

بررسی امکان انجام آزمون فراصوتی - عبوری با تکنیک آشفشان در بازرسی غیرمخرب قطعات کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن

داود اکبری^{۱*}، مهدی وجد پور^۲، مهدی شهابی^۳

^۱ استادیار، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده ی مهندسی مکانیک، daakbari@modares.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده ی مهندسی مکانیک

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده ی مهندسی مکانیک

چکیده

امروزه استفاده از قطعات کامپوزیتی در صنایع مختلف مانند صنایع نفت و گاز، هوافضا، صنایع دریایی و صنایع خودروسازی افزایش پیدا کرده است. کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) یکی از کامپوزیت های شناخته شده و پرکاربرد در صنایع هوافضا می باشد. با توجه به کاربرد حساس این نوع کامپوزیت ها انجام بازرسی غیرمخرب امری ضروری می باشد. روش آزمون فراصوتی یکی از پرکاربردترین روش های بازرسی می باشد. اخیرا پژوهش های متعددی در ارتباط با کاربرد آزمون فراصوتی در بازرسی غیر مخرب قطعات CFRP انجام شده است. در این پژوهش امکان انجام آزمون فراصوتی - عبوری با تکنیک آشفشان در بازرسی غیرمخرب قطعات کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) بررسی شد. در این راستا ابتدا نمونه ی مورد آزمایش از جنس اپوکسی - الیاف کربن و به روش لایه چینی دستی ساخته شد. در مرحله ی بعد یک حفره با قطر یک سانتیمتر و به عمق پنج میلیمتر بر روی آن ایجاد گردید. در مرحله ی بعدی آزمون غیر مخرب فراصوتی توسط یک سیستم آشفشان انجام گردید. نتایج آزمون به صورت نمودارهای A-scan مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که آزمون فراصوتی - عبوری از توانایی مناسبی جهت بازرسی قطعات CFRP برخوردار است.

کلمات کلیدی: بازرسی غیرمخرب، آزمون فراصوتی عبوری، تکنیک آشفشان، کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن

۱- مقدمه

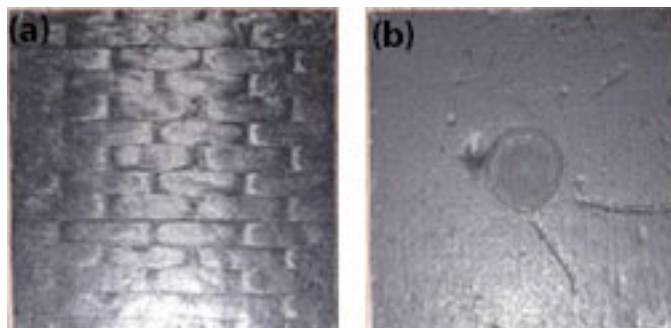
ماده ی مرکب (کامپوزیت) ساختاری است که از ترکیب ماکروسکوپی دو یا چند ماده تشکیل شده است که در یکدیگر حل نمی شوند. یکی از اجزاء تشکیل دهنده فاز تقویت کننده و دیگری فاز زمینه نامیده می شود که به آن ماتریس نیز می گویند. مواد فاز تقویت کننده ممکن است به شکل الیاف، ذرات یا ویسکر باشند. نمونه هایی از سیستم های کامپوزیت شامل بتن تقویت شده با فولاد و اپوکسی تقویت شده با الیاف گرافیت و غیره است [1]. به طور کلی کامپوزیت ها به سه دسته ی کامپوزیت های پایه پلیمری، پایه فلزی و پایه سرامیکی تقسیم بندی می گردند. امروزه استفاده از کامپوزیت های پایه پلیمری در صنایع مختلف افزایش یافته است. از کامپوزیت های پایه گرماسخت تقویت شده با الیاف بلند در زمینه های گوناگون همانند هوافضا، صنایع دریایی، صنایع خودروسازی و صنایع نفت و گاز استفاده می شود. یکی از مشهورترین کامپوزیت های پایه گرماسخت، کامپوزیت های تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) می باشند که در صنایع هوافضا و خودروسازی کاربرد وسیعی دارند. از کامپوزیت های CFRP در صنایع هوافضا در ساخت قطعاتی نظیر بال هواپیما، دم هواپیما و قطعات مشابه دیگر استفاده می شود [2]. با توجه به حساسیت موارد استفاده ی این قطعات، حصول اطمینان از سالم بودن و عملکرد مناسب آن ها امری ضروری است؛ زیرا که وجود عیوب گوناگون می تواند عملکرد این قطعات و در نتیجه عملکرد محصول را تحت تاثیر قرار دهد. این امر می تواند خسارت های جانی و مالی فراوانی به دنبال داشته باشد. ترک، جدایش بین لایه ای، شکستگی الیاف و حفره از رایج ترین عیوب موجود در کامپوزیت های CFRP می باشد. از این رو بازرسی قطعات CFRP مورد استفاده در صنایع هوافضا امری ضروری می باشد. امروزه آزمون های غیر مخرب متنوعی جهت بازرسی قطعات کامپوزیتی همانند قطعات CFRP ارائه شده است. یکی از روش های متداول در صنعت آزمون فراصوتی یا التراسونیک می باشد [3]، [4]. در این روش ابتدا امواج مکانیکی عموماً با فرکانس بالای ۵۰۰ kHz به داخل قطعه ارسال شده و سپس امواج دریافتی مورد بررسی قرار می گیرند. وجود هر نوع ناپیوستگی اعم از عیب، لبه یا پله می تواند در الگوی امواج دریافتی تاثیر بگذارد. بسته به نوع ارسال امواج فراصوتی، روش بازرسی فراصوتی در سه حالت بازتابی یا Pulse-Echo، عبوری یا Through-Transmission و ارسال-دریافت یا Pitch-catch انجام می شود [5]، [6]. پارامتر امپدانس صوتی مشخص می نماید که چه مقدار از امواج فراصوتی در فصل مشترک دو محیط وارد محیط جدید می شوند [7]. با توجه به پایین بودن امپدانس صوتی گازها معمولاً در فصل مشترک فلز - گاز و پلیمر - گاز بازتاب کلی رخ می دهد و امواج وارد محیط جدید نمی شوند. برعکس در محیط های 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 می

توانند وارد محیط جدید شوند. از این رو در روش بازرسی فراصوتی نیاز به یک ماده ی ثالث مابین پروب مولد امواج و قطعه ی مورد بازرسی می باشد تا امواج از طریق آن به داخل قطعه نفوذ کنند. به این ماده کوپلنت گفته می شود. کوپلنت می تواند انواع روغن، آب، گریز و نظایر آن باشد. زمانی که آزمون غیرمخرب بر روی قطعات بزرگ کامپوزیتی انجام می شود، نیاز به صرف زمان زیاد جهت اعمال کوپلنت بر روی سطح قطعه و همین طور بازرسی قطعه وجود دارد. یکی از تکنیک هایی که برای حل این مشکل ارائه شده است، تکنیک آیفشان می باشد. در این تکنیک پروب با استفاده از نازل های آب در احاطه ی فواره ای از آب قرار می گیرد و آب به محل مورد بازرسی پاشیده می شود. از این روش جهت بازرسی قطعاتی که امکان اعمال تکنیک غوطه وری نیست، می توان استفاده کرد. در حوزه ی بازرسی مواد مرکب با استفاده از روش فراصوتی تحقیقات متعددی انجام گرفته شده است. ساویلس و همکاران [7] پژوهشی در ارتباط با عیب یابی مواد مرکب با استفاده از روش آزمون فراصوتی بازتابی انجام دادند. آنها ابتدا نمونه های کامپوزیت CFRP و GFRP با درصد حجمی الیاف و با ضخامت ۳ تا ۵ میلی متر به کمک روش ساخت دستی و نفوذ در خلا ساختند. در مرحله ی بعد عیوب مصنوعی با اندازه های مشخص در این نمونه ها ایجاد نمودند. جهت بازرسی غیر مخرب از مولد فراصوتی مدل ULTRAPAC مجهز به پروب 5 MHz برای تولید امواج فراصوتی و همچنین از یک تانک آب جهت اعمال کوپلنت 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 پروب 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 GFRP و CFRP 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 [5] دو روش بر اساس آزمون فراصوتی در کامپوزیت GFRP انجام دادند. در این پژوهش در مرحله ی اول پنج نمونه ی کامپوزیتی با مساحت حدود 800 mm^2 و ضخامت 10 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 ی ۲ MHz و سپس آزمون فراصوتی با تکنیک بازتابی و با فرستنده ی 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 10 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. سید عباس ارحام نمازی و همکاران [8] دقت نتایج حاصل از بازرسی به روش فراصوتی و رادیوگرافی را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. در این پژوهش از یک کامپوزیت با درصد حجمی ۶۰ درصد الیاف به ضخامت ۴ میلی متر 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. آقای هیلگر و همکاران [9] عیب یابی قطعات کامپوزیتی ساندویچ پنل با هسته لانه زنبوری و پوسته ای از جنس CFRP به ضخامت ۱۴ میلی متر را با روش فراصوتی و با دو کوپلنت هوا و آب انجام دادند. هدف این پژوهش مقایسه ی انتشار موج فراصوتی در دو نوع کوپلنت 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 تا ۰.۸ مگا هرتز استفاده شد. جهت به کارگیری کوپلنت هوا از سیستم AIR TECH4000 استفاده شد. نتایج نشان داد که دقت بازرسی به روش فراصوتی با تکنیک عبوری با به کارگیری کوپلنت هوا در ساندویچ پنل ها بیشتر از کوپلنت 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 2.3 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 یک مگاهرتز جهت تولید امواج فراصوتی با طول موج بالا بهره گرفته شده است.

۲- مواد و روش ها

از رزین اپوکسی گرید LR-620 به عنوان فاز زمینه استفاده شد. از پارچه ی الیاف کربن تک جهته (woven) جهت ساخت کامپوزیت ها استفاده شد. ساخت کامپوزیت ها به روش لایه گذاری دستی انجام گرفت. در مرحله ی اول نمونه های کامپوزیتی الیاف کربن CFRP در ده لایه و با ترتیب لایه چینی $[0,90]$ ساخته شد. در مرحله ی بعدی عیب های حفره ای شکل در مرکز نمونه ها ایجاد شد. شکل ۱ نمونه ی مورد آزمون را نشان می دهد.



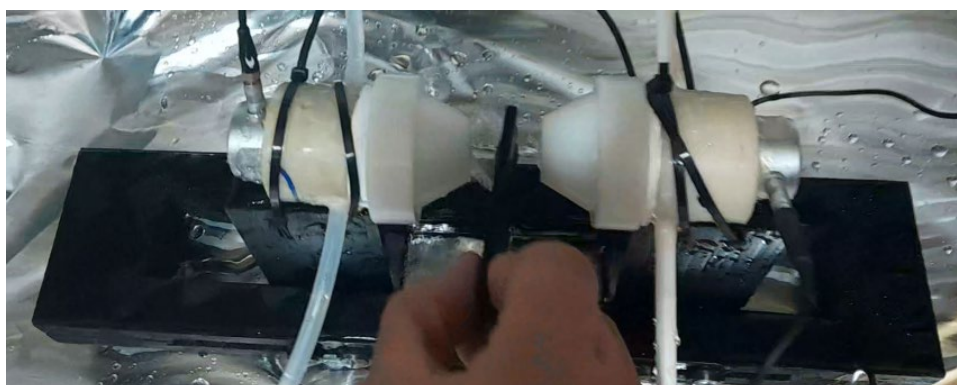
شکل ۱. تصویر نمونه ی CFRP تحت آزمون

از دو پروپ نرمال نوع YS-14671 با قطر ۲۰mm و با فرکانس ۱ MHz جهت تولید و ارسال امواج فراصوتی استفاده شد. دو نازل از جنس تفلون و به شکلی ساخته شد که پروپ ها در مرکز آن قرار گرفته و آب از محیط پروپ به سمت قطعه پاشیده شود. در شکل زیر تصویر نازل و پروپ های مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل ۲. تصویر پروپ فراصوتی و نازل ساخته شده

جهت بازرسی فراصوتی از دستگاه تست فراصوتی Sonatest -D70 استفاده شد. جهت پاشش آب و قرار گرفتن نمونه و پروپ ها سیستم بازرسی فراصوتی آبفشان با تکنیک عبوری به شکل زیر ساخته شد. سرعت موج فراصوتی بر روی ۲۲۰۰ m/s تنظیم شد.



شکل ۳. تصویر سیستم آزمون فراصوتی- عبوری با تکنیک آبفشان

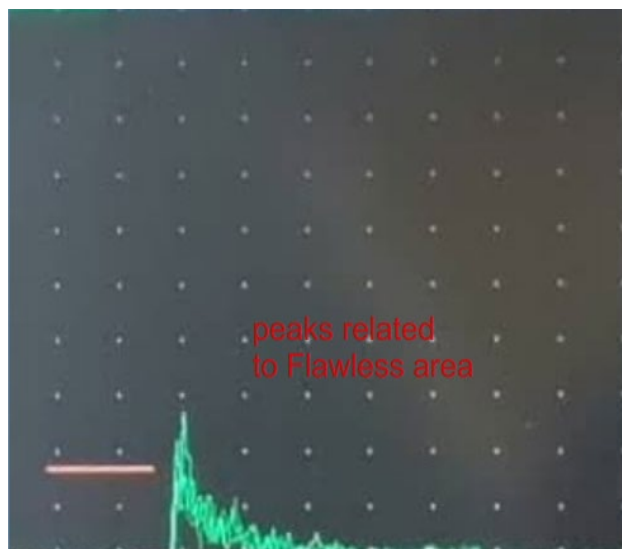
۳- نتایج و بحث

نمودار A-Scan آزمون زمانی که نمونه جایگذاری نشده است، مطابق شکل ۴ می باشد.

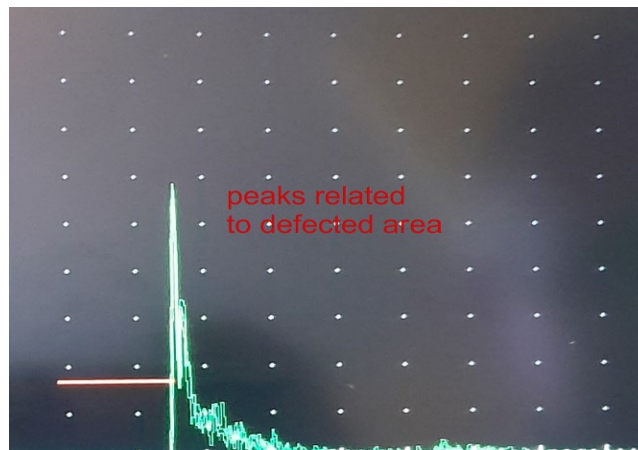


شکل ۴. نمودار A-scan مربوط به سیستم بدون جایگذاری قطعه

در شکل های ۵ و ۶ به ترتیب نمودار A-scan مربوط به نواحی سالم و ناحیه ی دارای عیب قطعه ی کامپوزیتی CFRP نشان داده شده است.



شکل ۵. نمودار A-scan مربوط به قطعه ی CFRP ناحیه ی بدون عیب



شکل ۶. نمودار A-scan مربوط به قطعه ی CFRP ناحیه ی دارای عیب

مشخص است که در ناحیه ی دارای عیب ارتفاع پیک بیشتر از ناحیه ی سالم می باشد. دلیل این امر شکت کمتر موج در مرز لایه ها و جذب کمتر به علت ضخامت کمتر قطعه در ناحیه عیب می باشد.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش ابتدا نمونه ی کامپوزیتی از جنس CFRP به روش لایه گذاری دستی ساخته شد. سپس عیب مصنوعی در داخل قطعه جایگذاری شد. سیستم آزمون بازرسی فراصوتی عبوری با تکنیک آفشان طراحی و ساخته شد. نتایج نشان داد که سیستم آزمون فراصوتی-عبوری با تکنیک آفشان توانایی مناسبی در بازرسی غیر مخرب قطعات کامپوزیتی CFRP دارد.

۵. منابع

- [1] Autar K. Kaw, *Mechanics of composite material*, Second edi. 2006.
- [2] R. B. Heslehurst, *Defects and Damage in Composite Materials and Structures*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [3] B. Wang, P. He, Y. Kang, J. Jia, X. Liu, and N. Li, "Ultrasonic Testing of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites."
- [4] I. Papa, V. Lopresto, and A. Langella, "Ultrasonic inspection of composites materials: Application to detect impact damage," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 4, no. 1. pp. 37–42, 2021. doi: 10.1016/j.ijlmm.2020.04.002.
- [5] G. Wróbel, L. Wierzbicki, and S. Pawlak, "A method for ultrasonic quality evaluation of glass/polyester composites," *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 28, no. 12. pp. 729–734, 2007. [Online]. Available: http://m.www.archivesmse.org/vol28_12/28124.pdf
- [6] G. Wróbel and S. Pawlak, "A comparison study of the pulse-echo and through-transmission ultrasonics in glass / epoxy composites," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 22, no. 2. pp. 51–54, 2007.
- [7] Z. Jin, L. Huo, T. Long, X. Guo, J. Tu, and D. Zhang, "An Online Impedance Analysis and Matching System for Ultrasonic Transducers," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 66, no. 3. pp. 591–599, 2019. doi: 10.1109/TUFFC.2018.2889073.
- [8] S. A. Arhamnamazi, N. B. Arab, A. R. Oskouei, and F. Aymerich, "Impact Area Assessment in the Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite using Radiography and Ultrasonic C-scan testing methods."
- [9] W. H. D. Braunschweig, "Ultrasonic Testing of Composites - From laboratory Research to In-field Inspections," *NDT. net*.

Application of Transmission Ultrasonic Testing Method in Non-Destructive Inspection of Carbon Fiber Reinforced Composites

Davod Akbari^{1*} | Mahdi Vajdpour² | Mahdi Shahabi³

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

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. For this purpose, firstly, the sample fabricated from epoxy-carbon fiber using the hand lay-up method. In the next step, a hole with a diameter of one centimeter and a depth of five millimeters was created on it. In the next step, a non-destructive ultrasonic test was performed by a geyser system. The test results were analyzed in the form of A-scan charts. The results showed that the ultrasonic-passive test has a suitable ability to inspect CFRP parts.

Keywords: Non-destructive inspection, Through transmission test, carbon fiber reinforced composite