مقاله

طراحی یک سیستم فراصوتی با استفاده از تکنیک حباب‌ساز جهت بازرسی اتصالات چسبی

فرهنگ هنرور*
استاد دانشکدهٔ مهندسی مکانیک
دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
honarvar@kntu.ac.ir

مهران سپهری خامنه
کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
mehran.sepehri@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۲/۲۰

چکیده

در این مقاله سیستمی برای بازرسی فراصوتی اتصالات چسبی به‌روش حباب‌ساز[1] طراحی و ساخته شده است. در طراحی سیستم حباب‌ساز، از یک سیلندر پلاستیکی با ابعاد و زوایای دقیق استفاده شده که ستونی از آب را بین پروب و قطعهٔ مورد بازرسی ایجاد می‌کند. پروب فراصوتی در موقعیت خود روی سیستم حباب‌ساز تثبیت می‌شود. با برقراری جریان آب، جفت‌کنندگی ثابت و یکنواختی برای امواج فراصوتی ارسالی به قطعه و بازگشتی از آن فراهم می‌شود. بنابراین بی‌نظمی‌های سیگنال‌ها حذف شده و انرژی فراصوتی بیشتری در ناحیهٔ مورد بازرسی ایجاد و داده‌های خروجی بهتری تولید می‌شود. پروب فراصوتی توسط کابل مخصوص به واحد فراصوتی متصل می‌شود. وظیفهٔ واحد فراصوتی، تحریک پروب با استفاده از سیگنال الکتریکی، دریافت سیگنال بازگشتی از پروب، تبدیل آن از حالت آنالوگ به دیجیتال و ذخیرهٔ آن در رایانه است. واحد پردازش سیگنال به‌صورت نرم‌افزاری است که در آن امواج دریافت‌شده از پروب را می‌توان به شکل نمودارهای دو و سه‌بعدی مشاهده کرد و مراحل پردازش سیگنال را روی آنها انجام داد. برای شناسایی ناپیوستگی در ساختار اتصالات چسبی سالم و معیوب، روش مشاهدهٔ کاهش دامنهٔ بازتاب‌های متوالی از سطح دیوارهٔ پشتی قطعه استفاده شده است. با توجه به نتایج آزمایشات ملاحظه می‌شود که پژواک‌های دریافتی از فصل مشترک اتصال (آلومینیوم - اپوکسی) در اتصال سالم، انرژی خود را در داخل لایهٔ چسب از دست می‌دهند و به‌سرعت میرا می‌شوند. اما در اتصال معیوب، به‌دلیل عدم وجود لایهٔ چسب، دامنهٔ پژواک‌های دریافتی بیشتر بوده، همچنین پژواک‌های متوالی بیشتری از فصل مشترک اتصال ایجاد می‌شوند.

واژگان کلیدی: بازرسی فراصوتی، اتصالات چسبی، سطوح منحنی، غوطه‌وری حباب‌ساز

۱. مقدمه

در نیای امروز، پیشرفت دانش و ظهور و بروز فناوری‌های نوین در تمامی ابعاد زندگی بشر احساس می‌شود. تغییر و تحول در بخش‌هایی از زندگی روزمره همچون ارتباطات، حمل‌ونقل و تجهیزات الکترونیکی و کامپیوتری نمونه‌هایی

از فناوری‌های نوینی است که برای تمامی افراد قابل لمس است. تمامی این تحولات و پیشرفت‌ها در سایهٔ ارتقای سیستم‌های تولیدی ممکن شده است. همگام با پیشرفت صنایع و فناوری‌های گوناگون، نیاز به اطمینان از کیفیت محصولات گسترش روزافزونی یافته است. در این میان، آزمون‌های غیرمخرب به‌عنوان ابزاری مفید جهت ارزیابی محصولات محسوب می‌شوند. ویژگی‌هایی چون عدم آسیب رساندن به محصول، زمان کوتاه بازرسی، اطمینان از نتایج بازرسی و امکان استخراج اطلاعات گوناگون از محصول، سبب توسعهٔ چشم‌گیر این روش‌ها در صنایع شده است. از جمله مهم‌ترین کاربردهای این آزمون‌ها می‌توان به ارزیابی غیرمخرب عیوب قطعات و اندازه‌گیری ضخامت آنها اشاره کرد. برای انجام آزمون‌های غیرمخرب روش‌های گوناگونی وجود دارد که آزمون فراصوتی (التراسونیک) یکی از مهمترین آنهاست. رز و مایر (۱۹۷۳) به شناسایی عیوب اتصال چسبی، متشکل از دو لایهٔ آلومینیوم و یک لایهٔ چسب اپوکسی پرداختند و توانستند با پروب فراصوتی ۱۵ مگاهرتزی و بهره‌گیری از تکنیک غوطه‌وری در مخزن آب، وجود ناپیوستگی را در فصل مشترک اتصال شناسایی کنند [۱]. تاوو و همکاران (۲۰۰۱) نیز عیب ناپیوستگی را در فصل مشترک فولاد نرم به‌ضخامت ۰/۶ میلی‌متر و چسب اوربی - سیل ارزیابی کردند. بدین منظور با استفاده از پروب غوطه‌وری با فرکانس ۱۰ مگاهرتز و تکنیک غوطه‌وری در مخزن آب، تصاویر روبش C از سطح مقطع اتصال ایجاد و با توجه به وجود مناطق روشن و تاریک در تصویر، نواحی سالم و معیوب اتصال را از یکدیگر تفکیک کردند [۲]. روش‌های استفاده‌شده در این پژوهش‌ها، قابلیت بازرسی قطعات بزرگ صنعتی را نداشتند؛ لذا رابینسون (۲۰۰۳) از پروب تایری با تماس خشک برای شناسایی ناپیوستگی در فصل مشترک آلومینیوم و اپوکسی استفاده کرد. وی پروب فرکانس پایین ۵۰۰ کیلوهرتز با قطر ۱۴ میلی‌متر را برای انجام بازرسی انتخاب کرد. با وجود قابلیت تشخیص نواحی معیوب از نواحی سالم، این روش برای ضخامت‌های کم قطعه‌کار چندان مناسب نبود [۳]. مائِو (۲۰۱۱) از یک خط تأخیری پلاستیکی و آرایه ماتریسی ۵۲ المانی با فرکانس ۱۵ مگاهرتز، برای بازرسی فصل مشترک اتصال فولاد و چسب استفاده کرد [۴].

در این مقاله از روش غوطه‌وری حباب‌ساز برای بازرسی اتصال چسبی سه‌لایه شامل آلومینیوم، اپوکسی و سرب استفاده شده است. مزیت اصلی روش حباب‌ساز این است که در آن به‌جای مخازن بزرگ مادهٔ واسط، از یک ستون آب در زیر پروب استفاده شده است. بنابراین از این روش در بازرسی قطعاتی که امکان جانمایی در مخازن تکنیک غوطه‌وری رایج را ندارند، می‌توان به‌راحتی استفاده کرد و به نتایج مطلوبی دست یافت.

۲. اتصالات چسبی

استفاده از اتصالات چسبی یکی از مهم‌ترین روش‌های پیوند قطعات متنوع صنعتی است. چسب‌های ساختاری می‌توانند استحکام و در عین‌حال چقرمگی قطعه را به‌میزان قابل توجهی افزایش دهند و سبب کاهش امکان خرابی تجهیزات حساس در حین کار شوند. همچنین، چسب‌های ساختاری نقش مهمی در اتصال فلزات غیرهم‌جنس مانند اتصال آلومینیوم به فولاد، منیزیم و یا سرب ایفا می‌کنند. چسب‌ها انواع گوناگونی دارند که برخی از آنها عبارت‌اند از چسب‌های اپوکسی[۲]، سیانواکریلیت[۳]، پلی‌کلروپرن[۴]، مایع، دو قسمتی، فیلمی، فلز به فلز، چوب، چسب‌های پایه حلّال[۵] و چسب‌های سخت‌شونده در دمای پایین.

سلامت و دوام اتصالات چسبی جزئی اساسی در عملکرد و قابلیت اطمینان تجهیزات صنعتی گوناگون است و ارزیابی غیرمخرب، به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تضمین کیفیت اتصالات چسبی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵].

۲-۱. عیوب اتصالات چسبی

دسته‌بندی عیوب اتصالات چسبی می‌تواند از دیدگاه‌های متنوعی انجام شود. آدامز و کالی این عیوب را به دو دستهٔ

کلی تقسیم‌بندی کرده‌اند [۵]:

۱. عیوب حجمی که داخل حجم چسب وجود دارند.

۲. عیوبی که در فصل مشترک چسب و مادهٔ چسبنده ایجاد می‌شوند.

عیوب حجمی سبب کاهش استحکام داخلی چسب می‌شوند و عیوب فصل مشترک کاهش استحکام اتصال را درپی دارند و بیشتر در اثر نامناسب بودن فرایند اتصال به‌وجود می‌آیند. عیوب اصلی در اتصالات چسبی عبارت‌اند از: ناپیوستگی[۶]، ناخالصی[۷]، اتصال ضعیف[۸]، استحکام ضعیف اتصال[۹] و اتصال بوسه‌ای[۱۰]. در این بین عیب ناپیوستگی به‌دلیل تأثیرگذاری بیشتر بر عملکرد نهایی اتصال از اهمیت بیشتری برخوردار است [۶].

۲-۲. بازرسی فراصوتی اتصالات چسبی

در آزمون فراصوتی، از امواج صوتی با فرکانس‌های بالاتر از حد شنوایی انسان استفاده می‌شود. با افزایش فرکانس صوت، این امواج جهت‌دار می‌شوند. از این خاصیت موج صوتی برای بازرسی غیرمخرب قطعات استفاده می‌شود. برای تولید امواج فراصوتی معمولاً از مواد پیزوالکتریک[۱۱] استفاده می‌شود. با اعمال ولتاژ به دو سر یک مادهٔ پیزوالکتریک، این ماده تغییر شکل می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان موج فراصوتی تولید کرد و به‌داخل قطعه فرستاد. در اثر برخورد این امواج به سطح قطعه، دیوارهٔ پشتی و عیوب داخل قطعه، مقداری از آن برگشت داده شده و توسط پروب‌های گیرنده دریافت می‌شوند. به‌کمک نتایج این آزمون و همچنین نحوهٔ انجام بازرسی و هندسهٔ قطعه می‌توان مشخصات عیب از قبیل نوع، موقعیت و ابعاد آن را تخمین زد. آزمون فراصوتی به روش‌های گوناگونی چون بازتابی، عبوری و ارسال-دریافت انجام می‌شود. کهن‌ترین و در عین‌حال معمول‌ترین روش، روش بازتابی است. در این روش موج فراصوتی تولیدشده توسط پروب به‌داخل قطعه ارسال می‌شود. این موج در اثر برخورد با عیوب و همچنین دیواره‌های قطعه بازتابیده می‌شود. میزان انرژی بستگی به نسبت ابعاد سطح بازتابنده و سطح مقطع دسته پرتو ارسالی دارد. فاصلهٔ زمانی بین فرستادن پالس و دریافت پژواک برای تعیین عمق عیوب استفاده می‌شود [۷].

۳. پروب‌های تماسی

برای انجام آزمون‌های تماسی از این نوع پروب‌ها استفاده می‌شود. این پروب‌ها معمولاً به‌صورت دستی روی قطعه قرار می‌گیرند و با حرکت دست اپراتور روی قطعه جابه‌جا می‌شوند. برای پرکردن فضای بین پروب و قطعه و انتقال امواج فراصوتی به‌داخل قطعه، از مادهٔ واسط - که معمولاً گریس یا روغن است - استفاده می‌شود [۸].

٤. پروب‌های غوطه‌وری

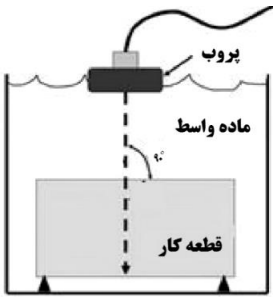
این دسته از پروب‌ها برای انجام بازرسی غوطه‌وری استفاده می‌شوند. در این حالت فضای بین قطعه و پروب از آب پر می‌شود و در حقیقت آب نقش مادهٔ واسط را ایفا می‌کند. این روش به‌دلیل حذف اثر فشار دست، نتایج دقیق‌تر و تکرارپذیرتری دارد. آزمون غوطه‌وری به‌دلیل ماهیت غیرتماسی‌اش می‌تواند روش مناسبی برای استفاده از کریستال‌های پیزوالکتریک با فرکانس‌های بالاتر باشد که یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این روش نیز همین است. آزمون غوطه‌وری خود به چند روش گوناگون قابل انجام است، که در ادامه بدانها اشاره می‌شود.

۴-۱. غوطه‌وری در مخزن

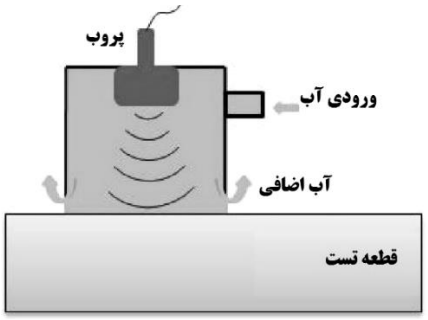
در این روش، قطعه و پروب داخل مخزنی پر از آب قرار داده می‌شوند. به‌دلیل بالابودن حجم آب مخزن، دمای قطعه به‌سرعت به دمای محیط می‌رسد. با ثابت‌شدن دما، یکی از منابع ایجاد خطا در آزمایش حذف شده و قابلیت تکرارپذیری و دقت انجام بازرسی افزایش می‌یابد. در شکل ۱، نمایی شماتیک از این روش نمایش داده شده است [۸].

۴-۲. روش حباب‌ساز (ستون آب)[۱۲]

این روش بیشتر در سیستم‌های خودکار استفاده می‌شود. در این روش محفظه‌ای، که پروب داخل آن قرار می‌گیرد، پر از آب شده و درنتیجه ستونی از آب بین قطعه و پروب ایجاد می‌شود. در این حالت جریانی آرام از آب وارد محفظه شده و در نهایت از فضای بین محفظه و قطعه به بیرون جریان می‌یابد. شکل ۲ نمایی شماتیک از این روش را نمایش می‌دهد [۹].



شکل ۱. نمایی شماتیک از سیستم آزمون غوطه‌وری



شکل۲. نمایی شماتیک از سیستم آزمون غوطه‌وری با تکنیک حباب‌ساز

۴-۳. روش جت آب

در این روش، یک نازل آب در سطح جلویی پروب قرار داده می‌شود تا موج فراصوتی را با مادهٔ مورد بازرسی جفت نماید. در این حالت، یک جریان آرام[۱۳] آب، موج فراصوتی را از پروب به سطح قطعه هدایت می‌کند. عملکرد این روش تقریباً مشابه روش ستون آب است، با این تفاوت که بیشتر زمانی به‌کار برده می‌شود که جفت‌شدن بدون تماس مد نظر است. معمولاً از جت آب برای بازرسی قطعات بزرگ به‌روش عبوری استفاده می‌شود. جت به‌صورت آزاد می‌تواند طولی در حدود یک متر را طی کند. به‌دلیل اغتشاش کمی که ممکن است در این روش ایجاد شود، نسبت سیگنال به نوفهٔ آن کمتر از روش غوطه‌وری است. سیستم جت آب معمولاً برای بازرسی موادی با میرایی بالا مانند ساختارهای ساندویچی یا GLARE [۱۴] استفاده می‌شود [۹].

۵. محدودیت روش‌های موجود و نیاز به استفاده از روش جایگزین

با در نظر گرفتن نیازمندی‌های گوناگونی که در صنایع مختلف برای بازرسی قطعات با ابعاد و اشکال هندسی متفاوت وجود دارد، روش‌های متعددی برای شناسایی عیوب در نظر گرفته می‌شود. هر یک از این روش‌ها به‌دلیل محدودیت‌های خاص خود ممکن است قابلیت به‌کارگیری در برخی از قطعات را نداشته باشند. به عنوان نمونه، روش فراصوتی تماسی معمولاً به‌صورت دستی انجام می‌شود، لذا احتمال ایجاد خطا در این روش بالاست. از سوی دیگر، امکان استفاده از این روش در سیستم‌های خودکار بسیار پایین است و همچنین به‌دلیل ماهیت تماسی این روش، بازرسی برخی قطعات که سطح خارجی حساسی دارند و یا قطعاتی که دارای سطوح انحنادار و پیچیده‌ای هستند، عملاً وجود ندارد و باید درپی روش‌های جایگزین بود [۱۰]. روش غوطه‌وری در مخزن توانسته است مشکل تماس با قطعه را حل کند و حتی برای سطوح تخت و ساده قابلیت اتوماسیون مناسبی داشته باشد. اما این روش تنها برای قطعاتی قابل استفاده است که با ابعاد مخزن متناسب باشند و بازرسی قطعات بزرگ نیازمند ساخت مخازن بزرگ و سیستم‌های حرکتی با طول کورس بالاست و حتی در برخی موارد از قبیل بازرسی مخازن نفت و گاز، خطوط لوله و قطعات بزرگ هواپیما، این روش قابلیت خود را به‌صورت کامل از دست می‌دهد. علاوه بر این، این روش هم مشابه روش تماسی، در بازرسی سطوح انحنادار و پیچیده

محدودیت‌هایی دارد و اغلب برای سطوح تخت یا با انحنای ثابت استفاده می‌شود. روش جت آب هم به‌دلیل نیاز به دسترسی به دو طرف قطعه مورد بازرسی، عملاً در همهٔ موارد قابل استفاده نیست.

٦. روش پیشنهادی

روش حباب‌ساز، که گاهی به آن روش غوطه‌وری محلی[15] نیز گفته می‌شود، یک خط تأخیری مشخص از آب را برای روش‌های بازرسی گوناگون از جمله روش بازتابی فراهم می‌کند. این روش به‌دلیل داشتن مسیر روبش فعال بزرگ‌تر[16]، سرعت بازرسی بالاتری را نسبت به جت آب دارد. از سوی دیگر، قطعات مناسب برای این روش می‌توانند مسطح یا انحنادار باشند، مانند بدنهٔ هواپیما. البته این روش بعضاً برای بازرسی شعاع داخلی و خارجی نیز استفاده می‌شود.

بدنهٔ سیستم حباب‌ساز ساخته‌شده، از یک سیلندر با پوسته پلاستیکی تشکیل شده است. در داخل این بدنه یک ستون آب در میان پوسته و پروب تعبیه شده است. آب به‌طور پیوسته به‌داخل بدنهٔ آب‌پخش‌کن[17] پمپ می‌شود تا ستون آب و حوضچهٔ میان بدنه و سطح مورد بازرسی همیشه پر از آب باشد. ستون آب و حوضچه‌ای که با آن در تماس است، جفت‌کنندگی ثابت و یکنواختی برای امواج صوتی ارسالی به قطعه و بازگشتی از آن فراهم می‌کنند. این امر سبب حذف بی‌نظمی‌ها شده، انرژی فراصوتی بیشتری در ناحیهٔ مورد بازرسی ایجاد و در نتیجه سیگنال خروجی بهتری تولید می‌شود. در شکل ۳، تصویری از ستون آب طراحی‌شده برای بازرسی اتصال چسبی انحنادار نمایش داده شده است. مطابق این شکل، بدنهٔ اصلی سیستم از سیلندری با پوسته‌ای از جنس پلکسی گلس تشکیل شده است. سطح تماس سیلندر با قطعه به‌گونه‌ای طراحی شده است که خود را با انحنای سطح قطعهٔ بازرسی‌شونده به‌طور کامل تطبیق دهد و بدین ترتیب از عمودبودن راستای انتشار موج فراصوتی بر سطح قطعه اطمینان حاصل و انجام بازرسی ممکن می‌شود. با در نظر گرفتن این مسئله می‌توان این روش را برای بازرسی قطعات بزرگ انحنادار به‌راحتی استفاده کرد.

شکل ۳. تصویری از سیستم حباب‌ساز طراحی‌شده برای بازرسی سطوح انحنادار

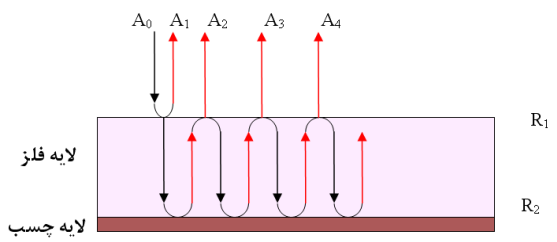
اساس طراحی سیستم حباب‌ساز، ایجاد جریان آب ثابت با حجم پایین است. معمولاً برای تشکیل ستون آب مورد نظر تجهیزاتی روی پروب اصلی نصب می‌شود. اعمال مادهٔ واسط به ناحیهٔ مورد بازرسی از طریق مسیر آب تعبیه‌شده در بدنهٔ سیلندر ایجاد می‌شود. این مسیر تحت زاویهٔ ۴۵ درجه با راستای عمود بر سطح پروب قرار دارد و با اعمال دبی مناسب می‌توان از وجود مادهٔ واسط در ناحیهٔ زیر پروب بازرسی‌کننده مطمئن شد.

۷. الگوریتم ارزیابی خروجی سیستم

در بازرسی قطعات، نخست باید روشی برای تشخیص اتصال سالم از معیوب یافت. در اتصال چسبی سالم، که

هیچ نوع ناپیوستگی در فصل مشترک اتصال وجود ندارد، پرتو فراصوتی پس از عبور از داخل لایهٔ آلومینیومی، وارد مادهٔ چسبی شده و به‌دلیل میرایی بالای چسب نمی‌تواند از آن خارج شود. در نتیجه دامنهٔ اکوی دریافتی در این حالت کم خواهد بود و نسبت دامنهٔ اکوی دریافتی اول به دامنهٔ پالس اولیه مقدار کمی را نشان خواهد داد. از سوی دیگر، برای اتصال دارای ناپیوستگی در فصل مشترک فلز با مادهٔ چسبی، سیگنال ارسالی پس از عبور از لایهٔ فلزی به فاصلهٔ هوایی رسیده و به‌دلیل اختلاف در امپدانس صوتی آلومینیوم و هوا، بخش اعظمی از سیگنال بازتاب می‌یابد، بنابراین نسبت دامنهٔ اکوی دریافتی اول به دامنهٔ پالس اولیه، مقدار بیشتری را در مقایسه با حالت قبلی نشان خواهد داد.

برای دستیابی به نتایج قابل اطمینان‌تر، باید با استفاده از نظریه‌های موجود در آزمون‌های فراصوتی، قابلیت تفکیک‌پذیری میان نواحی سالم و معیوب بهبود یابد. بدین منظور نظریه‌های ضرایب عبور و بازتابش و استهلاک موج در بخش‌های مختلف اتصال، اعم از بخش‌های سالم و معیوب استفاده می‌شود. در شکل ۴ بازتابش‌های متوالی موج ارسالی به داخل یک نمونهٔ چسبی نمایش داده شده است [۱۱].



شکل ٤. بازتابش‌های مختلف موج ارسالی به‌داخل اتصال چسبی

با توجه به شکل و استفاده از روابط موجود برای ضرایب بازتابش و عبور و نیز استهلاک موج، می‌توان روابط ۱ تا ۴ را استخراج کرد [۱۱]:

$$\frac{A_1}{A_0}=R_1 \rightarrow A_0=\frac{A_1}{R_1} \qquad (۱)$$

$$A_2=A_1\frac{T_1T_1'R_2}{R_1}\times10^{\frac{\alpha_s L}{-20}\times2} \qquad (۲)$$

$$A_3=A_1\frac{T_1T_1'R_2{}^2R_1'}{R_1}\times10^{\frac{\alpha_s L}{-20}\times4} \qquad (۳)$$

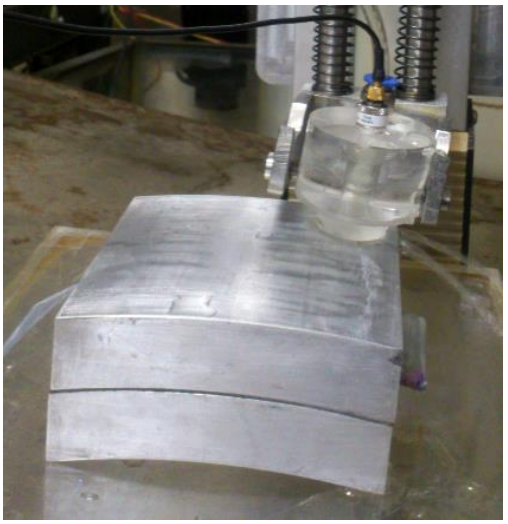
$$\frac{A_1}{A_2}=\frac{R_1}{T_1T_1'R_2}\times10^{\frac{\alpha_s L}{20}\times2} \qquad (۴)$$

به‌طوری‌که در این روابط، A_0 دامنهٔ موج ورودی، A_1 تا A_3 دامنهٔ امواج خروجی، R_1 ضریب بازتابش در فصل مشترک اول در حالتی‌که موج وارد فلز می‌شود، R_1' ضریب بازتابش در فصل مشترک اول در حالتی‌که موج وارد فلز می‌شود، R_2 ضریب بازتابش در فصل مشترک دوم در حالتی‌که موج وارد لایهٔ چسب می‌شود، T_1 ضریب عبور در فصل مشترک اول در هنگام ورود موج به فلز، T_1' ضریب عبور در فصل مشترک اول در هنگام خروج موج از فلز، α_s ضریب استهلاک موج و نهایتاً L ضخامت لایهٔ فلز است. برای استفاده از نظریهٔ ضریب بازتابش در بازرسی اتصالات چسبی از رابطهٔ ۴ استفاده می‌شود. بدین معنا که برای هر یک از سیگنال‌های به‌دست آمده از بازرسی اتصال می‌توان نسبت فوق را به‌دست آورد و با مقایسهٔ مقادیر نهایی، به سالم یا معیوب‌بودن اتصال پی‌برد. در این راستا هرچه نسبت به‌دست آمده از رابطهٔ ۴ بزرگ‌تر باشد، نمایانگر سالم‌تر بودن اتصال است و با کاهش مقدار آن احتمال وجود ناپیوستگی بالا می‌رود.

۸. آزمایش‌ها و تحلیل نتایج

قطعهٔ انتخاب‌شده برای انجام بازرسی، یک اتصال چسبی سه‌لایه است که در آن ورق آلومینیومی به‌ضخامت ۶ میلی‌متر به ورق سربی به‌ضخامت ۶/۵ میلی‌متر متصل شده است. چسب استفاده‌شده در اتصال اپوکسی است و ۰/۳ میلی‌متر ضخامت دارد. برای تولید قطعهٔ نمونه، دو ورق انحنادار با چسب اپوکسی به یکدیگر چسبانده شده و در دمای ۲۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد عمل پخت انجام شده است. برای بازرسی فراصوتی، فرکانس پروب ۱۰ مگاهرتز و دبی آب ورودی به ستون آب ۵۰۰ لیتر بر ساعت انتخاب

شده است. همچنین برای ایجاد امکان مقایسهٔ پژواک‌های دریافتی از ناحیهٔ سالم و معیوب، یک ناحیه دارای عیب ناپیوستگی در ساختار اتصال چسبی تعبیه شده است. عیب ناپیوستگی در این ناحیه، از طریق حذف لایهٔ سربی در قسمتی از اتصال صورت گرفته است (شکل ۵). لازم به‌ذکر است آزمایش‌های انجام‌شده در هر کدام از نواحی سالم و معیوب حداقل سه بار تکرار شده است.



شکل ۵. بازرسی اتصال چسبی انحنادار با روش حباب‌ساز

با انجام بازرسی کل قطعه، پژواک‌های دریافتی از نواحی گوناگون اتصال ثبت می‌شود. در شکل‌های ۶ و ۷ به‌ترتیب نمونه‌هایی از پژواک‌های دریافتی از نواحی دارای اتصال سالم و اتصال معیوب نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که پژواک‌های دریافتی از فصل مشترک اول اتصال (آلومینیوم - اپوکسی) در اتصال سالم پس از سه بازتاب متوالی به‌سرعت میرا شده و انرژی خود را در داخل لایهٔ چسب از دست داده است. اما در اتصال معیوب، به‌دلیل عدم وجود لایهٔ چسب، پژواک‌های متوالی بیشتری از فصل مشترک اتصال وجود دارد. نتایج به‌دست آمده از محاسبهٔ نسبت بازتاب دوم فصل مشترک به بازتاب اول و همچنین نسبت بازتاب سوم به اول برای اتصال سالم و معیوب، در جدول ۱ آمده است. ملاحظه می‌شود که مقادیر به‌دست آمده برای هر دو نسبت تعریف‌شده، در اتصال معیوب بزرگ‌تر از اتصال سالم است. همچنین مطابق جدول ۱، برای نسبت A_3/A_1 به‌دلیل میرایی بیشتر موج در مقایسه با نسبت A_2/A_1، حاصل نسبت اتصال سالم به اتصال معیوب، اعداد بزرگ‌تری را نشان می‌دهد. با تعیین حد مناسب برای نسبت‌های A_2/A_1 و A_3/A_1، می‌توان معیار رد یا قبول مناسبی برای بازرسی اتصالات چسبی انتخاب کرد که دارای قابلیت اطمینان بالایی در شناسایی و تشخیص ناپیوستگی باشد. این مورد یکی از اصلی‌ترین مزیت‌های روش پیشنهادی است که سبب تسهیل استفاده از بازرسی‌های خودکار برای قطعات مشابه می‌شود.

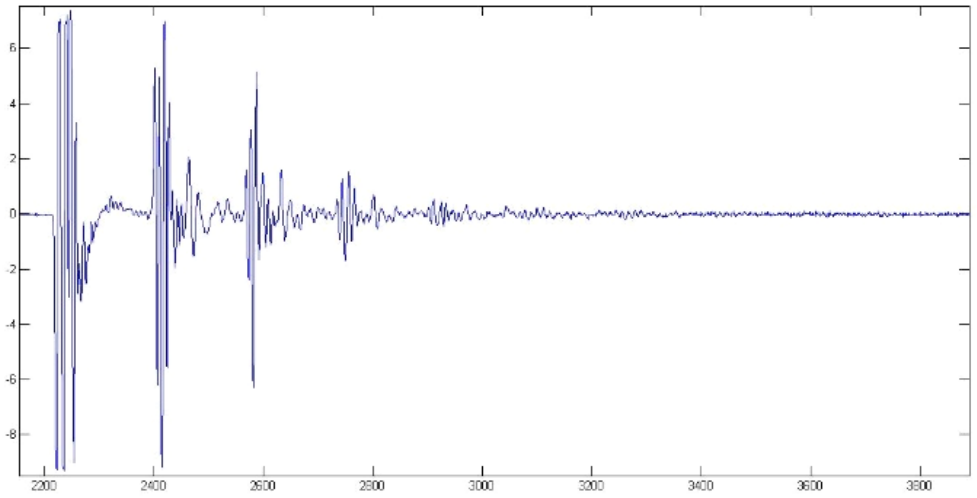
جدول ۱. نتایج حاصل برای محاسبهٔ نسبت‌های دامنهٔ خروجی دوم به اول و سوم به اول

نوع اتصال	A_2/A_1	A_3/A_1
سالم	۰/۶۸۷	۰/۱۸۴
	۰/۴۸۰	۰/۲۴۱
	۰/۵۷۱	۰/۲۴۴
معیوب	۰/۹۰۰	۰/۴۸۳
	۰/۹۸۲	۰/۴۷۱
	۰/۹۸۴	۰/۴۶۴

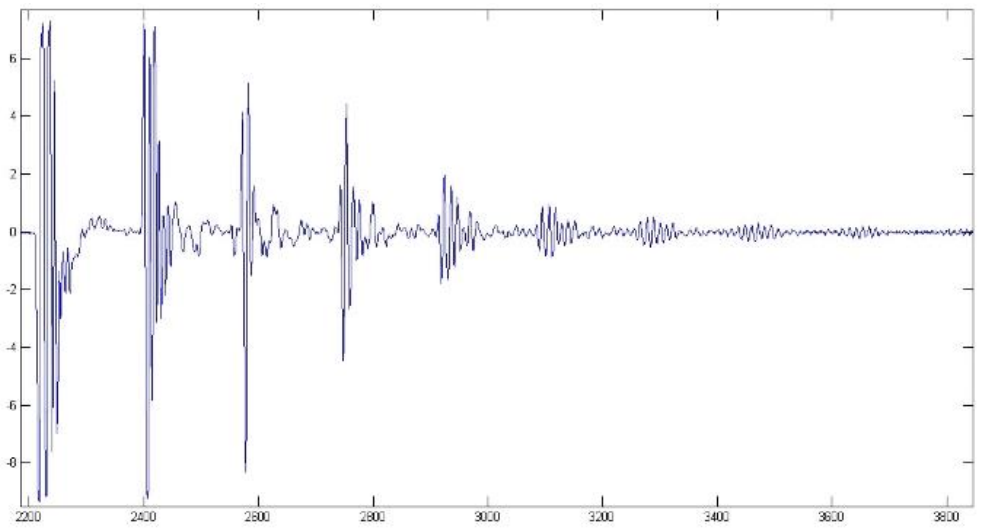
۹. نتیجه‌گیری

در این مقاله، معایب و مزایای روش‌های متنوع بازرسی فراصوتی اتصالات چسبی مورد بررسی قرار گرفت و فرایند طراحی و ساخت سیستم بازرسی فراصوتی با استفاده از تکنیک حباب‌ساز تشریح شد. آزمایش‌هایی روی نواحی سالم و دارای عیب ناپیوستگی یک اتصال چسبی سه‌لایهٔ انحنادار انجام و نسبت دامنه‌های خروجی مختلف برای هر یک از حالات محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که روش حباب‌ساز توانایی لازم برای شناسایی این عیب در سطوح انحنادار با قابلیت اطمینان بالا را دارد. این سیستم می‌تواند با اعمال تغییراتی برای طراحی و تولید سیستم‌های روبش‌گر تمام‌خودکار به‌کار رود تا از این رهگذر بتوان قطعات بزرگ، همچنین قطعاتی که دسترسی اپراتور به آنها

مخاطره‌آمیز و هزینه‌بر است، را به آسانی بازرسی کرد و به نتایج مطلوبی دست یافت.



شکل ٦. پژواک دریافتی از اتصال چسبی سالم



شکل۷. پژواک دریافتی از اتصال چسبی معیوب

۱۰. مآخذ

[1] Rose, J.L., P.A. Meyer "Ultrasonic Procedure for Predicting Adhesive Bond Strength." *Material Evaluation*, (1973):109-117.

[2] Tavou, Al. *Use of Wavelet Packet Transform for Signal Analysis in Adhesive Bond Testing*, Greece, 2003.

[3] Robinson, A.M., B.W. Drinkwater, *Dry-Coupled Low-Frequency Ultrasonic Wheel Probes: Application to Adhesive Bond Inspection*, Elsevier Science Ltd., UK, 2003.

[4] Maev, Gr. R., S. Titov, A. Bogachenkov, *Evaluation of Adhesively Bonded Joints In Automotive Industry With Ultrasonic Matrix Array Transducer*, Institute for Diagnostic Imaging Research Cancun, Mexico, 2011.

[5] Halmshaw, R., Edward Arnold, *Non-Destructive Testing*, 2nd Edition, 1991.

[6] Adams, R.D., *Adhesive Bonding*, Cambridge, CRC Press, 2000.

[7] Tavrou, C.K., "Evaluation of Adhesively Bonded Steel Sheets Using Ultrasonic Techniques", PhD Dissertation submitted to Swinburne University of Technology, 20-50, 2005.

[8] Vasilev, Valery V., Evgeny V. Morozov, *Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structure*, Australia, Elsevier, 2002.

[9] Titov, S.A., Maev, Gr. R., *Pulse-Echo NDT of Adhesively Bonded Joints in Automotive Assemblies*, Canada: Elsevier B. V., 2008

[10] Schwabe, M., Albrecht Maurer. "Ultrasonic Testing Machines with Robot Mechanics - A New Approach to CFRP Component Testing." *GE Sensing &Inspection Technologies*, 2010.

[11] Chapman, G.B., J. Sadler, R.G. Maev. "Ultrasonic Pulse-Echo NDE of Adhesive Bonds in Sheet-Metal Assemblies", *IEEE Ultrasonics Symposium*, Canada, 2006.

[۱۲] ضیغمی، م. "طراحی و ساخت یک سیستم فراصوتی روبش *C* جهت بازرسی اتصالات چسبی"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۲۰۰۸.

پی‌نوشت

1. bubbler
2. epoxy adhesives
3. cyanoacrylate adhesives
4. polychloroprene adhesives
5. Solvent Based adhesive
6. discontinuity
7. gross defects
8. poor adhesion
9. poor cohesive strength
10. kissing bonds
11. piezoelectric materials
12. bubbler (water column)
13. laminar stream
14. glass-fiber reinforced aluminum
15. local immersion technique
16. larger active scanning track
17. weeper body