FRP Composites Laminates, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 22, No. 1, pp. 1447-1454, 2003.
- [16] N. Chandarana, D. M. Sanchez, C. Soutis, M. Gresil, Early damage detection in composites during fabrication and mechanical testing, *Materials*, Vol. 10, No. 7, pp. 1-16, 2017.
- [17] W. J. Cantwell, J. Morton, Detection of impact damage in CFRP laminates, *Composite Structures*, Vol. 3, No. 3, pp. 241-257, 1985.
- [18] N. K. Ravikiran, A. Venkataramanaiah, M. R. Bhat, C. R. L. Murthy, Detection and evaluation of impact damage in CFRP laminates using ultrasound c-scan and IR thermography *National Seminar on Non-Destructive Evaluation*, Hyderabad, India, 2006.
- [19] A. R. Chambers, N. O. Heinje, Damage characterisation in CFRP using acoustic emission, X-Ray tomography and FBG Sensors, *17th international conference on composite material*, Edinburgh, England, July 27-31, 2009.
- [20] L. Pieczonka, F. Aymerich, W. J. Staszewski, Impact damage detection in light composite sandwich panels, *Procedia Engineering*, Vol. 88, No. 1, pp. 216-221, 2014.
- [21] R. Nasirzadeh, A. R. Sabet, Influence of nanoclay reinforced polyurethane foam toward composite sandwich structure behavior under high velocity impact, *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 52, No. 3, pp. 253-275, 2015.
- [22] J. Summerscales, *Non-destructive testing of fibre-reinforced plastics composites*, pp. 1-24, London, Elsevier applied science, 1987.
- [23] A. Arhammazi, F. Honarvar, Improvement of ultrasonic wave velocity measurements in steel components by using the SAGE algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 241-248, 2015. (in Persian)
- [24] *Speed of Sound in Water - Engineering ToolBox*, Accessed on 15 November 2016; https://www.engineeringtoolbox.com/sound-speed-water-d_598.html.

این مطلب نیز ضروری است که روش رادیوگرافی نیاز به زمان کمتری دارد؛ بنابراین می‌توان از دو روش به عنوان مکمل یکدیگر استفاده کرد.

5- فهرست علائم

BW	اکوی بازتاب از سطح پشتی نمونه
D	ضخامت نمونه
FS	اکوی حاصل از سطح جلویی نمونه
L_1	فاصله بین تراگذار و نمونه
L_2	ارتفاع پایه‌ها
R	اکوی حاصل از سطح جلویی سطح منعکس کننده
$2t_1$	تأخیر زمانی بین اکوهای حاصل از سطح جلویی نمونه و تراگذار
$2t_2$	تأخیر زمانی بین سطح جلویی نمونه و اکوی بازتابیده از سطح پشتی اول
V_{sample}	سرعت صوت طولی در نمونه
V_{water}	سرعت صوت طولی در آب

6- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله برخود لازم می‌دانند از مسئولین آزمایشگاه پلاستیک در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران برای ساخت نمونه و از آزمایشگاه آزمون غیرمخرب دانشگاه کالیاری در ایتالیا برای در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمون روبش C رادیوگرافی و سایر امکانات کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

7- مراجع

- [1] D. A. Hutchins, A. C. Pardoe, D. R. Billson, D. L. Hines, Neural network correction of ultrasonic C-scan images, *Ultrasonic*, Vol. 37, No. 4, pp. 263-272, 1999.
- [2] Y. He, G. Y. Tian, M. Pan, D. Chen, Non-destructive testing of low-energy impact in CFRP laminates and interior defects in honeycomb sandwich using scanning pulsed eddy current, *Composites: Part B*, Vol. 59, No. 1, pp. 196-203, 2014.
- [3] X. E. Gros, K. Takahashi, Non-destructive evaluation of the effect of ply orientation on the impact resistance of thermoplastic toughened thermoset resin polymeric matrix composite, *International Conference on Advanced Materials*, Vol. 4, No. 3, pp. 8-14, 1998.
- [4] Ch. Maierhofer, Ph. Myrach, M. Reischel, H. Steinfurth, M. Röllig, M. Kunert, Characterizing damage in CFRP structures using flash thermography in reflection and transmission configurations, *Composites: Part B*, Vol. 57, No. 1, pp. 35-46, 2014.
- [5] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, I. López, Automatic detection of impact damage in carbon fiber composites using active