Journal of Acoustical Society of Iran, Vol. 13, No. 1, 2025

(Research Article)
Structural Health Monitoring of Carbon Fiber Composites Using Ultrasonic Techniques: An Experimental Study on the Detection and Evaluation of Artificial Defects

Javad Naderifar[1], Reza Sarkhosh[2]*

[1] Faculty of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology

[2] Faculty of Aerospace Engineering, Shahid Sattari University of Aeronautical Sciences and Technology

Received: 2024/09/29, Accepted: 2025/05/16

Abstract:

The structural integrity of carbon fiber-reinforced composites is crucial for advanced industries such as aerospace and automotive. This study aims to evaluate the effectiveness of ultrasonic testing in detecting internal defects in carbon composites and addressing the limitations of conventional non-destructive testing (NDT) methods. For this purpose, a 30 mm thick composite specimen, consisting of a 2D woven fabric (200 g/m²) and epoxy resin 828, was fabricated with controlled defects, including porosities of 0.7 mm in diameter and delaminations at various depths. The Sonic 1000 ultrasonic testing device, equipped with piezoelectric probes, was employed to assess its detection capabilities. Experimental results demonstrated that this technique can accurately detect delaminations up to a depth of 25 mm and porosities as small as 0.7 mm, highlighting its high sensitivity. Compared to alternative NDT methods, ultrasonic testing exhibits superior defect detection capabilities without relying on the electrical conductivity of the material, making it particularly suitable for carbon composites. The results indicate that improving calibration accuracy enhances defect detection precision by up to 25%, contributing to the development of preventive maintenance strategies and increased structural reliability in safety-critical applications.

Keywords: Carbon composite, Ultrasonic calibration, Defect detection, Carbon test block, High-precision calibration, Structural health monitoring.

pp. 8-25 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: R.sarkhosh@ssau.ac.ir

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

مقاله پژوهشی

مجله انجمن علوم صوتی ایران

سال: ۱۴۰۴، دوره: ۱۳، شماره ۱، صفحات: ۸-۲۵

پایش سلامت ساختاری کامپوزیت‌های الیاف کربن با استفاده از تکنیک‌های فراآوایی: مطالعه‌ای تجربی بر تشخیص و ارزیابی عیوب مصنوعی

جواد نادری‌فر[۱]، رضا سرخوش*[۲]

[۱] دانشکده مهندسی هوا-فضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

[۲] دانشکده مهندسی هوا-فضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۶

چکیده

تضمین یکپارچگی ساختاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن برای صنایع پیشرفته‌ای مانند هوافضا و خودروسازی از اهمیت بالایی برخوردار است. این پژوهش با هدف ارزیابی اثربخشی آزمون فراآوایی در شناسایی عیوب داخلی کامپوزیت‌های کربنی و رفع محدودیت‌های روش‌های سنتی آزمون‌های غیرمخرب[۱] انجام شده‌است. به همین منظور، یک نمونه کامپوزیتی به ضخامت ۳۰ میلی‌متر، متشکل از پارچه دو-بعدی ۲۰۰ گرم بر متر مربع و رزین ۸۲۸، با عیوب کنترل‌شده شامل تخلخل‌هایی با قطر ۰/۷ میلی‌متر و لایه‌لایه‌شدگی در اعماق مختلف ساخته شد. دستگاه آزمون فراآوایی سانیک ۱۰۰۰، مجهز به پروب‌های پیزوالکتریک، برای بررسی قابلیت شناسایی این عیوب مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که این روش قادر است لایه‌لایه‌شدگی را تا عمق ۲۵ میلی‌متری و تخلخل‌هایی به کوچکی ۰/۷میلی‌متر را با دقت بالا شناسایی کند که نشان‌دهنده حساسیت بالای این تکنیک است. در مقایسه با روش‌های جایگزین آزمون غیرمخرب، آزمون فراآوایی توانایی بالاتری در شناسایی عیوب داخلی دارد، بدون آنکه به رسانایی الکتریکی ماده وابسته باشد، که این ویژگی آن را برای کامپوزیت‌های کربنی آرمانی می‌سازد. نتایج نشان می‌دهد که دقت واسنجی درتشخیص عیوب تا ۲۵ درصد بهبود می‌بخشد و به توسعه راهکارهای نگهداری پیش‌گیرانه و افزایش قابلیت اطمینان ساختاری در کاربردهای حیاتی ایمنی کمک می‌کند.

کلیدواژه‌ها: کامپوزیت کربنی، واسنجی[۲] فراآوایی، شناسایی نقص، آزمون بلاک کربن، واسنجی با دقت و حساسیت بالا، پایش سلامت سازه‌ای.

۱. مقدمه

کامپوزیت‌های الیاف کربن تقویت‌شده[۳] به دلیل ویژگی‌های مکانیکی برجسته‌شان، تحولی بزرگ در صنایع مختلف ایجاد کرده‌اند [۱-۳]. این مواد از ترکیب الیاف‌های کربنی نازک و محکم با ماتریس پلیمری، معمولاً اپوکسی، تشکیل شده‌اند که مقاومت کششی بسیار بالا و وزن سبکی دارند. این ترکیب، مقاومت به وزن را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد و آن‌ها را برای صنایع حساس نظیر هوافضا [۴-۶]، نظامی[۷]، خودروسازی، ورزش و پزشکی آرمانی می‌کند [۸-۱۰].

علاوه بر استحکام و سختی بالا، این کامپوزیت‌ها مقاومت عالی در برابر خستگی، پایداری حرارتی و مقاومت در برابر دمای بالا، اصطکاک و خوردگی دارند. با این حال، ساختار پیچیده آن‌ها می‌تواند منجر به مشکلاتی نظیر تورق، ترک‌های ماتریسی و شکست الیاف شود. با پیشرفت‌های علمی و فناورانه، استفاده از کامپوزیت‌های الیاف کربن به

* نویسنده پاسخگو: R.sarkhosh@ssau.ac.ir

[1] Non-destructive Test
[2] Calibration
[3] CFRP; Carbon Fiber Reinforced Polymer

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

دلیل عملکرد بی‌نظیرشان به‌طور گسترده‌ای افزایش یافته‌است.

به دلیل تأثیر فرآیند ساخت، عوامل محیطی و شرایط تصادفی نظیر ضربه و خستگی، نقص‌ها و آسیب‌ها در تولید مواد کامپوزیت‌های الیاف کربن اجتناب‌ناپذیرند. در بسیاری از موارد، این عیوب و آسیب‌ها با چشم غیرمسلح به سختی قابل تشخیص هستند و می‌توانند خطرات پنهانی برای استفاده بعدی ایجاد کنند. بنابراین، با گسترش کاربرد مواد کامپوزیتی الیاف کربن، نیاز به اطمینان از کیفیت و ایمنی این مواد افزایش یافته است.

عیوب و آسیب‌ها می‌توانند تأثیر جدی بر کیفیت و عملکرد مواد داشته باشند و عمر مفید آن‌ها را به طور قابل توجهی کاهش دهند. برای اطمینان از کیفیت و قابلیت اطمینان بالای قطعات کامپوزیت‌های الیاف کربن، تشخیص عیب و نظارت بر کیفیت در فرآیند تولید و خدمات با استفاده از فناوری‌های غیرمخرب ضروری است تا مشکلات پنهان به موقع شناسایی شوند [۱۱].

تشخیص عیوب در کامپوزیت‌های الیاف کربن و اجزای آن به دلیل پیچیدگی ساختار داخلی آن‌ها چالش‌برانگیز است.

علامت‌های نقص در اجزای کامپوزیت‌های الیاف کربن با تکنیک‌ها و ساختارهای مختلف به شکل‌های متفاوتی بروز می‌کنند و تشخیص ارتباط بین این علامت‌ها دشوار است [۱۳,۱۲]. برای جلوگیری از خطرات پنهان ناشی از نقص مواد کامپوزیتی الیاف کربن، محققان فناوری‌های مختلفی را برای تشخیص این عیوب و آسیب‌ها توسعه داده‌اند.

روش‌های رایج تشخیص شامل استفاده از اشعه ایکس، جریان گردابی، نفوذ، فراآوایی و امواج حرارتی مادون قرمز است. حسگرهای نوری نیز به طور مداوم در حال توسعه هستند و الیاف نوری پلیمری به عنوان سنسور برای تشخیص استفاده می‌شوند [۱۴-۱۶].

پرتو ایکس به‌دلیل توان بالای خود در تصویربرداری از ساختارهای درونی، یکی از روش‌های پیشرفته برای شناسایی ناپیوستگی‌های داخلی به‌شمار می‌رود. با این‌حال، هزینه زیاد و نیاز به تجهیزات ایمنی در برابر تابش‌های یون‌ساز، موجب محدودیت کاربرد آن در صنایع مختلف شده‌است. روش جریان گردابی برای آشکارسازی ترک‌ها و عیوب در مواد فلزی مناسب است، ولی در مورد مواد کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن، به‌دلیل هدایت الکتریکی پایین، از کارایی لازم برخوردار نیست. آزمون‌های حرارتی فروسرخ نیز در تشخیص ناپیوستگی‌های سطحی مؤثر هستند، اما توانایی لازم برای شناسایی دقیق آسیب‌های درونی را ندارند. در مقابل، روش‌های فراآوایی به‌عنوان یکی از رایج‌ترین شیوه‌های آزمون غیرمخرب در مواد کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن شناخته می‌شوند. این روش‌ها با قابلیت نفوذ در عمق سازه و بازتاب امواج از نواحی معیوب، امکان استخراج اطلاعات دقیق از عیوب داخلی را فراهم می‌سازند. با این وجود، مشکلاتی نظیر افت دقت در شناسایی ترک‌های ریز یا ناپیوستگی‌های عمقی، تأثیر ناهمسانگردی ماده بر انتشار امواج، و نیاز به هم‌سنجی دقیق دستگاه، همچنان از چالش‌های جدی این فناوری به‌شمار می‌روند. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که شبه‌سنج[1]هایی مانند نوع مبدل، تنظیمات دستگاه و الگوریتم پردازش علامت، نقش مهمی در افزایش دقت تشخیص ایفا می‌کنند. با این‌حال، در بسیاری از مطالعات پیشین، فرآیند هم‌سنجی که شامل اجرای مکرر آزمایش و مقایسه علامت‌ها با داده‌های مرجع است، به‌طور کامل بررسی نشده‌است [۱۷].

هدف پژوهش حاضر، پرداختن دقیق به این بخش مغفول و ارتقاء قابلیت اطمینان در تشخیص آسیب‌های درونی است. مواد کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن به‌دلیل نسبت بالای استحکام به وزن، مقاومت در برابر خوردگی و پایداری حرارتی، در ساخت سازه‌های پیشرفته مانند بدنه‌ی هواپیماها، خودروهای سبک‌وزن و پل‌های جدید به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ترکیبات

[1] Parameter

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

با کاهش جرم سازه، افزایش راندمان سوخت و افزایش عمر مفید قطعات، تحولی اساسی در صنایع هوافضا و خودروسازی ایجاد کرده‌اند. با این‌حال، ماهیت چندلایه و ناهمسانگرد این مواد، آن‌ها را مستعد آسیب‌هایی مانند ترک‌های زمینه‌ای، ورقه‌ای‌شدن لایه‌ها و شکست ناشی از ضربه می‌سازد.

ازاین‌رو، توسعه سامانه‌های نظارت بر سلامت سازه و بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته‌ی آزمون غیرمخرب، برای تشخیص زودهنگام آسیب‌ها، افزایش ضریب اطمینان و کاهش هزینه‌های نگهداشت ضروری است. در این میان، فناوری‌های فراآوایی همچنان جایگاه کلیدی دارند، ولی چالش‌های فنی نظیر هم‌سنجی دقیق و تحلیل رفتار امواج در مواد ناهمسانگرد، لزوم انجام پژوهش‌های تکمیلی را نشان می‌دهد [۱۸].

در این پژوهش، ابتدا روش‌های پایش سلامت کامپوزیت‌های الیاف کربن و عیوب متداول موجود در آن‌ها به‌طور دقیق مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌است. این تحلیل شامل شناسایی و طبقه‌بندی عیوب به‌منظور ارتقای دقت و کارایی سامانه[1]های تشخیصی است. یکی از نوآوری‌های برجسته این مقاله، طراحی و ساخت یک آزمون بلاک استاندارد است که بر اساس منابع معتبر توسعه یافته‌است. این آزمون بلاک با هدف ارتقای دقت آزمون‌های فراآوایی و بهبود نتایج پایش سلامت کامپوزیت‌ها به کار می‌رود. با انجام تنظیمات دقیق دستگاه‌های مربوطه و واسنجی مؤثر، دقت پایش سلامت کامپوزیت‌های الیاف کربن به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. این دستاورد می‌تواند مبنای تحقیقات و کاربردهای آتی در حوزه آزمایش‌های غیرمخرب و پایش سلامت مواد کامپوزیتی قرار گیرد.

۱-۱. روش‌های پایش سلامت کامپوزیت الیاف کربن [۱۹]

در حوزه‌ی پایش سلامت مواد کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن، بهره‌گیری از فناوری‌های فراآوایی در سامانه‌های پایش سلامت سازه[2]، پایش سلامت و عملکرد تجهیزات[3]، و پایش سلامت پیش‌گیرانه[4] نه تنها ضروری، بلکه به‌عنوان بخش جدایی‌ناپذیر از ارزیابی‌های پیشرفته مطرح است. در این میان، واسنجی دقیق تجهیزات فراآوایی برای دستیابی به دقت بالا در شناسایی آسیب‌ها و تحلیل صحیح داده‌های حاصل، از اهمیت بسزایی برخوردار است.

روش‌های فراآوایی به‌دلیل توانایی در شناسایی غیرمخرب، دقیق و عمیق آسیب‌های ساختاری مانند ترک، حفره و ناپیوستگی‌های ریز، به ابزار مؤثری در نظارت پیوسته بر سلامت سازه‌های کامپوزیت بدل شده‌اند. در سامانه‌های پایش سلامت سازه، حسگرهای توزیع‌شده‌ی فراآوایی و الیاف نوری نقش کلیدی در ثبت تغییرات فیزیکی ایفا می‌کنند و برای عملکرد صحیح آن‌ها، هم‌سنجی دقیق و منظم الزامی است تا قابلیت تشخیص به‌موقع و دقیق آسیب‌ها تضمین شود.

به‌طور مشابه، در سامانه‌های پایش سلامت و عملکرد تجهیزات که برای رصد بلندمدت وضعیت عملکردی سازه‌ها در طول عمر کاری آن‌ها طراحی شده‌اند، استفاده از امواج فراآوایی نیازمند واسنجی دقیق و پیوسته است. این امر به دستگاه‌ها امکان می‌دهد تا خرابی‌ها و تخریب‌های تدریجی را به‌درستی تشخیص داده و اقدامات نگهداری پیشگیرانه را به‌موقع فعال کنند.

در سامانه‌های پایش سلامت پیش‌گیرانه که عمدتاً در صنایع تولید انرژی به‌کار می‌روند، تنظیم دقیق دستگاه‌های فراآوایی با هدف شبیه‌سازی شرایط عملکردی و پیش‌بینی رفتار سازه در برابر تنش‌های محیطی، ضروری است. در این کاربردها، تحلیل دقیق علامت‌های بازتابی و استفاده از تصویربرداری پیشرفته فراآوایی، امکان پیش‌بینی دقیق عمر باقی‌مانده سازه‌ها را فراهم می‌سازد.

در نهایت، تلفیق فناوری فراآوایی با سامانه‌های پایش سلامت پیشرفته، زمانی مؤثر واقع می‌شود که فرآیند واسنجی به‌درستی انجام شده باشد. این اقدام، دقت شناسایی آسیب‌ها را افزایش داده، هزینه‌های تعمیرات و

[1] System
[2] Structural health monitoring
[3] HUMS; Health and Usage Monitoring Systems
[4] PHUMS; Prognostic Health and Usage Monitoring Systems

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

نگهداری را کاهش داده و موجب افزایش طول عمر مؤثر سازه‌های کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن خواهد شد.

۱-۲. ساختار الیاف کربن

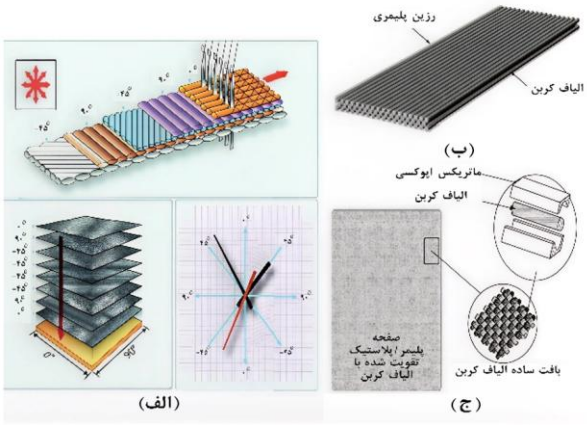
کامپوزیت الیاف کربن از ترکیب الیاف کربن و رزین پلیمری ساخته می‌شود. الیاف کربن به عنوان عنصر تقویت‌کننده، استحکام را فراهم می‌کند و رزین پلیمری به عنوان ماتریس، الیاف را در جای خود نگه می‌دارد [۲۰]. عملکرد و ویژگی‌های الیاف کربن به نحوه قرارگیری الیاف کربن بستگی دارد، مطابق شکل ۱ (الف) [۲۱]

رایج‌ترین ساختار الیاف کربن، قرارگیری الیاف به صورت یک‌جهته است مطابق شکل ۱ (ب) که در آن تمامی الیاف کربن به صورت موازی و در یک جهت چیده می‌شوند. هم‌چنین، ساختار دیگری مطابق شکل۱ (ج) وجود دارد که در آن الیاف کربن به صورت متقاطع قرار می‌گیرند که این نوع ساختار مقاومت الیاف کربن در برابر آسیب را افزایش می‌دهد. [۲۱]

ترکیب الیاف کربن و رزین پلیمری به ساختار ویژگی‌های برجسته‌ای می‌بخشد؛ از جمله سبکی، استحکام بالا و مقاومت در برابر خوردگی. این ویژگی‌ها باعث می‌شود در کاربردهای متنوع، مطابق با شکل ۲، از الیاف کربن استفاده شود. در شکل ۲، در بخش (الف)، قسمت‌هایی از بال و بدنه پهن پیکر هواپیمای ایرباس A۳۵۰ با استفاده از ۵۲ درصد الیاف کربن، [۲۵,۲۴] ساخته شده‌است. در بخش (ب)، استفاده گسترده از الیاف کربن در خودروهای مسابقه‌ای، [۲۶] نشان داده شده‌است. در بخش (ج) [۲۷]، از یک پروتز با الیاف کربن در زمینه پزشکی استفاده شده‌است. در بخش (د) کفش‌های دویدن با محافظ و صفحات کربن، [۲۸] نمایش داده شده‌اند.

۱-۳. عیوب‌های رایج در کامپوزیت الیاف کربن

آسیب‌های ناشی از نقص، عامل اصلی شکست الیاف کربن به شمار می‌آیند. تحت تأثیر فرآیند تولید، عوامل محیطی و شرایط تصادفی، بروز نقص و آسیب در الیاف کربن اجتناب‌ناپذیر است و این آسیب‌ها مشابه دیگر کامپوزیت‌های الیاف کربن هستند، از جمله ترک‌خوردن ماتریس [۲۹]، جدا شدن رابط الیاف و ماتریس [۳۱,۳۰]، شکست الیاف [۳۳,۳۲]، جدایش لایه‌ها [۳۵,۳۴] و حفره‌ها [۳۷,۳۶].



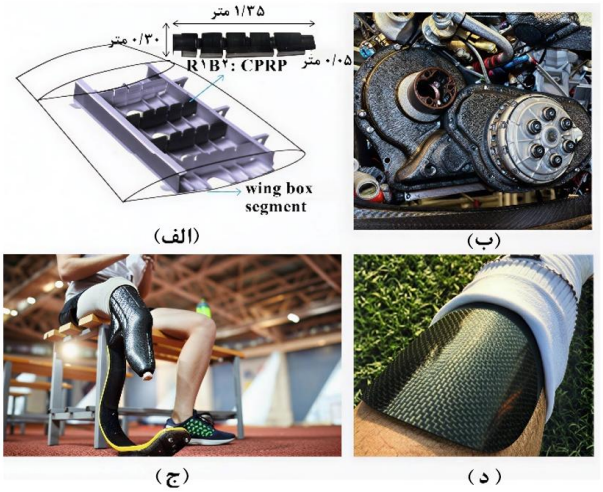
شکل ۱ (الف) توضیح فرمت زاویه جهت گیری الیاف کربن [۲۱].
(ب) هم‌چنین ساختار موازی و یک جهته شکل [۲۲].
(ج) هم‌چنین ساختارمتقاطع [۲۳].

ترک‌خوردن ماتریس نوعی جدی از آسیب‌ها در کامپوزیت‌هاست. مواد کامپوزیتی در اثر بارگذاری استاتیک و خستگی، با تشکیل میکروترک‌ها آغاز به شکست می‌کنند و این ترک‌ها به سرعت گسترش می‌یابند و باعث ترک‌خوردگی جمعی می‌شوند [۲۹].

شکل ۳ (الف) رشد اولیه ترک‌ها که موازی با جهت الیاف است، به سختی ماتریس بستگی دارد و استفاده از رزین‌های مقاوم‌تر می‌تواند به بهبود ویژگی‌های ماتریس منجر شود [۳۸].

جدا شدن الیاف به طور عمده به دلیل اصطکاک بین رابط الیاف و ماتریس است. اصطکاک و تغییر شکل الیاف تأثیر زیادی بر استحکام کامپوزیت دارد [۳۹] و باعث جدا شدن الیاف می‌شود. مطالعه‌ای از فاراد و همکاران [۳۱] به بررسی ارتباط بین جدا شدن نانوسکوپی و شکست چند حالته در کامپوزیت‌های الیاف کربن مطابق شکل ۳ (ب) پرداخته‌است.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]



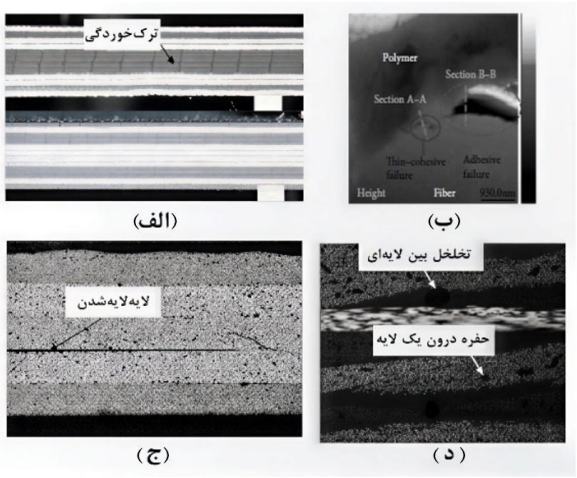
شکل ۲ کاربرد الیاف کربن در صنایع مختلف وکاربردهای خاص [۲۴-۲۸].

عیوب تورق در مواد کامپوزیتی بسیار شایع است مطابق با شکل ۳ (ج) [۴۰]، تورق و لایه‌لایه‌شدگی کامپوزیتی، جدا شدن بین لایه‌ها منجر به ترک‌ها و ایجاد شکاف‌های بزرگ می‌شود. علت اصلی لایه‌لایه‌شدگی عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی بین ماتریس و الیاف، زمان نگهداری طولانی، مواد تقویت‌کننده بدون عملیات سطحی، شوک‌های خارجی و غیره است [۴۱].

هم‌چنین، در حین سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها ممکن است تورق رخ دهد [۴۲]. تورق بین لایه‌های الیاف کربن یکی از جدی‌ترین نوع عیب‌ها در محصولات کامپوزیت‌های ماتریس رزینی الیاف کربن است که استحکام فشاری و سختی ماده را کاهش‌داده و بر یکپارچگی ساختاری تأثیر می‌گذارد. تحت بار مکانیکی یا حرارتی، تورق در ساختار ادامه می‌یابد که ممکن است در شرایط بحرانی به شکست ماده منجر شود.

به وجود آمدن فضاهای خالی در کامپوزیت الیاف کربن در حین فرآیند قالب‌گیری، حفره نامیده می‌شود و یکی از عیوب اصلی الیاف کربن محسوب می‌شود [۴۳, ۴۴] شکل ۳ (د) حفره‌ها به دو نوع الیاف (شامل حفره‌های موجود در دسته‌های الیاف) و لایه‌ای تقسیم می‌شوند. هنگامی که تخلخل کم‌تر از ۱/۵ درصد باشد، حفره‌ها کروی‌اند و در تخلخل‌های بیش‌تر از ۱/۵درصد، حفره‌ها استوانه‌ای و موازی با محور الیاف هستند.

حفره‌ها در کامپوزیت‌های الیاف کربن عمدتاً بر استحکام برشی بین‌لایه‌ای، استحکام و مدول خمشی طولی و عرضی، استحکام و مدول کششی طولی و عرضی و استحکام و مدول فشاری تأثیر می‌گذارند.



شکل ۳ عیوب‌های رایج در کامپوزیت الیاف کربن [۴۴,۴۳,۴۰,۳۸,۳۱].

۱-۴. واسنجی دستگاه‌های فراآوایی برای کامپوزیت‌های الیاف کربن

آزمون فراآوایی یکی از روش‌های مهم ارزیابی غیرمخرب برای سنجش سلامت و یکپارچگی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن به‌شمار می‌رود. مطالعات اخیر بر پیشرفت‌های فناوری فراآوایی و روش‌های واسنجی ویژه این دسته از مواد تمرکز دارند.

فرآیند واسنجی شامل تعیین استانداردهای مرجع برای تضمین صحت و دقت اندازه‌گیری است. این فرآیند از طریق نمونه‌هایی با ضخامت و ویژگی‌های صوتی مشخص انجام می‌شود [۴۵].

تحولات نوین در حوزه امواج هدایت‌شده فراآوایی، توان شناسایی دقیق نقص‌های درونی این کامپوزیت‌ها را به‌شکل چشمگیری افزایش داده‌اند. در این میان، جای‌گذاری دقیق حسگرها و تحلیل مناسب علامت‌ها به واسنجی دقیق وابسته است [۴۶].

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

به‌ویژه، بهره‌گیری از روش تمرکز کل[1] (بر مبنای ساخت الگوهای موج در زوایای متفاوت) موجب بهبود چشمگیر در تصویرسازی ساختاری و تشخیص دقیق‌تر آسیب‌ها شده‌است. این تکنیک می‌تواند ساختار درونی مواد را با دقت بیش‌تری بازنمایی کند [۴۷].

یکی از چالش‌های اصلی در این حوزه، دشواری شناسایی عیوب پیچیده درون ساختار کامپوزیت‌های الیاف کربن است. تنوع بالای آسیب‌ها مانند لایه‌لایه‌شدگی و نابسامانی‌های الیاف، تشخیص را با محدودیت مواجه می‌سازد. این موارد نیازمند روش‌هایی نوین و واسنجی دقیق‌تری هستند. روش‌هایی چون تمرکز کل با تفسیر پیشرفته علامت‌های صوتی، ظرفیت بالایی در تفکیک این عیوب دارند [۴۸].

نبود استانداردهای جامع و قابل اعتماد برای شبیه‌سازی دقیق نقص‌ها، از چالش‌های اساسی در فرآیند واسنجی محسوب می‌شود. بسیاری از روش‌های رایج شبیه‌سازی، نمی‌توانند شرایط واقعی عیوبی نظیر لایه‌زدایی یا تخلخل را بازآفرینی کنند و ممکن است نتایج ناقصی ارائه دهند. به همین دلیل، توسعه معیارهای استاندارد شبیه‌سازی و روش‌های بهینه‌ی واسنجی ضرورت دارد.

هرچند فناوری‌هایی نظیر حسگرهای نوری و سامانه‌های تصویربرداری پیشرفته، ظرفیت بالایی برای شناسایی دقیق آسیب‌ها دارند، اما عملکرد آن‌ها به شدت به شرایط عملیاتی وابسته‌است. عواملی همچون تغییرات دما و فشار می‌توانند دقت این سامانه‌ها را کاهش دهند، ازاین‌رو نیازمند واسنجی پیوسته در شرایط واقعی عملکرد هستند [۴۹].

در محیط‌های صنعتی، نوسانات عوامل محیطی مانند دما، فشار و ارتعاش بر عملکرد تجهیزات فراآوایی تأثیرگذارند. این تغییرات در فرآیندهای تولید و پایش سلامت، دقت آزمون‌های غیرمخرب را کاهش می‌دهند. در نتیجه، توسعه روش‌هایی که قادر به انطباق با این نوسانات باشند و به‌طور مداوم کالیبره شوند، از اهمیت بالایی برخوردار است [۵۰].

در مجموع، واسنجی دستگاه‌های فراآوایی برای ارزیابی کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف کربن، تنها یک نیاز فناورانه نیست بلکه خود بخشی از فرآیند نوآورانه پایش سلامت محسوب می‌شود. پیچیدگی ساختاری این مواد، نبود استانداردهای جامع، حساسیت به شرایط محیطی و چالش‌های پردازش داده‌ها ایجاب می‌کند که روش‌های سنتی جای خود را به راهکارهای نوین، هوشمند و سازگار بدهند. در این پژوهش، این موضوع به‌شکل نظام‌مند بررسی شده‌است.

۱-۵. فناوری فراآوایی جهت تشخیص عیوب کامپوزیت الیاف کربن

فناوری فراآوایی یکی از کارآمدترین روش‌های غیرمخرب برای شناسایی آسیب‌ها در مواد کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن محسوب می‌شود. این روش با ارسال امواج صوتی با بسامد بالا به درون ماده و تحلیل بازتاب‌های حاصل، قادر به شناسایی دقیق نواقصی نظیر ترک، لایه‌لایه‌شدگی و تخلخل است.

به دلیل ماهیت غیرمخرب، این فناوری موجب حفظ ساختار فیزیکی ماده شده و نقشی کلیدی در تضمین سلامت آن ایفا می‌کند.کاربرد گسترده فناوری فراآوایی در بازرسی الیاف کربن، موجب افزایش کیفیت و اطمینان‌پذیری این مواد در صنایع گوناگون شده‌است.

این فناوری به‌ویژه در صنایع هوایی، خودروسازی و انرژی، به‌عنوان ابزاری مؤثر برای پایش سلامت سازه‌ها به‌کار گرفته می‌شود و نقش مهمی در کاهش ریسک‌های عملیاتی دارد. برای پیشگیری از ایجاد آسیب در کامپوزیت‌های الیاف کربن، دو رویکرد اساسی باید مدنظر قرار گیرد. نخست، کنترل دقیق بر تمامی مراحل ساخت، از انتخاب مواد اولیه تا تولید و حمل‌ونقل نهایی، ضروری است. استفاده از مواد باکیفیت، به‌کارگیری استانداردهای

[1] Total focusing method

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

به‌روز و پایش فرآیند تولید، می‌تواند احتمال بروز نقص را کاهش دهد.

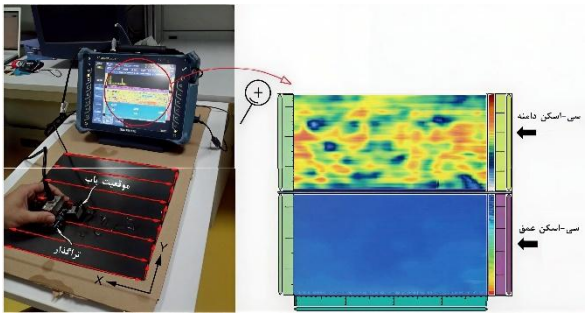
در کنار کنترل فرآیند تولید، شناسایی به‌موقع آسیب‌ها و پایش پیوسته‌ی ساختار کامپوزیت‌ها اهمیت بالایی دارد. بهره‌گیری از روش‌های نوین پایش در زمان واقعی، به‌ویژه از طریق فناوری‌های فراآوایی، امکان تشخیص زودهنگام ناهنجاری‌ها را فراهم می‌کند و از گسترش آسیب در طول عمر سازه جلوگیری می‌نماید.

۱-۶. پایش براساس روش فراآوایی

آزمایش سی‌اسکن[1] فراآوایی یکی از روش‌های اصلی در آزمون‌های غیرمخرب برای ارزیابی کیفی و کمی مواد کامپوزیت به‌شمار می‌رود. این روش، توانایی بالایی در شناسایی دقیق عیوب داخلی مانند لایه‌لایه‌شدگی، تخلخل و ترک‌های ریز دارد و بدون آسیب به نمونه، اطلاعات ساختاری مهمی را فراهم می‌کند. فناوری سی‌اسکن، علاوه‌بر تشخیص نواقص، امکان بررسی ریزساختار داخلی و ترکیب ماده کامپوزیت، شامل نحوه توزیع الیاف و خواص کشسانی آن را فراهم می‌سازد. این روش بر پایه اصول تصویربرداری سی‌اسکن و بی‌اسکن[2] عمل می‌کند و یک ابزار مؤثر برای تصویربرداری بصری و دقیق از سطح مقطع نمونه‌ها است. در میان روش‌های موجود، سی‌اسکن با مبدل صوتی تک‌عنصری[3]، پرکاربردترین شیوه در آزمون مواد کامپوزیت محسوب می‌شود. برخلاف روش‌های مخرب، این تکنیک به ساختار نمونه آسیبی نمی‌زند و اطلاعات تصویری واضحی از نواحی آسیب‌دیده ارائه می‌دهد. فرآیند سی‌اسکن معمولاً به‌صورت غوطه‌وری در آب انجام می‌شود، که در آن آب به‌عنوان واسط انتقال امواج فراآوایی عمل می‌کند. با وجود مزایای این شیوه، تماس نمونه با آب ممکن است ویژگی‌های مکانیکی یا سطحی آن را تحت‌تأثیر قرار دهد و نیازمند بررسی‌های تکمیلی در شرایط واقعی باشد. تحقیقات اخیر در این زمینه شامل موارد زیر است: سانگپینگ و همکاران [۵۱]، تکنیک سی‌اسکن عمقی فراآوایی را برای شناسایی عیوب درالیاف کربن معرفی کردند. واو و همکاران [۵۲]، فناوری ادغام اطلاعات چند حسگری را برای شناسایی عیوب در سی‌اسکن فراآوایی پیشنهاد کردند. هاسیوتیس و همکاران [۵۳]، از فناوریسی‌اسکن برای شناسایی عیوب مصنوعی در الیاف کربن استفاده کردند و ضخامت نمونه را با دقت اندازه‌گیری کردند. شیانو و همکاران [۵۴]، آسیب‌های ناشی از تنش حرارتی در لایه‌های الیاف کربن را با استفاده از سی‌اسکن شناسایی کردند. گائو [۵۵]، به بررسی تأثیر روش‌های مختلف قرارگیری لایه‌های الیاف کربن بر نتایج آزمایش عیوب با استفاده از سی‌اسکن فراآوایی به روش جت آب پرداخت. نتایج نشان داد که مانع‌گذاری در قسمت بالایی تأثیر بیش‌تری دارد، در حالی که مانع‌گذاری در قسمت پایینی دومین تأثیر را داراست و تأثیرات کناری کم‌تر از سایرین است.

فناوری سی‌اسکن فراآوایی به دلیل بسامد بالا و نفوذپذیری خوب، به انتخاب اولیه برای شناسایی سریع و دقیق عیوب لایه‌گذاری و جداشدگی در اجزای بزرگ کامپوزیت، مانند قطعات هواپیما تبدیل شده‌است.

پاترونن و همکاران [۵۶] نیز عیوب احتمالی جداشدگی در ساختارهای لایه‌ای چند لایه بین صفحات بال الیاف کربن و اتصالات تیتانیومی جنگنده‌ها را شناسایی و با تحلیل تغییرات فاز و دامنه امواج فراآوایی در سطح تماس، عیوب بزرگ‌تر از ۴ میلی‌متر را شناسایی کردند.



شکل ۴ فناوری سی‌اسکن جهت پایش سلامت کامپوزیت الیاف کربن.

[1] C-scan
[2] B-scan
[3] Single element method

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

۲. مواد و روش‌ها

به منظور انجام یک پژوهش تجربی دقیق و ارزیابی نتایج ابتدا نیاز است تا از دقت و صحت ساخت آزمون بلاک کامپوزیتی، مواد و تجهیزات و مراحل ساخت طبق استاندارد[1]، دقت دستگاه فراآوایی جهت سنجش عیوب، طی فرآیند ساخت و ایجاد عیوب مصنوعی طبق استانداردهای خاص آزمون غیرمخرب[2] تحت شرایط خاص محیطی و تاثیر آن پرداخت.

برای بررسی و مقایسه حساسیت روش فراآوایی، نیاز به ساخت یک آزمون بلاک کامپوزیتی با رعایت استاندارد مطلوب جهت انجام آزمایشات و آزمون‌های تجربی است. این آزمون بلاک باید به گونه‌ای طراحی شود که بتواند به خوبی تفاوت‌ها و حساسیت در ساخت آزمون بلاک کامپوزیت الیاف کربن سنجش روش را در شرایط مختلف نشان دهد.

آزمون بلاک کامپوزیت الیاف کربن تقویت‌شده به طور کلی از دو عنصر اصلی تشکیل شده‌است. ماتریس پلیمری و الیاف کربن که ابتدا در مرحله نخست پارچه توییل ۲۰۰ گرم دوجهته که به عنوان الیاف انتخاب شده به اندازه‌های مورد نیاز برش داده شد و به طور منظم در زوایای مختلف جهت ایجاد ساختار یکنواخت چیده شده‌است.

به منظور جلوگیری از آلودگی، پارچه‌ها در یک محیط تمیز و خشک قرار داده شد. در مرحله بعد به تهیه ماتریس پلیمری که همان رزین اپوکسی است پرداخته شد. رزین اپوکسی با افزودن مواد شیمیایی خاص به یک ترکیب پایه تهیه می‌شود. این ترکیب پس از تغییر فاز از حالت مایع به حالت جامد به عنوان ماتریس برای الیاف کربن عمل می‌کند. در این پژوهش از رزین اپوکسی ۸۲۸ با هاردنر ورسال مید با نسبت رزین به هاردنر ۵۵ درصد رزین و ۴۵ درصد هاردنر استفاده شده‌است.

در این پژوهش برای افزایش غلظت مواد و افزایش خواص چسبندگی، نرمی و خاصیت صیقل از پودر اروزیل استفاده گردیده‌است پس از آماده‌سازی الیاف کربن و ماتریس پلیمری، آن‌ها با هم ترکیب شده‌اند. الیاف کربن در یک قالب قرار می‌گیرند و ماتریس پلیمری به آن‌ها اضافه می‌شود.

سپس از روش فشرده‌سازی برای تراکم الیاف و ماتریس استفاده می‌شود. این فرآیند باعث ایجاد تعامل بین الیاف کربن و ماتریس پلیمری و تشکیل ساختار کامپوزیتی می‌شود.

پس از تراکم، به منظور سخت‌شدن بیش‌تر، کامپوزیت الیاف کربن به یک فرآیند خشک کننده منتقل می‌شود. در این مرحله، حرارت و فشار مورد نیاز برای سخت‌شدن ماتریس پلیمری به کار گرفته می‌شود. که در نهایت کامپوزیت الیاف کربن از لحاظ مقاومت مکانیکی و سختی نهایی تقویت می‌شود.

۲-۱. مشخصات پودر اروزیل و رزین ۸۲۸

پودر اروزیل[3] یک ترکیب شیمیایی بوده که امروزه به نام سیلیس پیروژنیک هم شناخته می‌شود. در این ترکیب مقدار بسیار زیادی سیلیس وجود دارد، اروزیل ترکیبی بسیار سبک و پرحجم است و در هر موادی وارد شود آن را ویسکوز و پایداری فیزیکی را افزایش خواهد داد.

ساختار سه-بعدی اروزیل باعث شده تا به عنوان تقویت‌کننده و ضخیم‌کننده پیوندها معرفی شود. فوم سیلیکا مورد استفاده دراین پژوهش با نام ایروزیل-۲۰۰ است که خواص فیزیکی و مکانیکی آن مطابق با داده‌های فنی در جدول ۱ آورده شده‌است.

رزین ۸۲۸ یک رزین اپوکسی مایع و شفاف با گرانروی متوسط است. رزین ۸۲۸ از واکنش بین بیسفنول و آبی کلرو هیدرین تولید شده و در این رزین از هیچ رقیق‌کننده‌ای استفاده نشده‌است.

رزین اپوکسی ۸۲۸ پس از پخت دارای استحکام مکانیکی و شیمیایی بالایی است زمان ژل شدن رزین ۴۵ دقیقه و زمان خشک شدن ۶ تا ۸ ساعت است.

[1] ASNT materials and equipment guidelines

[3] Fumed silica

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

جدول ۱ مشخصات فوم سیلیکا مورد استفاده در پژوهش (مرجع: شرکت سازه کامپوزیت).

ویژگی	مقدار یا نام
نام	فوم سیلیکا-۲۰۰
ماهیت ظاهری	گرد
دانسیته توده (گرم بر لیتر)	حدود ۵۰
مقدار سیلیسیوم دی‌اکسید(درصد)	≤ ۹۹
مساحت سطح ویژه (گرم بر مترمربع)	۲۰۰ ± ۵۰

۲-۲. فرآیند آماده‌سازی تولید آزمون بلاک کامپوزیتی الیاف کربن

برای انجام آزمایش‌های تجربی و ارزیابی دقت و حساسیت روش‌های تشخیصی در کامپوزیت‌های الیاف کربن، ساخت بلوک آزمون با عیوب مصنوعی ضرورت دارد. این عیوب شامل حفره‌ها (فضاهای تهی) [1] و تورق‌ها (لایه‌زدایی) [2] هستند که به‌صورت کنترل‌شده در فرآیند تولید ایجاد می‌شوند.

به منظور شبیه‌سازی حفره‌های داخلی، در حین لایه‌گذاری الیاف کربن، از اجسام کوچک کروی‌شکل مانند ساچمه‌های فلزی با قطر ۰/۷ میلی‌متر استفاده می‌شود. این اجسام در موقعیت‌های مشخص بین لایه‌ها قرار گرفته و پس از اتمام فرآیند پخت و سخت‌شدن رزین، به‌وسیله روش‌های مکانیکی از ساختار خارج می‌شوند؛ نتیجه این کار، ایجاد حفره‌هایی با ابعاد و موقعیت‌های دقیق در عمق‌های مختلف بلوک آزمون است.

برای شبیه‌سازی تورق، در حین لایه‌گذاری، فیلم‌های نازک جداساز پلی‌اتیلنی با ضخامت میکرونی در موقعیت‌های موردنظر بین لایه‌های الیاف کربن قرار داده می‌شوند. این فیلم‌ها به‌عنوان مانع چسبندگی عمل کرده و پس از پخت، نواحی بدون اتصال (تورق) را در ساختار ایجاد می‌کنند.

در این مطالعه، سه فیلم جداساز در عمق‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متری از سطح انتهایی بلوک آزمون تعبیه شدند تا تورق در این سطوح به‌وجود آید.این روش‌های دقیق در ایجاد عیوب مصنوعی، امکان ارزیابی مؤثرتر و واسنجی دقیق‌تر دستگاه‌های تشخیصی را فراهم می‌کنند. با بهره‌گیری از این بلوک آزمون، می‌توان عملکرد و دقت روش‌های آزمون غیرمخرب در شناسایی و تحلیل عیوب داخلی کامپوزیت‌های الیاف کربن را به‌طور مؤثری ارزیابی کرد [۵۷].

پس از ساخت این بلوک آزمون، باید با تنظیم دقیق و واسنجی دستگاه، شبه‌سنج‌های مختلف را مورد بررسی قرار دهیم. این شامل تشخیص سرعت اعمالی دقیق، حذف امواج نوفه‌ای و اغتشاشی و افزایش نسبت علامت به نوفه دستگاه می‌شود. تنظیمات و آزمون‌های دقیق انجام شده روی قطعه کامپوزیتی ساخته‌شده به منظور اطمینان از عملکرد صحیح دستگاه مطابق با شکل (۵) اعمال گردید.

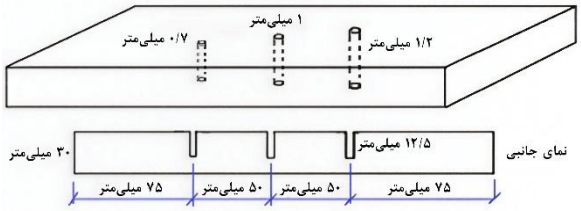
شکل ۵ تنظیمات واسنجی دستگاه با بلوک‌های استاندارد و مولدهای بسامدهای مختلف.

شکل ۶ آزمون بلاک‌های ساخته شده از از الیاف کربن در ضخامت‌های ۳۰ میلی‌متر با پارچه توییل ۲۰۰ گرم دوجهته.

[1] Voids

[2] Delaminations

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]



شکل ۷ ایجاد سوراخ مصنوعی در آزمون بلاک ساخته‌شده با ضخامت ۳۰.

برای ایجاد عیوب مصنوعی در بلوک آزمون کامپوزیت الیاف کربن، حفره‌هایی با قطرهای ۰/۷، ۱ و ۱/۲ میلی‌متر در عمق ۱۲/۵ میلی‌متری از سطح بلوک ساخته شده‌است؛ همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌است.

علاوه بر این، سه عدد فیلم جداساز به‌عنوان عیب تورق در عمق‌های مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متری از انتهای بلوک قرار داده شده‌اند. این تنظیمات به منظور شبیه‌سازی و ارزیابی دقیق‌تر عیوب و افزایش حساسیت آزمون‌ها انجام شده‌است.

در این مطالعه، ضخامت بلوک آزمون کامپوزیت الیاف کربن برابر با ۳۰ میلی‌متر انتخاب شده‌است. این ضخامت برای شبیه‌سازی قطعات صنعتی با ضخامت‌های مشابه و فراهم کردن امکان ارزیابی نفوذ امواج فراآوایی و تشخیص عیوب در عمق‌های مختلف در نظر گرفته شده‌است. قطر ۰/۷ میلی‌متر حفره‌ها بر اساس حداقل اندازه عیوب قابل شناسایی توسط دستگاه‌های فراآوایی مدرن انتخاب شده‌است. مطالعات نشان داده‌اند که دستگاه‌های فراآوایی قادر به شناسایی عیوب، با قطر حداقل ۰/۸ میلی‌متر تا عمق ۲۵ میلی‌متر هستند. بنابراین، انتخاب قطر ۰/۷ میلی‌متر با هدف افزایش حساسیت دستگاه در شناسایی عیوب کوچکتر و در عمق بیش‌تر نسبت به مقادیر گزارش‌شده، صورت گرفته‌است [۵۸,۵۷]. این روش‌ها و انتخاب‌ها با استناد به پژوهش‌های پیشین و به‌منظور بهبود دقت و کارایی روش‌های تشخیص عیوب در کامپوزیت‌های الیاف کربن انجام شده‌اند.

۲-۳. انتخاب مولد مناسب وتنظیمات تجربی اعمالی

برای آزمون یک بلوک کامپوزیت الیاف کربن با ضخامت ۳۰ میلی‌متر با استفاده از دستگاه فراآوایی، تنظیم دقیق شبه‌سنج‌های عملیاتی دستگاه برای دستیابی به نتایج بهینه الزامی است. این شبه‌سنج‌ها شامل قطر مولد، بسامد کاری، زاویه مولد و سایر تنظیمات عمومی دستگاه می‌باشند.

استفاده از بلوک‌های واسنجی استاندارد، نظیر مدل V_1 که مطابق با استانداردهای بین‌المللی طراحی و ساخته شده‌اند، در این فرآیند ضروری است. این نوع بلوک‌ها معمولاً دارای سوراخ‌هایی با قطرهای مشخص هستند که برای واسنجی دقیق دستگاه‌های فراآوایی کاربرد دارند.

پس از انتخاب بلوک واسنجی مناسب، تنظیم شبه‌سنج‌های دستگاه باید به‌گونه‌ای انجام گیرد که دقت اندازه‌گیری و توان تفکیک دستگاه به حداکثر برسد. جزئیات این تنظیمات در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

برای کالیبره‌کردن دستگاه فراآوایی سانیک ۱۰۰۰، ابتدا با استفاده از بلوک واسنجی و تنظیمات مشخص‌شده، دستگاه را تنظیم می‌کنیم. در این فرآیند، پالس‌هایی به بلوک واسنجی ارسال شده و علامت‌های بازتابی از سوراخ‌ها و سطوح استاندارد دریافت می‌شوند.

با مقایسه زمان‌های تأخیر و شدت علامت‌های دریافتی با مقادیر استاندارد، صحت عملکرد دستگاه ارزیابی می‌شود. نتایج واسنجی به‌صورت دقیق ثبت شده و با استفاده از جدول ۳ مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه در جدول ۳ تنظیمات بعد از واسنجی و نتایج تجربی به دستگاه اعمال گردید.

خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت الیاف کربن مورد استفاده برای آزمون‌های فراآوایی پس از فرآیند ساخت، در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

هم‌چنین، مشخصه‌های علامت بازتابی از دیوار پشتی[1] در بسامدها و ضخامت‌های مختلف، با استفاده از دستگاه فراآوایی تک‌المان[2]، به تفکیک در جدول ۵ آورده شده‌اند.

[1] Backwall Echo

[2] Single element ultrasonic device

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

جدول ۲ شبه‌سنج‌های مهم وتاثیر گذار در واسنجی دستگاه فراآوایی.

بسامد مولد[1]	انتخاب بسامد مناسب بر اساس نوع بلوک واسنجی و ضخامت مورد نظر.
دامنه پالس[2]	تنظیم دامنه پالس به‌گونه‌ای که علامت‌های ارسالی و دریافتی به‌وضوح قابل تشخیص باشند.
مدت زمان پالس[3]	تنظیم مدت زمان پالس برای اطمینان از دریافت کامل علامت‌های بازتابی.
بهره[4]	تنظیم بهره برای تقویت علامت‌های ضعیف و بهبود وضوح تصویر.
صافی پایین‌گذر و بالاگذر[5]	تنظیم این صافی‌ها برای حذف نوفه‌های بسامدی خارج از محدوده مورد نظر.
فاصله اولیه[6]	تنظیم فاصله اولیه برای تعیین عمق شروع اندازه‌گیری.
سرعت صوت[7]	تنظیم سرعت صوت بر اساس کامپوزیت الیاف کربن.

جدول ۳ تنظیمات دقیق دستگاه فراآوایی برای پایش سلامت بلوک ۳۰ میلی‌متری الیاف کربن.

تنظیمات دستگاه	مقادیر تنظیم‌شده
قطر مولد	۱۰ میلی‌متر
بسامد مولد	۵ مگاهرتز
زاویه مولد	۴۵-۰ درجه
دامنه پالس	۴۰۰ ولت
مدت زمان پالس	۰٫۵ میکرو ثانیه
بهره	۱۴٫۲تا ۶۰ دسی بل
صافی پایین گذر	۰٫۵ تا ۱٫۵ مگاهرتز
صافی بالا گذر	۲٫۵ تا ۵ مگاهرتز
فاصله اولیه	۵ تا ۱۰ میکروثانیه
سرعت صوت عمود بر الیاف	۱۵۷۴ متر بر ثانیه
نسبت علامت به نوفه	۳٫۲۲

در این محاسبات، واسنجی دقیق به طور کلی عملکردی حدود ۲۵ درصد بهتر از واسنجی معمولی در شبه‌سنج‌هایی مانند نسبت علامت به نوفه، بهره و زمان نشان می‌دهد.

جدول ۴ خواص مواد کامپوزیت الیاف کربن تقویت‌شده جهت آزمون فراآوایی پس از ساخت.

خواص	کامپوزیت الیاف کربن	واحد
چگالی[8]	۱۶۰۰	کیلوگرم بر مترمکعب
هدایت الکتریکی[9]	۱٫۸	وات بر متر.کلوین
قابلیت گسیل حرارت[10]	۴۹٫۱۸۵	وات-ثانیه به توان یک دوم بر کلوین-متر
سرعت صوت[11]	۱۵۷۴	متر بر ثانیه
امپدانس صوتی[12]	۲۵۱۹۰۰۰	کیلوگرم بر مترمربع-ثانیه

به عنوان مثال، اگر مقدار علامت به نوفه در واسنجی دقیق برابر با ۳٫۰۷ باشد، این عدد به ظاهر پایین‌تر از مقدار ۹٫۷۶ در واسنجی معمولی است که نشان‌دهنده کیفیت علامت پایین‌تر به نظر می‌رسد.

جدول ۵ مشخصه علامت دیوار پشتی در بسامدها و ضخامت مختلف با روش فراآوایی با دستگاه فراآوایی تک عنصری[13].

روش	بسامد (مگاهرتز)	نسبت علامت به نوفه	زمان	بهره	ضخامت (میلی‌متر)
تنظیمات دقیق دستگاه	۱٫۵	۳٫۰۷	۱۱	۶۰٫۵	۵
		۲٫۵۳	۱۸٫۹	۱۸٫۹۲	۱۰
		۶٫۵۷	۹٫۸	۳۹٫۶	۱۵
تنظیمات استاندارد دستگاه	۱/۵	۹٫۷۶	۹٫۷۶	۴۰٫۸	۵
		۹٫۴۳	۱۸٫۲	۴۶٫۷	۱۰
		۹٫۴۴	۱۸٫۲	۴۸٫۷	۱۵

[1] Probe frequency
[2] Pulse amplitude
[3] Pulse duration
[4] Gain
[5] Low/high pass filter
[6] Initial range
[7] Sound velocity

[8] Density (ρ)
[9] Electrical conductivity (σ)
[10] Thermal effusivity (e)
[11] Speed of sound (c)
[12] Acoustic impedance (Z)
[13] Single element ultrasonic test

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

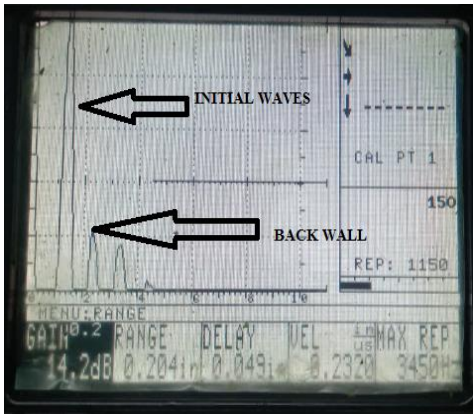
باید توجه داشت که در واسنجی دقیق، علامت تولید شده از کیفیت بالاتری برخوردار است؛ به عبارتی، کاهش نوفه و افزایش دقت اندازه‌گیری رخ داده‌است. بنابراین، مقدار کم‌تر علامت به نوفه در این حالت می‌تواند به معنای دقت و صحت بیش‌تر در فرآیند واسنجی باشد، نه کاهش کیفیت علامت.

۲-۴. آزمون آزمون فراآوایی

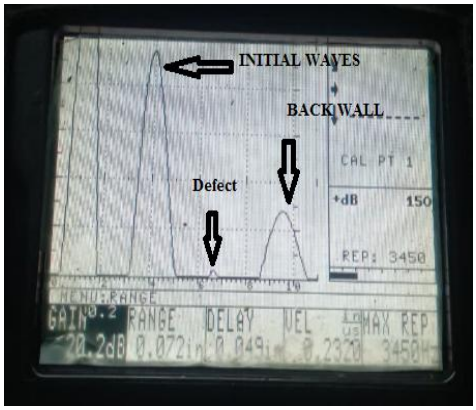
یکی از جنبه‌های کلیدی در ارزیابی مواد کامپوزیتی، قابلیت نفوذ علامت فراآوایی در ساختار الیاف و بازتاب از دیواره پشتی آن است که بیانگر کارایی دستگاه فراآوایی در تمرکز و انتشار علامت‌ها است. در این آزمایش‌ها، پروبی با بسامد ۵ مگاهرتز به‌کار گرفته شده تا جذب علامت‌های فراآوایی در بسامدهای مختلف بررسی شود.
دستگاه فراآوایی سانیک ۱۰۰۰، به دلیل دقت بالا و قابلیت اطمینان، برای انجام این آزمون انتخاب گردیده‌است (شکل ۵). این دستگاه با بهبود نسبت علامت به نوفه، نقش مؤثری در کاهش تأثیر نوفه و اغتشاشات دارد و در نتیجه دقت تشخیص عیوب را افزایش می‌دهد. از آنجا که آزمایش‌های فراآوایی در تضمین کیفیت و یکپارچگی ساختارهای کامپوزیتی اهمیت فراوانی دارند، تنظیمات دقیق و واسنجی صحیح دستگاه ضروری است.

۳. نتایج

در این مقاله با توجه به دستگاه موجود و آزمون بلاک ساخته شده در ضخامت ۳۰ میلی‌متر از روش فراآوایی برای پیدا کردن مشخصه‌های علامت برگشتی استفاده شده‌است. به این منظور یک آزمون بلاک از جنس کامپوزیت با مشخصات مواد گفته شده ساخته شده و عیوب مصنوعی رایج در آن ایجاد شده سپس از آزمون فراآوایی برای تشخیص این عیوب استفاده شده‌است. ویژگی‌های علامت انعکاس از دیوار پشتی[1] در روش فراآوایی با بسامد ۵ مگاهرتز در شکل ۸ و علامت عیب در شکل ۹ ثبت گردید.



شکل ۸ پاسخ علامت دیوار پشتی برای کامپوزیت الیاف کربن با بسامد ۵ مگاهرتز، ضخامت ۳۰ میلی‌متر.



شکل ۹ پاسخ علامت عیب برای الیاف کربن با بسامد ۵ مگاهرتز، ضخامت ۳۰ میلی‌متر، قطر سوراخ ۰/۷ میلی‌متر و عمق سوراخ ۱۲/۵ میلی‌متر.

بهبود انتقال علامت با تنظیم دقیق زوایای الیاف و یکنواخت سازی فاز زمینه، منجر به کاهش پراکندگی امواج صوتی و افزایش وضوح و دقت علامت دریافتی می‌شود. این تنظیمات امکان انتقال موثرتر امواج فراآوایی در ماده را فراهم کرده و ناهنجاری‌های ساختاری که معمولاً منبع نوفه در آزمون‌های فراآوایی هستند، کاهش می‌یابد.

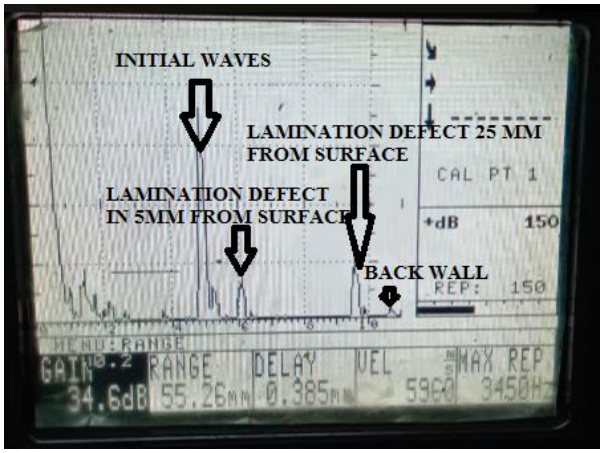
[1] Back wall

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

در نتیجه، با تغییر چیدمان و یکنواخت‌سازی، دقت در تشخیص عیوبی مانند ترک‌ها، لایه‌لایه شدن یا ناپیوستگی‌ها افزایش می‌یابد و امواج فراآوایی به صورت پایدارتر و منظم‌تر از میان ساختار عبور می‌کنند.
در نهایت، اصلاح چیدمان زوایای الیاف و یکنواخت‌سازی فاز زمینه می‌تواند به بهبود کلی عملکرد فراآوایی و افزایش دقت آن در تشخیص عیوب و نواقص منجر شود.

۳-۱. بررسی عیوب تورق و جدایش الیاف کربن

با توجه به خاصیت کامپوزیت‌ها به دلیل کامپوزیت‌بودن فاز زمینه و الیاف و حساس بودن دستگاه فراآوایی به سرعت صوت، پیدا کردن عیوب تورق با دستگاه فراآوایی پیچیده است. برای سنجش حساسیت سامانه و پیدا کردن عیوب تورق، به علت پیچیدگی ساختار، تاثیرات شرایط محیطی و زوایای چینش الیاف ابتدا مشخصات هندسی و ضخامت آزمون بلاک به دستگاه داده شد. در این مرحله واسنجی با تنظیمات دقیق بایستی طوری صورت گیرد که دستگاه توانایی ثبت علامت از دیواره پشتی را داشته باشد.
هم‌چنین با تنظیم دقیق و استفاده از صافی‌های پایین گذر و بالا گذر، نوفه و اغتشاش تضعیف شد. بعد از انجام این مراحل، علامت مدنظر و مشخصات دیتا دستگاه از جمله سرعت صوت ثبت شد. مجدداً مولد ۵ مگاهرتز رو بر روی عیوب تورق قرار داده شد اگر در همان بازه تعریف شده بین علامت اولیه و علامت دیوار پشتی پیک علامت ایجاد گردد علامت عیب تورق هست.
در این پژوهش دو علامت عیب یکی در ۵ میلی‌متری از سطح و دیگری در ۲۵ میلی‌متری از ضخامت ۳۰ میلی‌متری، عیب توسط دستگاه فراآوایی سانیک ۱۰۰۰ با روش فراآوایی تک المانی تشخیص داده شد.
این کار بیان‌کننده تجربه انسانی در واسنجی دقیق و قدرت دستگاه در تفکیک است که برای سنجش این عیوب، دوتا عمق مطرح بوده که عمق نزدیک به سطح به علت برگشت‌پذیری علامت فراآوایی از تداخل سطح و اهمیت آن که تکفیک‌پذیری عیب مشکل است و سنجش بیش‌ترین عمق که مبین عمق نفوذ است. اگرچه در این روش پیدا کردن عیب تورق در این نوع کامپوزیت ساخته شده با آزمون‌های زیاد و روش‌های مقایسه‌ایی و ثبت تنظیمات مجدد صورت گرفته است.



شکل ۱۰ نمای دستگاه فراآوایی در پیدا کردن عیب مصنوعی تورق.

همان‌طور که در شکل ۱۰ نمایش داده شده‌است، ضخامت قطعه طراحی شده و اکو عیب تورق در تصویر با خطای جزیی مشاهده می‌گردد اگرچه به دلیل آنیزوتروپیک بودن ساختارهای کامپوزیتی و عدم تنظیم دقیق سرعت دستگاه روش آزمون با روش فراآوایی نیاز به کاربر با تجربه و ساخت آزمون بلاک‌های خاص برای هرنوع کاربری است.

۴. بحث

طبق نتایج این تحقیق، فرآیند واسنجی دقیق دستگاه فراآوایی سانیک ۱۰۰۰ منجر به شناسایی موفق عیوب ساختاری، از جمله جدایش و حفره‌ها در کامپوزیت‌های الیاف کربن شد. روش بازرسی که معمولاً از مولدهای تک‌عنصری استفاده می‌کنند، با محدودیت‌هایی نظیر تضعیف بالای علامت و نسبت علامت به نوفه پایین مواجه‌اند که تشخیص نقص‌ها در مواد کامپوزیتی را دشوار می‌کند.
با این حال، تشخیص این عیوب به دلایل متعددی چالش‌برانگیز است. ساختار ناهمسانگرد کامپوزیت‌ها

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

موجب پراکندگی و تضعیف امواج فراآوایی می‌شود که دقت تشخیص را کاهش می‌دهد. هم‌چنین، انعکاس و پراکندگی امواج به دلیل وجود لایه‌های مختلف با چگالی و سرعت صوت متفاوت، تفسیر نتایج را پیچیده‌تر می‌کند.

عیوب حفره‌ای و جدایش‌هایی که در عمق زیادی از ساختار رخ می‌دهند، به دلیل ضعف علامت‌های بازگشتی، شناسایی‌شان دشوارتر است که در شکل (۹) نمایش داده شده‌است. جدایش‌های کوچک نیز ممکن است به دلیل ابعاد کم و بازتاب ضعیف، از دید سامانه‌های تشخیص پنهان بمانند.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که فرآیند واسنجی دقیق دستگاه فراآوایی سانیک ۱۰۰۰ نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقاء حساسیت و دقت شناسایی عیوب ساختاری، از جمله جدایش و حفره‌های داخلی در کامپوزیت‌های الیاف کربن دارد.

در بازرسی‌های فراآوایی معمولی که معمولاً از مولد[1]های تک‌عنصری استفاده می‌شود، مشکلاتی نظیر تضعیف شدید علامت و نسبت علامت به نوفه پایین باعث محدودیت در دقت تشخیص و کاهش قابلیت شناسایی نواقص می‌شود. این محدودیت‌ها در مواد کامپوزیتی با ساختار ناهمسانگرد ولایه‌ای[2] بیش‌تر به چشم می‌آیند و مستقیماً بر کیفیت داده‌های فراآوایی تأثیرگذار هستند.

ساختار چندلایه کامپوزیت‌های الیاف کربن، متشکل از لایه‌هایی با چگالی و خواص مکانیکی متفاوت، موجب پراکندگی[3]، انکسار[4] و تضعیف امواج فراآوایی می‌شود. این اثرات به‌ویژه در بسامدهای بالا انرژی علامت‌های بازگشتی را کاهش داده و دقت شناسایی عیوب داخلی را محدود می‌کنند.

اختلاف سرعت صوت و چگالی بین لایه‌ها باعث بازتاب‌های چندگانه[5] و تداخل امواج[6] می‌شود که در ساختارهایی با چینش پیچیده الیاف بیش‌تر مشاهده می‌شود. این امر موجب افزایش نوفه و تحریف داده‌ها شده و جداسازی علامت‌های مرتبط با عیوب را دشوار می‌کند.

عیوب عمیق یا واقع در مرزهای بین‌لایه‌ای به دلیل تضعیف شدید علامت‌های بازگشتی، شناسایی دشواری دارند. هم‌چنین، جدایش‌های کوچک[7] ممکن است بازتاب کافی برای آشکارسازی توسط سامانه‌های استاندارد ایجاد نکنند، خصوصاً وقتی در راستای الیاف قرار گرفته و امواج فراآوایی به‌صورت ناکافی پراکنده شوند.

برای رفع این چالش‌ها و افزایش دقت سامانه‌های فراآوایی در تشخیص عیوب کامپوزیتی، استفاده از روش‌های پیشرفته پردازش علامت نظیر تحلیل موجک[8] و الگوریتم‌های بازسازی تصویر ضروری است که می‌تواند نوفه را کاهش داده و تفکیک عیوب را بهبود بخشد.

علاوه بر این، به‌کارگیری روش‌های تصویربرداری آرایه فازی[9] و امواج هدایت شونده[10] با ارائه تصویر چند-بعدی، امکان تفکیک دقیق‌تر و شناسایی بهتر نواقص ساختاری را فراهم می‌کند. بهینه‌سازی فرآیند واسنجی از طریق انتخاب بسامد مناسب و استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود[11] نیز به افزایش نسبت علامت به نوفه و دقت اندازه‌گیری کمک می‌کند. مجموع این اقدامات، بهبود چشمگیری در قابلیت تشخیص غیرمخرب عیوب کامپوزیتی ایجاد می‌کند و تضمین‌کننده کیفیت و ایمنی قطعات صنعتی است.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که واسنجی دقیق دستگاه فراآوایی سانیک ۱۰۰۰ تأثیر چشمگیری در افزایش حساسیت و دقت شناسایی عیوب ساختاری مانند جدایش‌ها و حفره‌های داخلی در مواد کامپوزیتی الیاف کربن دارد. در بازرسی‌های فراآوایی معمولی که معمولاً از مولدهای تک‌عنصری استفاده می‌شود، مشکلاتی مانند تضعیف شدید علامت و نسبت پایین علامت به نوفه، باعث

[1] Transducer
[2] Anisotropic and laminated structure
[3] Scattering
[4] Refraction
[5] Multiple reflections
[6] Wave interference
[7] Small delaminations
[8] Wavelet analysis
[9] PAUT; Phased Array Ultrasonic Testing
[10] Guided waves
[11] FEM; Finite Element Method

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

کاهش دقت تشخیص و محدود شدن توانایی شناسایی نقص‌ها می‌شود.

این محدودیت‌ها به دلیل ناهمسانگردی و ساختار لایه‌ای کامپوزیت‌ها، تأثیر منفی قابل توجهی بر کیفیت داده‌های فراآوایی دارد. ساختار لایه‌ای کامپوزیت‌های الیاف کربن با چگالی و خواص مکانیکی متفاوت، باعث پراکندگی، انکسار و تضعیف امواج فراآوایی می‌شود.

این اثرات در بسامدهای بالا بیش‌تر نمایان شده و انرژی علامت‌های بازگشتی را کاهش می‌دهد که منجر به کاهش دقت در تشخیص عیوب داخلی می‌شود. هم‌چنین، اختلاف سرعت صوت و چگالی بین لایه‌ها باعث ایجاد بازتاب‌های متعدد و تداخل امواج می‌گردد که در ساختارهای پیچیده‌تر، شدیدتر است و به ایجاد نوفه و تحریف داده‌ها منجر می‌شود.

عیوب عمیق یا واقع در مرزهای میان‌لایه‌ای به دلیل تضعیف شدید علامت‌ها، شناسایی سخت‌تری دارند. جدایش‌های کوچک نیز ممکن است بازتاب کافی برای تشخیص توسط سامانه‌های استاندارد ایجاد نکنند، به ویژه اگر در راستای الیاف قرار گرفته باشند و امواج به‌درستی پراکنده نشوند. برای رفع این مشکلات و افزایش دقت، استفاده از روش‌های پردازش علامت پیشرفته مانند تحلیل موجک و الگوریتم‌های بازسازی تصویر ضروری است که باعث کاهش نوفه و افزایش دقت تفکیک عیوب می‌شود.

به‌کارگیری روش‌های ترکیبی مانند تصویربرداری آرایه فازی و امواج هدایت‌شده، امکان ایجاد تصویر چندبعدی را فراهم کرده و تفکیک بهتری از نواقص ساختاری ارائه می‌دهد. بهینه‌سازی واسنجی با انتخاب بسامد مناسب و استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، نسبت علامت به نوفه را بهبود بخشیده و دقت اندازه‌گیری را افزایش می‌دهد. این اقدامات موجب ارتقاء چشمگیر در تشخیص غیرمخرب عیوب کامپوزیتی می‌شود و اطمینان از کیفیت ساختارهای کامپوزیتی را تقویت می‌کند.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که واسنجی دقیق دستگاه فراآوایی، در ترکیب با روش‌های پیشرفته پردازش علامت و تصویربرداری چند-بعدی، نقش اساسی در افزایش حساسیت و دقت شناسایی عیوب در کامپوزیت‌های الیاف کربن ایفا می‌کند.

به‌کارگیری تکنیک‌های نوین مانند آرایه فازی و امواج هدایت‌شده، امکان پایش غیرمخرب با دقت صنعتی را فراهم ساخته و می‌تواند کاربردهای گسترده‌ای در صنایع هوافضا و خودروسازی داشته باشد. این دستاوردها علاوه بر ارتقای ایمنی و کاهش هزینه‌های تعمیر، گامی مهم در بهبود کیفیت و کارایی سامانه‌های پیشرفته صنعتی محسوب می‌شوند.

۵. نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی فرآیند واسنجی دقیق دستگاه فراآوایی بی‌اسکن سانیک ۱۰۰۰ برای شناسایی عیوب ساختاری کامپوزیت‌های الیاف کربن با پارچه توییل و رزین ۸۲۸ می‌پردازد.

مراحل واسنجی شامل ارزیابی اولیه عملکرد دستگاه، تنظیم دقیق سرعت صوت متناسب با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی پارچه و رزین، و بررسی صحت و دقت دستگاه با استفاده از نمونه‌های استاندارد و عیوب شناخته‌شده بود. این فرآیند جامع منجر به شناسایی دقیق عیوب تورق در عمق ۲۵ میلی‌متر و حفره‌های ۰/۷ میلی‌متری با دقت بالاتر نسبت به مطالعات پیشین شد.

نتایج این پژوهش نشان داد که توجه دقیق به فرآیند واسنجی و استفاده از روش‌های نوآورانه در تنظیمات دستگاه می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در حساسیت و دقت تشخیص عیوب ایجاد کند. این دستاورد نه تنها اعتبار روش‌های موجود را تأیید می‌کند، بلکه اهمیت نوآوری در فرآیندهای واسنجی برای افزایش کارایی دستگاه‌های تشخیصی را برجسته می‌سازد.

فرآیندهای واسنجی شامل آماده‌سازی نمونه‌های استاندارد و لحاظ شرایط محیطی، تنظیم سرعت صوت بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی پارچه و رزین، ارزیابی

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

عملکرد دستگاه در شرایط مختلف محیطی و دمایی استاندارد، و انجام اصلاحات مرحله‌ای لازم بودند.

این اقدامات عملکرد دستگاه را بهبود بخشیده و دقت تشخیص عیوب را افزایش داد. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای توسعه فناوری‌های پیشرفته‌تر در صنایع حساس نظیر هوافضا و خودروسازی استفاده شود.

در نهایت، این تحقیق با تأکید بر واسنجی دقیق و جامع، گامی مؤثر در بهبود روش‌های تشخیص عیوب و پایش سلامت ساختاری کامپوزیت‌ها برداشته و پتانسیل بالایی برای کاربردهای صنعتی و تجاری دارد.

این مطالعه می‌تواند به کاهش هزینه‌ها، افزایش ایمنی و بهبود کیفیت در استفاده از مواد کامپوزیتی منجر شود، که این امر برای صنایع پیشرفته و حساس بسیار مهم است. برای تحقیقات آینده، می‌توان از تکنیک‌های پردازش تصویر، روش‌های فراآوایی مبتنی بر منطق فازی، شبه‌سنج‌های تحلیل چندفیزیکی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین بهره برد تا پایش سلامت ساختاری کامپوزیت‌های الیاف کربن به صورت کامل و چندبعدی انجام شود.

پیشنهادات تحقیقاتی آتی باید بر توسعه سامانه‌های آرایه فازی پیشرفته و پردازش علامت‌های تحلیل چندمقیاسی متمرکز باشد تا توانمندی‌های تفکیک و شناسایی عیوب در کامپوزیت‌های الیاف کربن به‌طور چشمگیری افزایش یابد.

هم‌چنین، بهره‌گیری از فناوری‌های تصویربرداری سه‌بعدی و الگوریتم‌های پردازش تصویر پیشرفته، امکان تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تر ساختار داخلی مواد را فراهم می‌کند. در این راستا، ادغام هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به عنوان رویکردی تحول‌آفرین، می‌تواند شناسایی سریع‌تر و با دقت بالاتر عیوب را ممکن ساخته و پایش سلامت ساختاری را به سطحی فراتر از روش‌های مرسوم ارتقا دهد.

این پیشرفت‌ها، ضمن افزایش قابلیت اطمینان و دقت، پتانسیل ایجاد تحولی بنیادین در روش‌های تشخیص غیرمخرب صنایع حساس و پیشرفته را دارا بوده و می‌تواند به‌عنوان محور اصلی تحقیقات آینده تلقی شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از نیروی هوایی ارتش جمهوری اسلامی ایران با در اختیارگذاشتن تجهیزات آزمون‌های غیرمخرب و آقای مهندس بهنام یدالهی در ساخت آزمون بلاک کامپوزیتی الیاف کربن، ما را یاری نمودند، تقدیر و سپاسگزاری به عمل می‌آورند.

تضاد و منافع

نویسندگان هیچ منافع مالی یا روابطی که بتواند بر انتشار این مقاله تاثیر گذار باشد ندارند.

فهرست منابع

[1] W. Cantwell, J. Morton, “The impact resistance of composite materials–a review,” Composites, vol. 22, no. 5, pp. 347–362, 1991.
[2] D. Shanyi, “Advanced composite materials and aerospace engineering,” Acta Materiae Compo-sitae Sinica, vol. 24, no. 1, pp. 1–12, 2007.
[3] D. Shanyi, “Composite material innovation drives industrial development,” Science & Technology Review, vol. 34, no. 8, 2016.
[4] B. Sharma, G. Rao, S. Gupta, P. Gupta, A. Prasad,” Advances in Engineering Materials,” Springer, Singapore, 2021.
[5] M. Mitchell, R. Link, C. Liew, “Inspections of helicopter composite airframe structures using convention a land emerging nondestructive testing methods,” Journal of Testing and Evaluation, vol. 39, no. 6, pp. 1011–1022, 2011.
[6] K. Diamanti, C. Soutis, “Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures,” Progress in Aerospace Sciences, vol. 46, no. 8, pp. 342–352, 2010.
[7] L. Bennett, W. Lewis, P. Hungler, “The development of neutron radiography and tomography on a Slowpoke-2 reactor,” Physics Procedia, vol. 43, pp. 21– 33, 2013.
[8] L. Zhang, “The application of composite fiber materials in sports equipment,” International Conference on Education, Management, Information and Medicine, pp. 450–453, 2015.
[9] K. Friedrich, A. Almajid, “Manufacturing aspects of advanced polymer composites for automotive applications,” Applied Composite Materials, vol. 20, no. 2, pp. 107–128, 2013.
[10] C. Chua, H. Liu, N. Di Trani, A, Susnjar, J. Ho, G, Scorrando, J. Rhudy, A. Sizovs, G. Lolli, N. Hernandez, M. Nucci, R. Cicalo, M. Ferrari, A. Grattoni, “Carbon fiber

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

reinforced polymers for implantable medical devices," Biomaterials, vol. 271, 120719, 2021.

[11] F. He, Z. Wang, L. Shi, "Ultrasonic testing technique for the inspection of defects in the corner of composites," Journal of Materials Engineering, vol. 1, no. 7, pp. 80–84, 2011.

[12] X. Liang, X. Xu, Z. Lin, "Fatigue performance of composite laminates after low-velocity impact," Journal of Materials Engineering, vol. 44, no. 12, pp. 100–106, 2016.

[13] F. He, Z. Wang, L. Shi, Y. Liu, D. Yang, X. Wang, "Application and development of NDT for fiber reinforced polymer matrix composites used in aviation," Non-destructive Testing, vol. 40, no. 11, pp. 29–41, 2018.

[14] Z. Quan, J. Liu, F. Fang, G. Wang, F. Jiang, "Effect of V-shaped Pit area ratio on quantum efficiency of blue InGaN/GaN multiple-quantum well light-emitting diodes," Optical and Quantum Electronics, vol. 48, no. 3, pp. 195.1–195.8, 2016.

[15] C. Díaz, C. Marques, M. Domingues, M. Ribeiro, A. Frizera-Neto, M. Pontes, P. Andre, P. Antunes, "A costeffective edge-filter based FBG interrogator using catastrophic fuse effect micro-cavity interferometers," Measurement, vol. 124, pp. 486–493, 2018.

[16] Z. Wang, R. Singh, C. Marques, R. Jha, B. Zhang, S. Kumar, "Taper-in-taper fiber structure-based LSPR sensor for alanine aminotransferase detection," Optics Express, vol. 29, no. 26, pp. 43793–43810, 2021.

[17] G. Leal-Junior, A. Frizera, C. Marques, M. Sanchez, W. Santos, A. Siqueira, M. Segatto, M. Pontes, "Polymer optical fiber for angle and torque measurements of a series elastic actuator's spring," Journal of Lightwave Technology, vol. 36, no. 9, pp. 1698–1705, 2018.

[18] G. Leal-Junior, C. Marques, A. Frizera, M. Pontes, "Dynamic mechanical analysis on a polymethyl methacrylate (PMMA) polymer optical fiber," IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 6, pp. 2353–2361, 2018.

[19] K. Tschöke, S. Pierce, M. Lowe, C. Farrar, A. Wilkinson, "Feasibility of model-assisted probability of detection principles for structural health monitoring systems based on guided waves for fiber-reinforced composites," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 68, no. 10, pp. 3156–3173, 2021.

[20] Y. Liu, B. Zwingmann, M. Schlaich, "Carbon fiber reinforced polymer for cable structures–a review," Polymers, vol. 7, no. 10, pp. 2078–2099, 2015.

[21] D. Ozkan, M. Gok, A. Karaoglanli, "Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite Materials, Their Characteristic Properties, Industrial Application Areas and Their Machinability," Advanced Structured Materials, Springer, Cham, pp. 235– 253, 2020.

[22] J. Wen, Z. Xia, F. Choy, "Damage detection of carbon fiber reinforced polymer composites via electrical resistance measurement," Composites Part B: Engineering, vol. 42, no. 1, pp. 77–86, 2011.

[23] S. Karnik, V. Gaitonde, J. Rubio, A. Correia, A. Abrão, J. Davim, "Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model," Materials & Design, vol. 29, no. 9, pp. 1768–1776, 2008.

[24] G. Marsh, "Airbus A350 XWB update," Reinforced Plastics, vol. 54, no. 6, pp. 20–24, 2010.

[25] A. Lami, P. Hilmer, M. Sinapius, "Eco-efficiency assessment of manufacturing carbon fiber reinforced polymers (CFRP) in aerospace industry," Aerospace Science and Technology, vol. 79, pp. 669–678, 2018.

[26] H. Emathinger, "Development of a CFRP transmission housing for a formula student racing car," ATZextra worldwide, vol. 22, no. 2, pp. 36–39, 2017.

[27] "Carbon fiber innovations in the medical industry," https://www.pcmi-mfg.com/blog/car bon-fiber-innovationsin-the-medical-industry, 2020.

[28] "Why use carbon fiber sports knee pads?," F. Sino, https://www.carbonfibercustom.com/why -use-carbon-fibersports-knee-pads, 2019.

[29] J. Llobet, P. Maimí, Y. Essa, F. Escalera," Progressive matrix cracking in carbon/epoxy cross-ply laminates under static and fatigue loading," International Journal of Fatigue, vol. 119, pp. 330–337, 2019.

[30] J. Zeng, W. Gao, F. Liu, "Interfacial behavior and debonding failures of full-scale CFRP-strengthened H-section steel beams," Composite Structures, vol. 201, pp. 540–552, 2018.

[31] M. Y. Fard, B. Raji, H. Pankretz, "Correlation of nanoscale interface debonding and multimode fracture in polymer carbon composites with long-term hygrothermal effects," Mechanics of Materials, vol. 150, 103601, 2020.

[32] L. Lassila, F. Keulemans, E. Säilynoja, P. Vallittu, S. Garoushi, "Mechanical properties and fracture behavior of flowable fiber reinforced composite restorations," Dental Materials, vol. 34, no. 4, pp. 598–606, 2018.

[33] L. Longbiao, "Modeling first matrix cracking stress of fiber reinforced ceramic-matrix composites considering fiber fracture," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 92, pp. 24–32, 2017.

[34] L. Yao, H. Cui, R. Alderliesten, Y. Sun, L. Guo, "Thickness effects on fiber-bridged fatigue delamination growth in composites," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 110, pp. 21–28, 2018.

[35] R. Ladani, K. Pingkarawat, A. Nguyen, C. Wang,and A. Mouritz, "Delamination toughen-ing and healing performance of woven composites with hybrid z-fiber reinforcement," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 110, pp. 258–267, 2018.

[36] R. Chambers, J. Earl, C. Squires, M. Suhot, "The effect of voids on the flexural fatigue performance of unidirectional carbon fiber composites developed for wind turbine applications," International Journal of Fatigue, vol. 28, no. 10, pp. 1389–1398, 2006.

[37] S. Park, W. Choi, H. Choi, "The effects of void contents on the long-term hygrothermal behaviors of glass/epoxy and GLARE laminates," Composite Structures, vol. 92, no. 1, pp. 18–84, 2010.

[38] V. Srivastava, T. Gries, D. Veit, T. Quadflieg, B. Mohr, M. Kolloch, "Effect of nanomaterial on mode I and mode II interlaminar fracture toughness of woven carbon fabric reinforced polymer composites," Engineering Fracture Mechanics, vol. 180, pp. 73–86, 2017.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

[39] N. Huang X. Liu, “Debonding and fiber pull-out in reinforced composites,” Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 21, no. 3, pp. 157–176, 1994.

[40] D. Kreculj, B. Rašuo, “Review of impact damages modelling in laminated composite aircraft structures,” Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette, vol. 20, no. 3, pp. 485-495, 2013.

[41] M. Wisnom, “The role of delamination in failure of fiberreinforced composites,” Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 370, no. 1965, pp. 1850–1870, 2012.

[42] A. Krishnamoorthy, S. Boopathy, K. Palani-kumar, “Delamination analysis in drilling of CFRP composites using response surface methodology,” Journal of Composite Materials, vol. 43, no. 24, pp. 2885–2902, 2009.

[43] J. Shi, G. Xun, J. Liu, “Mesoscopic characteristics of voids in CFRP composites fabricated with unidirectional and woven prepreg,” Journal of Central South University: Natural Science Edition, vol. 51, no. 3, pp. 628–640, 2020.

[44] S. Hernández, F. Sket, C. González, J. Llorca, “Optimization of curing cycle in carbon fiber-reinforced laminates: void distribution and mechanical properties,” Composites Science & Technology, vol. 85, pp. 73–82, 2013.

[45] S. Yoon, S. Kim, W. Cantwell, C. Yeun, C. Cho, Y. Byon, T. Kim, "Defect detection in compo-sites by deep learning using solitary waves," International Journal of Mechanical Sciences, vol. 239, 107882, 2022.

[46] S. Yoon, S. Kim, W. Cantwell, C. Yeun, C. Cho, Y. Byon, T. Kim, “Defect detection in composites by deep learning using solitary waves,” International Journal of Mechanical Sciences, vol. 239, 107882, 2022.

[47] P. Teng, P. Tang, C. Miao, Y. Tao, “A sound velocity calibration-based ultrasonic total focusing method imaging of carbon fiber reinforced polymers,” IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT), pp. 237–241, 2023.

[48] Z. Jing, G. Cai, X. Yu, B. Wang, “Research on defect identification of carbon fiber composite materials based on ultrasonic phased array,” Polymer Composites, vol. 46, no. 1, pp. 902–913, 2025.

[49] F. Yu, Y. Okabe, “Regenerated fiber Bragg grating sensing system for ultrasonic detection in a 900 °C environment,” Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems, vol. 2, 4042259, 2018.

[50] C. Leckey, J. Seebo, “Guided wave energy trapping to detect hidden multilayer delamination damage,” AIP Conference Proceedings, vol. 1650, no. 1, pp. 1162–1169, 2015.

[51] L. Songping, G. Enming, Z. Qianlin, “Evaluation of composite materials by ultrasonic C-scan in depths,” Nondestructive Testing, vol. 23, no. 1, pp. 13–15, 2001.

[52] R. Wu, X. Zhou, K. Wang, “Study on multisensory information fusion in ultrasonic C-scan system of composite material,” Journal of Sensing Technology, vol. 3, pp. 561–564, 2005.

[53] T. Hasiotis, E. Badogiannis, N. Tsouvalis, “Application of ultrasonic C-scan techniques for tracing defects in laminated composite materials,” Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering, vol. 57, no. 3, pp. 192–203, 2011.

[54] M. Shiino, M. Faria, E. Botelho, P. Oliveira, “Assessment of cumulative damage by using ultrasonic C-scan on carbon fiber/epoxy composites under thermal cycling,” Materials Research, vol. 15, no. 4, pp. 495–499, 2012.

[55] W. Gao, “A discussion on the influence of the scanning directions on the scanning results of the ultrasonic water spraying C-scan,” Non-destructive Testing, vol. 44, no. 2, pp. 13–16, 2020.

[56] J. Patronen, C. Stenroos, M. Virkkunen, S. Papula, T. Sarikka, “Inspection of carbon Fiber–Titanium–carbon Fiber stepped-Lap Joint,” European Conference on NDT, 2018.

[57] H. Taheri A. Hassen, “Nondestructive ultrasonic inspection of composite materials: A comparative advantage of phased array ultrasonic,” Applied Sciences, vol. 9, no. 8, 1628, 2019.

[58] J. Naderifar, R. Sarkhosh, “Non-destructive evaluation of structural health in glass fiber composites: Ultrasonic testing method for performance improvement and safety,” Scientific Journal of Safety and Airworthiness, 2024, (in Persian).

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]