

Application of Through Transmission Ultrasonic Evaluation in Carbon Fiber Reinforced Composites

Mahdi Shahabi¹  | Davod Akbari² 

1. Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: mshahabi869@gmail.com
2. Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: daakbari@modares.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 03 Sep. 2024

Revised 09 October 2024

Accepted 17 January 2024

Keywords:

through-transmission ultrasonic testing, Carbon Fiber Reinforced Composites, water jet technique, Non-destructive testing,

ABSTRACT

The application of composite components has significantly increased across various industries, including oil and gas, aerospace, marine, and automotive sectors. Among these, carbon fiber reinforced polymers (CFRP) are particularly prevalent in the aerospace industry due to their superior properties. Given the critical nature of these composites, non-destructive inspection is essential to ensure their integrity and performance. Ultrasonic testing is one of the most widely used methods for inspecting these materials. Recent research has focused on the application of ultrasonic testing for the non-destructive inspection of CFRP parts. This study investigates the feasibility of using through-transmission ultrasonic testing with a water jet technique for inspecting CFRP components. Additionally, it examines the relationship between flexural properties and the intensity of transmitted waves in multilayer composite materials. For this purpose, samples were fabricated from epoxy-carbon fiber using the hand lay-up method. A through-transmission ultrasonic non-destructive testing setup with a water jet system was designed and constructed, and ultrasonic testing was performed to identify defects in the samples. Subsequent bending tests were conducted to determine the flexural properties of the samples. The analysis revealed that an increase in the number of layers led to a decrease in both the final flexural strength and the average intensity of the transmitted wave, attributed to the higher likelihood of structural defects. And also, increase in reflection, refraction, and reflection at the boundary of layers in samples with more layers.

Cite this article: Shahabi, M., Akbari, D. (2024). Application of Through Transmission Ultrasonic Evaluation in Carbon Fiber Reinforced Composites. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (4), 99-109.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2024.476759.1153>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

بکارگیری آزمون فراصوتی عبوری با کمک روش آیفشان در سلامت سنجی مواد مرکب پایه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن

مهدی شهایی^۱ | داود اکبری^۲ ✉

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، رایانامه: mshahabi869@gmail.com

۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، رایانامه: daakbari@modares.ac.ir

چکیده:

امروزه استفاده از قطعات کامپوزیتی در صنایع مختلف مانند صنایع نفت و گاز، هوافضا، صنایع دریایی و صنایع خودروسازی افزایش پیدا کرده است. کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن یکی از پرکاربردترین انواع مورد استفاده در صنایع هوافضا می‌باشد. با توجه به کاربردهای حساس این نوع کامپوزیت‌ها، به کارگیری روش‌های مناسب برای بازرسی غیرمخرب این مواد امری ضروری می‌باشد. روش آزمون فراصوتی یکی از پرکاربردترین روش‌های بازرسی است که پژوهش‌های متعددی در ارتباط با کاربرد این روش در بازرسی غیر مخرب قطعات الیاف کربن انجام شده است. در این مقاله امکان انجام آزمون فراصوتی عبوری با تکنیک آیفشان در بازرسی غیرمخرب قطعات کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن و رابطه خواص خمشی با شدت موج عبوری در مواد مرکب چند لایه مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا ابتدا نمونه آزمایش از جنس اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن و به روش لایه چینی دستی ساخته شد. در مرحله‌ی بعدی با طراحی و ساخت یک ستاپ آزمون غیر مخرب فراصوتی عبوری با سیستم آیفشان، آزمون فراصوتی برای شناسایی عیوب روی نمونه انجام گردید و نتایج آزمون به صورت نمودارهای C-scan مورد بررسی قرار گرفت. سپس با انجام آزمون خمش، خواص خمشی نمونه‌ها بدست آمد. بررسی و ارزیابی نتایج حاصل نشان داد که با افزایش تعداد لایه‌ها استحکام خمشی نهایی و میانگین شدت موج عبوری بدلیل افزایش احتمال وجود عیوب ساختی در نمونه با تعداد لایه بیشتر و همچنین شکست، انکسار و بازتاب در مرز لایه‌ها، کاهش می‌یابد.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۶/۱۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۷/۲۶

کلیدواژگان:

آزمون فراصوتی عبوری،
تکنیک آیفشان،
کامپوزیت تقویت شده با
الیاف کربن،
بازرسی غیرمخرب،

استناد: شهایی، مهدی و اکبری، داود. (۱۴۰۲). بکارگیری آزمون فراصوتی عبوری با کمک روش آیفشان در سلامت سنجی مواد مرکب پایه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۴)، ۹۹-۱۰۹.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2024.476759.1153>



۱- مقدمه

مواد مرکب ساختارهایی هستند که از ترکیب ماکروسکوپی دو یا چند ماده تشکیل شده است که در یکدیگر حل نمی‌شوند. یکی از اجزاء تشکیل دهنده فاز تقویت کننده و دیگری فاز زمینه نامیده می‌شود که به آن ماتریس گفته می‌شود. مواد فاز تقویت کننده ممکن است به شکل الیاف، ذرات یا ویسکر باشند. نمونه‌هایی از سیستم‌های کامپوزیت شامل بتن تقویت شده با فولاد و اپوکسی تقویت شده با الیاف گرافیت و غیره است [۱]. به طور کلی کامپوزیت‌ها به سه دسته کامپوزیت‌های پایه پلیمری، پایه فلزی و پایه سرامیکی تقسیم بندی می‌گردند. امروزه استفاده از کامپوزیت‌های پایه پلیمری در صنایع مختلف افزایش یافته است. از کامپوزیت‌های پایه گرماسخت تقویت شده با الیاف بلند در زمینه‌های گوناگون همانند هوافضا، صنایع دریایی، صنایع خودروسازی و صنایع نفت و گاز استفاده می‌شود. یکی از مشهورترین کامپوزیت‌های پایه گرماسخت، کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) می‌باشند که در صنایع هوافضا و خودروسازی کاربرد وسیعی دارند. از کامپوزیت‌های CFRP در صنایع هوافضا در ساخت قطعاتی نظیر بال هواپیما، دم هواپیما و قطعات مشابه دیگر استفاده می‌شود [۲]. با توجه به حساسیت موارد استفاده از این قطعات، حصول اطمینان از سالم بودن و عملکرد مناسب آن‌ها امری ضروری است؛ زیرا که وجود عیوب گوناگون می‌تواند عملکرد این قطعات و در نتیجه عملکرد محصول را تحت تاثیر قرار دهد. این امر می‌تواند خسارت‌های جانی و مالی فراوانی به دنبال داشته باشد. ترک، جدایش بین لایه‌ای، شکستگی الیاف و حفره از رایج‌ترین عیوب موجود در کامپوزیت‌های CFRP می‌باشد. از این رو بازرسی قطعات CFRP مورد استفاده در صنایع هوافضا امری ضروری می‌باشد. امروزه آزمون‌های غیر مخرب متنوعی جهت بازرسی قطعات کامپوزیتی همانند قطعات CFRP ارائه شده است. یکی از رایج‌ترین روش‌های مورد استفاده در صنایع آزمون فراصوتی است [۳ و ۴]. در این روش ابتدا امواج مکانیکی عموماً با فرکانس بالای ۵۰۰ kHz به داخل قطعه ارسال شده و سپس امواج دریافتی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

وجود هر نوع ناپیوستگی اعم از جدایش و یا تغییرات چگالی و یا انواع حفرات، می‌تواند در الگوی امواج دریافتی تاثیر بگذارد. بسته به نوع ارسال امواج فراصوتی، روش بازرسی فراصوتی در سه حالت بازتابی^۱، عبوری^۲ و ارسال - دریافت^۳ انجام می‌شود [۵ و ۶]. پارامتر امپدانس صوتی مشخص می‌نماید که چه مقدار از امواج فراصوتی در فصل مشترک دو محیط وارد محیط جدید می‌شوند [۷]. با توجه به پایین بودن امپدانس صوتی گازها معمولاً در فصل مشترک فلز-گاز و پلیمر - گاز بازتاب کلی رخ می‌دهد و امواج وارد محیط جدید نمی‌شوند. برعکس در محیط‌های مشترک جامد - مایع و جامد - جامد با توجه به بالا بودن امپدانس صوتی دو محیط و نزدیک بودن آنها بازتاب به صورت جزئی تر است و امواج می‌توانند وارد محیط جدید شوند. از این رو در روش بازرسی فراصوتی نیاز به یک ماده واسط مابین پراب مولد امواج و قطعه مورد بازرسی می‌باشد تا امواج از طریق آن به داخل قطعه نفوذ کنند. به این ماده، ماده‌ی واسط گفته می‌شود. ماده‌ی واسط می‌تواند انواع روغن، آب، گریز و نظایر این‌ها باشد. زمانی که آزمون غیرمخرب بر روی قطعات بزرگ کامپوزیتی انجام می‌شود، نیاز به صرف زمان زیاد جهت اعمال ماده‌ی واسط بر روی سطح قطعه و همین‌طور بازرسی قطعه وجود دارد. یکی از روش‌هایی که برای حل این مشکل ارائه شده است، استفاده از ستون سیال به صورت آبفشان می‌باشد. در این روش، پراب فراصوتی با استفاده از نازل‌های فواره‌ای، با سطح قطعه مرتبط شده و امواج از مسیر این ستون آب به نمونه منتقل می‌گردد. از این روش جهت بازرسی قطعاتی که امکان اعمال روش غوطه‌وری نیست، می‌توان استفاده کرد. در حوزه بازرسی مواد مرکب با استفاده از روش فراصوتی تحقیقات متعددی انجام گرفته شده است. ساویلس و همکاران [۷]. پژوهشی در ارتباط با عیب‌یابی مواد مرکب با استفاده از روش آزمون فراصوتی بازتابی انجام دادند. آنها ابتدا نمونه‌های ماده مرکب پایه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه^۴ و کربن را با درصد حجمی الیاف و با ضخامت ۳mm تا ۵mm به کمک روش ساخت دستی و نفوذ در خلا ساختند. در مرحله بعد عیوب مصنوعی با اندازه‌های مشخص در این نمونه‌ها ایجاد نمودند. جهت بازرسی غیر مخرب از مولد فراصوتی مدل

³ Pitch-catch⁴ Glass fiber reinforced polymers¹ Pulse-Echo² Through-Transmission

مقایسه قرار دادند. در این پژوهش از یک کامپوزیت با درصد حجمی ۶۰ درصد الیاف به ضخامت ۴ mm استفاده شده است. در نمونه ی کامپوزیتی عیب جدایش بین لایه ای ایجاد شده است. جهت انجام آزمون از یک پروب ۱ MHz استفاده شده است. نتایج حاصل نشان داد که آزمون فراصوتی از دقت بالاتری نسبت به آزمون رادیوگرافی برخوردار است. هیلگر و همکاران [۹] عیب یابی قطعات کامپوزیتی ساندویچ پنل با هسته لانه زنبوری و پوسته ای از جنس CFRP به ضخامت ۱۴mm را با روش فراصوتی و با دو ماده ی واسط هوا و آب انجام دادند. هدف این پژوهش مقایسه ی انتشار موج فراصوتی در دو نوع ماده ی واسط و تاثیر آن در بازرسی با آزمون فراصوتی با تکنیک عبوری می باشد. با توجه به این که تضعیف موج فراصوتی در قطعات ساندویچ پنل بسیار بیشتر از کامپوزیت های متداول می باشد، از پروب با فرکانس ۰/۴ Mhz تا ۰/۸ Mhz استفاده شد. جهت به کارگیری ماده ی واسط هوا از سیستم AIR TECH4000 استفاده شد. نتایج نشان داد که دقت بازرسی به روش فراصوتی با تکنیک عبوری با به کارگیری ماده ی واسط هوا در ساندویچ پنل ها بیشتر از ماده ی واسط آب می باشد؛ زیرا که طول موج فراصوت در آب پنج برابر طول موج آن در هوا است و این موضوع باعث واگرایی امواج در آب می شود. در پژوهشی دیگر آیمریچ و همکاران عیب یابی کامپوزیت های CFRP را با روش فراصوتی با تکنیک بازتابی انجام دادند. در این تحقیق یک نمونه کامپوزیت CFRP با درصد حجمی ۶۰ درصد الیاف، در ۱۶ لایه و به ضخامت ۲.۳ mm تولید و در آن عیوب مصنوعی با اندازه های مشخص ایجاد گردید. سپس با استفاده از دو روش فراصوتی و رادیوگرافی مورد بازرسی قرار گرفت. در این آزمایش از دو نوع پروب نرمال و زاویه ای با فرکانس ۰.۵ MHz جهت عیب یابی ترک ماتریسی و عیب جدایش بین لایه ای استفاده شد. لازم به ذکر است که اگر عیب و جهت انتشار موج نسبت به هم متعام باشند، دقت و وضوح تصویر حاصل از آزمون بیشتر است. به علت تعدد لایه و پدیده شکست موج در سطح مشترک بین لایه ها، جهت دست یابی به نفوذ کامل از موج با فرکانس کمتر بهره گرفته شده است. در پژوهش حاضر از آزمون فراصوتی با تکنیک آیفشان جهت بازرسی قطعات کامپوزیتی CFRP استفاده شده است. از پروب نرمال با فرکانس ۱ MHz جهت تولید امواج فراصوتی با طول موج بالا

ULTRAPAC مجهز به پروب 5 MHz برای تولید امواج فراصوتی و همچنین از یک تانک آب جهت اعمال ماده ی واسط استفاده کردند. در این پژوهش از نرم افزار ULTRAWIN جهت تشکیل تصویر دیجیتال استفاده شده است، علاوه بر این در این پژوهش سطح نمونه توسط پراب جاروب شده است. این کار به کمک یک سیستم محرک سه محور و با استفاده از یک استپ موتور انجام شده است. نتایج حاصل از عیب یابی فراصوتی با تکنیک بازتابی بر روی نمونه های CFRP و GFRP و مقایسه آنها نشان می دهد که دقت و کیفیت تصویر حاصل از بازرسی نمونه ی کامپوزیت CFRP نسبت به نمونه ی کامپوزیت GFRP بیشتر است. دلیل این پدیده برگشت (بازتاب) بیشتر امواج از سطح الیاف شیشه نسبت به الیاف کربن عنوان شده است. از این رو، جهت کاهش بازتاب مذکور و افزایش کیفیت تصویر پیشنهاد می گردد از امواج با طول موج بیشتر و فرکانس کمتر و یا از روش فراصوتی با تکنیک عبوری و با همان فرکانس استفاده شود. در پژوهشی دیگر روبل و همکاران [۵] دو روش بر اساس آزمون فراصوتی در کامپوزیت GFRP انجام دادند. در این پژوهش در مرحله اول پنج نمونه کامپوزیتی با مساحت حدود ۸۰۰ mm² و ضخامت ۱۰ mm با روش دستی و با لایه گذاری با زوایای مختلف ساخته شد. در مرحله ی بعدی هر کدام از نمونه ها ۸ بار مورد آزمون فراصوتی قرار گرفتند، به طوری که ابتدا آزمون فراصوتی با تکنیک عبوری و با فرستنده ۲ MHz و سپس آزمون فراصوتی با تکنیک بازتابی و با فرستنده ۱ MHz انجام شده است. در هر آزمون، سرعت موج منتشر شده در هر نمونه اندازه گیری شده است. نتایج حاصل از آزمون های مذکور نشان داد که نسبت وزنی الیاف به رزین در نمونه ها بیشتر از ۳۰ درصد می باشد. در این پژوهش در حین انجام آزمون های فراصوتی با قرار دادن بلوک ۱۰ mm پلی متیل متاکریلات (PMMA) از حذف شدن اولین بازتاب از سطح نمونه جلوگیری شده است. علاوه بر این مشاهده شد که با افزایش درصد حجمی الیاف، سرعت انتشار موج در کامپوزیت نیز افزایش می یابد. این روش می تواند معیاری برای اندازه گیری درصد های حجمی و وزنی در مواد مرکب (بصورت غیر مخرب) و در نتیجه بدست آوردن مدول یانگ و ثوابت مهندسی باشد. نمازی و همکاران [۸] دقت نتایج حاصل از بازرسی به روش فراصوتی و رادیوگرافی را مورد بررسی و

۲- مواد و روش آزمایش

به منظور اجرای آزمایش و برای تولید چهار نمونه ماده مرکب، الیاف کربن با بافت تک جهت محصول شرکت ایران کاویان به ضخامت ۰.۳ mm، وزن مخصوص 2.00 g/m^2 ، چگالی $1.78 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ ، استحکام کششی 3800 Mpa تا 4000 Mpa ، مدول کششی 230 Gpa و رزین اپوکسی مخصوص لایه گذاری LR ۶۲۰ تولید شرکت ایران کامپوزیت کاویان با ویسکوزیته ی مخلوط در درمای اتاق (۲۵°C) CP ۵۰۰ استفاده شده است. در شکل ۲ تصویرالیاف کربن مورد استفاده در ساخت نمونه قبل مشاهده است. در شکل‌های ۳ تا ۶ تصاویر نمونه‌های ماده مرکب پایه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن آورده شده است. تمامی نمونه‌ها با روش لایه گذاری دستی و با زاویه چیدمان صفر درجه و به کمک قالب پرس ساخته شده‌اند. اطلاعات نمونه‌ها به شرح جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱) نمونه مواد مرکب تهیه شده

| شماره | تعداد لایه | وزن الیاف (g) | ابعاد (cm) |
|-------|------------|---------------|------------|
| ۱ | ۱۵ | ۸۲.۵ | ۵.۲×۸×۲۵ |
| ۲ | ۵ | ۲۴.۹ | ۰.۲×۱۰×۲۵ |
| ۳ | ۵ | ۵.۲ | ۱.۶×۵×۱۰ |
| ۴ | ۱۰ | ۱۷.۴ | ۳.۱۵×۵×۱۰ |



شکل ۱) رزین اپوکسی LR ۶۲۰ مخصوص لایه گذاری

بهره گرفته شده است و با یک ست آپ آزمایشی، ستون سیال به شکل یک آبقشان بین پراب فراصوتی و نمونه تحت بازرسی ایجاد شده است. آقای پاپا و همکاران [۱۰] پژوهشی در مورد بازرسی فراصوتی مواد مرکب: روش‌های شناسایی خرابی ضربه انجام دادند. در این تحقیق دو نمونه ماده مرکب ساخته شده از رزین اپوکسی SX10 و vinyl ester hydrex تقویت شده با الیاف شیشه با ضخامت $3.8 \text{ mm} \pm 0.1$ و نمونه بعدی با استفاده از الیاف کربن T700 و رزین اپوکسی vinyl ester hydrex به ضخامت ۳.۹ میلی متر و نمونه آخر با الیاف بازالت و رزین Crystic VE679PA و ضخامت ۴mm تولید شد. سپس عیبی در اثر ضربه با انرژی ۱۰ J و ۲۰ J بر روی نمونه ایجاد شد. به کمک آزمون فراصوتی و با بهره گیری از فرستنده آرایه فازی با فرکانس ۵ Mhz تصویر روبش C- نمونه‌ها تهیه گردید. نتایج نشانگر آن است که آزمون فراصوتی بازتابی توانمندی لازم در شناسایی ناحیه عیب ایجاد شده را دارد. تصویر تهیه شده از نمونه‌های ساخته شده با رزین اپوکسی از کیفیت و وضوح بیشتری برخوردار می‌باشد.

کاندیل و همکاران [۱۱] پژوهشی در مورد عیب یابی مواد مرکب به کمک روش التراسونیک روبش C انجام دادند. آنها با اجرا تکنیک عبوری و بازگشتی آزمون فراصوتی بر روی نمونه‌ها با عیوب مختلف و نمایش نتایج حاصل به صورت روبش B و روبش C به بررسی دقیق‌تر تاثیر وجود عیوبی همچون لایه‌لایه شدن، پیچ خوردگی الیاف، حباب‌های محبوس و وجود مواد خارجی در کامپوزیت بر روی پدیده‌های فیزیکی حاکم بر آزمون فراصوتی پرداختند. این بررسی‌ها نشانگر دقت بالای روش التراسونیک - عبوری در تشخیص لایه لایه شدگی مواد مرکب است. در پژوهشی دیگر آقای هاگز و همکاران [۱۲] در مورد کاربرد اندازه گیری همزمان سرعت موج و ضخامت مواد در مواد مرکب انجام دادند. با استفاده از روش آبقشان و همپوشانی پالس آزمون فراصوتی و با بهره گیری از فرستنده /گیرنده با فرکانس و ابعاد مناسب (به ترتیب ۱۵Mhz و ۱۰Mhz با قطرهای ۶ mm و ۵mm) به اندازه گیری ضخامت نمونه گرافیت - پلی آمید از طریق اندازه گیری زمان و سرعت انتشار موج پرداختند، که در نتیجه با دقت حدود ۰.۵ تا ۲ درصد موفق به اندازه گیری ضخامت نمونه با استفاده از روش‌های مذکور شدند.



شکل ۲) الیاف کربن با بافت تک جهت



شکل ۵) تصویر نمونه شمار سه



شکل ۳) تصویر نمونه شمار یک



شکل ۶) تصویر نمونه شمار چهار



شکل ۴) تصویر نمونه شمار دو

برای انجام آزمون فراصوتی در این نمونه ها، به دلیل ماهیت مواد مرکب و ضریب استهلاک موج بسیار زیاد در آنها، بایستی برخلاف فلزات همگن از پرابهایی با فرکانس پایینتر استفاده شود. لذا از دو پروب نرمال نوع YS-14671 با قطر ۲۰mm و با فرکانس ۱ MHz جهت تولید و ارسال امواج فراصوتی استفاده شد. همانگونه که در بخش مقدمه توضیح داده شده است، برای انتقال امواج به سطح قطعه تحت آزمون، بایستی از ستون سیال که در این پژوهش آیفشان است، استفاده گردد. بدین منظور دو نازل از جنس تفلون و به شکلی ساخته شد که پروب ها در مرکز آن قرار گرفته و آب از محیط پروب با استفاده از یک پمپ آب، به سمت قطعه پاشیده شود. در شکل شماره ۷ تصویر نازل و

اجرای آزمون بر روی قطعات با اندازه‌های بزرگتر و هندسه پیچیده‌تر استفاده از یک سیستم کنترل اتوماتیک برای جاروب صحیح و کامل سطح قطعه نیاز است. در اجرای آزمون فراصوتی غوطه وری برای قطعه با ابعاد بزرگتر به تانک آب بزرگتری برای غوطه وری کردن قطعه نیاز است، همچنین در اجرای این تست بر روی قطعات با سطح مقطع محدب یا مقعر تنظیم زاویه صحیح ارسال و دریافت امواج یکی از اصلی‌ترین چالش‌های این آزمون می‌باشد. جهت برطرف کردن این چالش‌ها در این پژوهش از سیستم آبفشان استفاده شده است تا با اجرای غوطه وری موضعی بر روی قطعه توسط سیستم آبفشان و جاروب اتوماتیک سطح قطعه بتوان قطعات با هندسه پیچیده‌تر و ابعاد بزرگتر را با سرعت و دقت قابل قبولی توسط آزمون فراصوتی عبوری مورد بررسی قرار داد. بنابراین در این پژوهش برای بررسی مواد مرکب چند لایه دستگاه آزمون فراصوتی با قابلیت حرکت اتوماتیک در راستای محورهای X و Y و حرکت دستی در راستای محور Z طراحی و ساخته شد. همچنین دو منبع آبفشان برای ایجاد غوطه‌وری موضعی مورد استفاده قرار گرفت. جهت بازرسی فراصوتی از دستگاه VEO PLUS شرکت SONA TEST جهت داده برداری به صورت روبش A- استفاده شده است. از قابلیت‌های مهم دستگاه اتصال به رایانه و امکان پویس و ثبت همزمان نتایج آزمون با اجرای آزمون از طریق نرم افزار UT STUDIO PLUS است. پس از انجام کالیبراسیون فاصله سرعت موج فراصوتی بر روی m/s ۲۲۰۰ تنظیم شد.



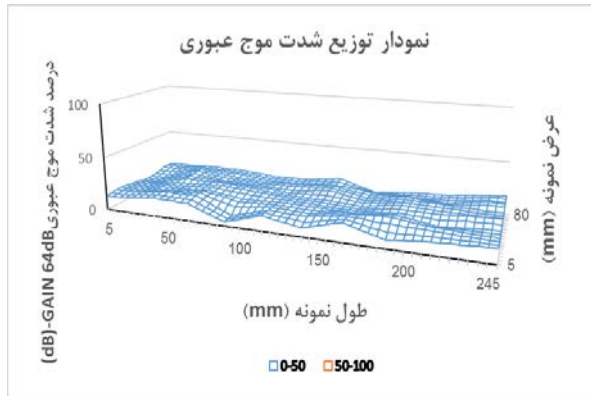
شکل ۸) تصویر سیستم آزمون فراصوتی - عبوری با تکنیک آبفشان

پروب های مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل ۷) تصویر پروب فراصوتی و نازل آبفشان

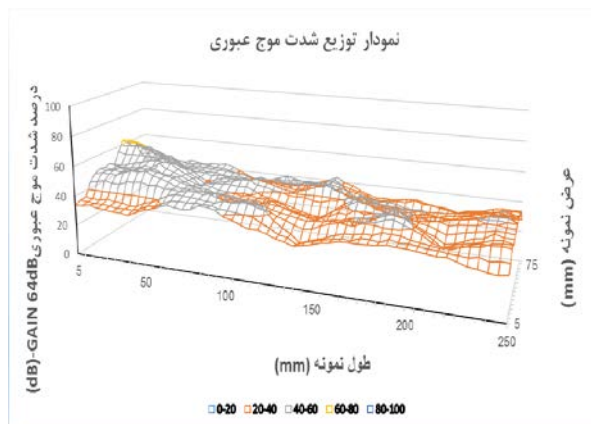
در مقایسه آزمون فراصوتی عبوری و بازتابی باید به این نکته پرداخت که در آزمون فراصوتی بازتابی موج فراصوتی برای بررسی قطعه باید دو بار ضخامت قطعه را ببیماید که این امر موجب افزایش میزان شکست، تضعیف، واگرایی، پراکندگی و انکسار موج می‌شود، بنابراین استفاده از روش عبوری بخصوص در عیب یابی مواد مرکب چند لایه که شکست در مرز لایه‌ها درصد قابل توجهی از امواج ساطع شده را پراکنده کرده و پدیده تضعیف تاثیر بسیار زیادی در کاهش شدت امواج فراصوتی دارد، پیشنهاد می‌شود. در آزمون فراصوتی عبوری جهت اجرای آزمون نیاز به دسترسی به دو سمت قطعه وجود دارد، تا موج فراصوتی از طریق فرستنده در یک سمت قطعه ساطع و توسط گیرنده در دیگر سمت قطعه دریافت شود. به این منظور نیاز است به همراستایی دقیق فرستنده و گیرنده در دو سمت قطعه تا امواج برای سنجش دقیق قطعه با حداکثر شدت و مقدار دریافت شوند و جاروب سطح قطعه به درستی و کامل اجرا شوند. به علت سختی هم راستایی فرستنده و گیرنده در



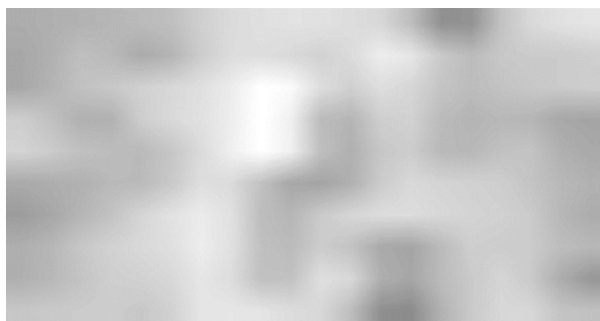
شکل ۱۰) نمودار توزیع شدت موج عبوری نمونه شماره یک



شکل ۱۱) تصویر نتیجه آزمون فراصوتی عبوری روبش-C نمونه شماره دو



شکل ۱۲) نمودار توزیع شدت موج عبوری نمونه شماره دو



شکل ۱۳) تصویر نتیجه آزمون فراصوتی عبوری روبش-C نمونه شماره سه

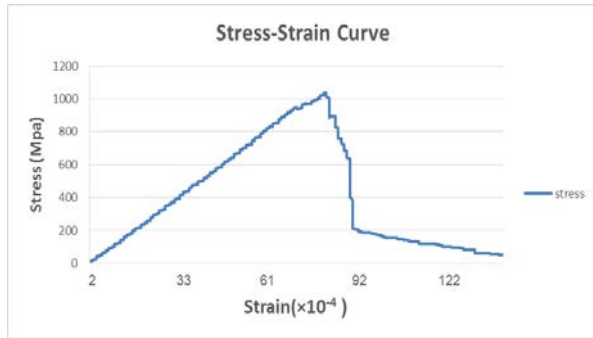
یکی از مهمترین موارد و چالش‌های این روش، کیفیت ستون آب است که بایستی کاملاً یکنواخت و عاری از هرگونه حباب باشد. وجود حباب‌های هوا هرچند بسیار کوچک می‌تواند به شدت بر روی کیفیت، دقت و صحت نتایج تاثیر گذار باشد. لذا کیفیت سطوح نازل‌ها، کیفیت شلنگ‌ها و اتصالات مورد استفاده و همچنین یکنواختی سیال خروجی از پمپ از مهمترین پارامترهای مورد توجه در طراحی یک سیستم آیفشان مناسب است که در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است. در شکل ۸ تصویر دستگاه آزمون فراصوتی مجهز به سیستم آیفشان به منظور ایجاد غوطه وری موضعی بر روی نمونه مورد آزمون آورده شده است. به منظور تبدیل نتایج از حالت روبش - A به روبش - C ویدیو ضبط شده از صفحه اسیلوسکوپ دستگاه آزمون فراصوتی به تعداد مشخصی تصویر تفکیک گردید که در این روش موقعیت مکانی متعلق به هر تصویر با توجه به سرعت ثابت و مشخص دستگاه آزمون فراصوتی معین می‌باشد، در هر نقطه از نمونه ماده مرکب مورد آزمون سه تصویر به روش هاگ لاینز پردازش گردید. میانگین نقطه بیشینه این سه تصویر که بیانگر شدت موج عبوری از نمونه مورد آزمون می‌باشد، به موقعیت مکانی مورد نظر اطلاق گردید. سپس با جمع آوری داده‌های تمامی نقاط نمونه مورد آزمون، ماتریس شدت‌های عبوری موج فراصوتی تشکیل شده. با تبدیل این ماتریس به تصویر نهایی به کمک نرم افزار اکسل روبش - C نمونه مورد آزمون بدست می‌آید.

۲-۱ مشاهده و ارزیابی نتایج

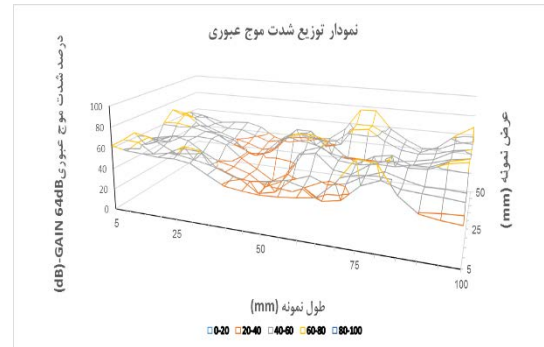
در شکل‌های ۹ تا ۱۶ به ترتیب تصاویر C-scan و نمودار توزیع شدت موج عبوری نمونه‌های ۱ تا ۴ آورده شده است. در شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ نتایج آزمون خمش نمونه‌های ۳ و ۴ قابل مشاهده می‌باشد.



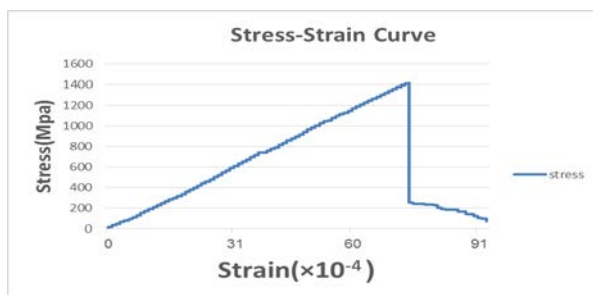
شکل ۹) تصویر نتیجه آزمون فراصوتی عبوری روبش-C نمونه شماره یک



شکل ۱۷) نمودار تنش و کرنش خمشی نمونه شماره سه تکرار اول



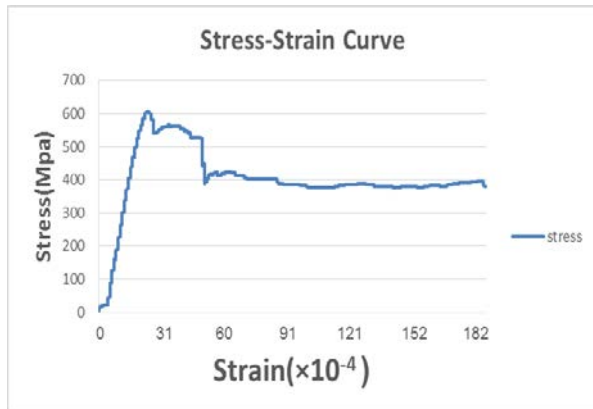
شکل ۱۴) نمودار توزیع شدت موج عبوری نمونه شماره سه



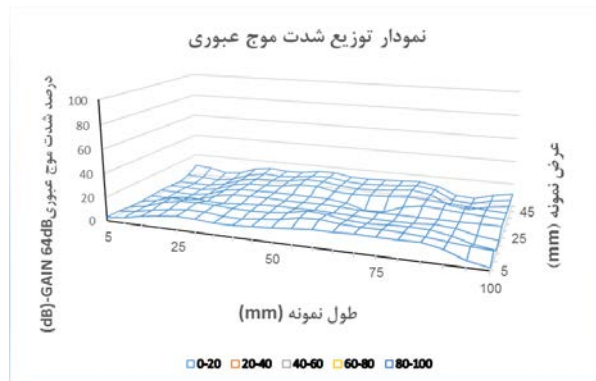
شکل ۱۸) نمودار تنش و کرنش خمشی نمونه شماره سه تکرار دوم



شکل ۱۵) تصویر نتیجه آزمون فراصوتی عبوری روبش C- نمونه شماره چهار



شکل ۱۹) نمودار تنش و کرنش خمشی نمونه شماره چهار تکرار اول



شکل ۱۶) نمودار توزیع شدت موج عبوری نمونه شماره چهار

آزمون خمش سه نقطه‌ای به منظور بررسی خواص نمونه‌ها توسط دستگاه SANTAM STM-50 با نرخ کرنش ۳ mm/min بر روی نمونه‌های ۳ و ۴ انجام شد. نتایج آزمون خمش در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲) نتایج آزمون خمش

| | نمونه سوم | | نمونه چهارم | |
|--------------------------|-----------|------|-------------|-----|
| تعداد لایه | ۵ | | ۱۰ | |
| نیرو شکست (N) | ۲۸۸.۵ | ۴۳۰ | ۶۱۷ | ۵۷۳ |
| استحکام خمشی نهایی (Mpa) | ۱۰۳۹.۹ | ۱۴۱۰ | ۶۰۵.۷ | ۵۷۰ |

افزایش تعداد لایه‌ها باعث کاهش میانگین شدت موج عبوری، افزایش احتمال وقوع عیوب و کاهش استحکام نهایی خمشی می‌شود.

۴- منابع

[1] Kaw, A. K. (2006). Mechanics of composite material (2nd ed.).

[2] Heslehurst, R. B. Defects and Damage in Composite Materials and Structures. CRC Press, Taylor & Francis Group.

[3] Wang, B., He, P., Kang, Y., Jia, J., Liu, X., & Li, N. (n.d.). Ultrasonic Testing of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites.

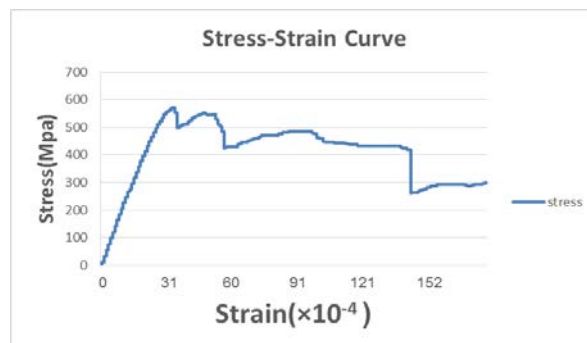
[4] Papa, I., Lopresto, V., & Langella, A. (2021). Ultrasonic inspection of composites materials: Application to detect impact damage. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 4(1), 37–42. doi: 10.1016/j.ijlmm.2020.04.002.

[5] Wróbel, G., Wierzbicki, L., & Pawlak, S. (2007). A method for ultrasonic quality evaluation of glass/polyester composites. Archives of Materials Science and Engineering, 28(12), 729–734. Available online: http://m.www.archivesmse.org/vol28_12/28124.pdf.

[6] Wróbel, G., & Pawlak, S. (2007). A comparison study of the pulse-echo and through-transmission ultrasonics in glass/epoxy composites. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 22(2), 51–54.

[7] Jin, Z., Huo, L., Long, T., Guo, X., Tu, J., & Zhang, D. (2019). An Online Impedance Analysis and Matching System for Ultrasonic Transducers. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 66(3), 591–599. doi: 10.1109/TUFFC.2018.2889073.

[8] Arhamnamazi, S. A., Arab, N. B., Oskouei, A.



شکل ۲۰) نمودار تنش و کرنش خمشی نمونه شماره چهار تکرار دوم

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا نمونه کامپوزیتی از جنس CFRP به روش لایه گذاری دستی ساخته شد. سپس با انجام آزمون فراصوتی توزیع شدت موج عبوری در سطح قطعه و تصویر روبش-C نمونه تهیه گردید. پس از آن دو نمونه خمش از هر قطعه تهیه و آزمون خمش سه نقطه ای بر روی نمونه ها جهت بدست آوردن خواص خمشی انجام شد. با بررسی نمودارهای توزیع شدت موج عبوری مشاهده می‌شود که شدت موج عبوری بسته به نوع عیب در برخی نواحی دچار کاهش و در برخی مواقع افزایش یافته است. به عنوان مثال در نواحی دارای عیب جمع شدگی رزین این شدت موج به علت کاهش میزان شکست و بازتاب موج در مرز لایه‌های الیاف افزایش می‌یابد، ولی عیوبی همچون لایه لایه شدگی و یا ترک ماتریسی باعث شکست، بازتاب و انکسار بیشتر موج و در نتیجه کاهش شدت موج عبوری خواهند شد.

با توجه به نمودارهای تنش-کرنش خمشی نمونه‌های ۳ و ۴ نیرو نهایی شکست با افزایش تعداد لایه ها افزایش ولی استحکام نهایی خمش کاهش یافته است. احتمال داده می‌شود که علت کاهش استحکام نهایی خمش با وجود افزایش تعداد لایه‌ها، افزایش عیوب در حین ساخت و احتمال بیشتر وقوع عیب در نمونه‌ها با تعداد لایه بیشتر می‌باشد. این امر با بررسی نمودار توزیع شدت موج عبوری مشهود است. مشاهده می‌شود که در نمونه‌ها با تعداد لایه بیشتر میانگین شدت موج عبوری بیش از ۳۰ درصد کاهش یافته است که بیانگر عیوب بیشتر در نمونه می‌باشد، همچنین شکست، انکسار و بازتاب در مرز لایه‌ها در نمونه‌ها با لایه بیشتر افزایش می‌یابد، این موضوع نیز در کاهش میانگین شدت موج عبوری موثر است. بنابراین

R., & Aymerich, F. (n.d.). Impact Area Assessment in the Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite using Radiography and Ultrasonic C-scan testing methods.

[9] Braunschweig, W. H. D. Ultrasonic Testing of Composites - From laboratory Research to In-field Inspections. NDT.net.

[10] Papa, I., Lopresto, V., & Langella, A. (n.d.). Ultrasonic inspection of composites materials: Application to detect impact damage.

[11] Kandeil, Y., & Fahr, A. Ultrasonic C-scan inspection of composite material.

[12] Hsu, D. K., & Hughes, M. S. Simultaneous ultrasonic velocity and sample thickness measurement and application in composite.