

بازرسی و پایش وضعیت ورق فلزی به صورت غیرمخرب با آزمون فراصوت آرایه فازی به کمک آباکوس و موجک

شهرام یاردهی

کارشناس ارشد مهندسی میکاترونیک

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان واحد

سقز، سقز، ایران

yareei@iausaghez.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۴

چکیده

آزمون‌های فراصوتی یکی از روش‌های غیرمخرب در پایش سلامت و تشخیص عیوب است که به منظور جلوگیری از وقوع حوادث احتمالی، به صورت وسیع در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. به مرور زمان و با توسعه تجهیزات و ابزارهای در دسترس امکان انجام آزمون‌های فراصوت با استفاده از پروب‌های چند المانی فراهم شد. آزمون فراصوت آرایه فازی روش پیشرفته آزمون فراصوت است. استفاده از ابزارهای طراحی و پردازش برای آزمون‌های فراصوتی در مدل‌سازی آزمون و تفسیر نتایج مؤثر و مفید است. در این مقاله به منظور بررسی کارایی آزمون فراصوتی آرایه فازی در عیب‌یابی به کمک نرم افزار المان محدود آباکوس و ابزار پردازش سیگنال موجک، آزمون فراصوتی آرایه فازی برای پایش و عیب‌یابی دو نمونه ورق سالم و معیوب آلومینیومی مدل می‌شود. درستی نتایج با توجه به درصد خطای برآورد مکان عیب و لبه‌ی ورق به دست آمد. مدل‌سازی آزمون پیشرفته فراصوتی علاوه بر درک مفاهیم آن در طراحی بهینه آزمون نیز کارایی دارد. همچنین استفاده از ابزارهای پردازش سیگنال موجک در تفسیر دقیق نتایج مفید و مؤثر است.

واژگان کلیدی: آزمون فراصوت، پروب آرایه فازی، المان محدود، پردازش سیگنال، موجک

۱. مقدمه

ارزیابی و پایش دوره‌ای و بهنگام قطعات و تجهیزات صنعتی در جلوگیری از بروز حوادث و خرابی‌های احتمالی مؤثر و حائز اهمیت است. تنوع در روش‌های ارزیابی و آزمون مخرب و غیرمخرب این امکان را فراهم می‌سازد تا با توجه به شرایط

تجهیزات کاراترین روش بازرسی تعیین گردد. روش‌های غیرمخرب از جمله روش‌های پر کاربرد و مقرون به صرفه در پایش‌های حین سرویس محسوب می‌شود. با توجه به ماهیت و خواص فیزیکی - مکانیکی قطعات صنعتی آزمون فراصوت نسبت به دیگر روش‌های آزمون غیرمخرب، کاربردی‌تر

است. با توجه به ماهیت امواج فراصوت و نحوه تولید و انتشار آن آزمون فراصوتی با روش‌های متفاوتی انجام می‌گیرد. به‌کارگیری آرایشی از المان‌های فراصوتی برای آزمون و پایش غیرمخرب مواد و قطعات از روش‌های نوین آزمون‌های غیرمخرب است. استفاده از چند المان به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری، سرعت آزمون‌های غیرمخرب را بالا می‌برد و همچنین نتایج را به صورت تصویری ارائه می‌کند که تفسیر آنها و تصمیم‌گیری درباره وضعیت ماده به مراتب ساده می‌شود. پیچیدگی رفتار امواج تولید شده توسط شبکه المان‌ها و تأثیر متقابل این امواج بر روی یکدیگر، باعث بروز مسائلی در تفسیر و ارزیابی در استفاده از آرایه فازی فراصوت می‌شود. استفاده از روش‌های عددی در مدل‌سازی آزمون فراصوت و شبیه‌سازی انتشار امواج فراصوت آرایه فازی از روش‌های پیش‌بینی رفتار امواج، تفسیر نتایج حاصل شده و همچنین طراحی آزمون است. در مطالعات پیشین روش المان محدود^۱ نسبت به دیگر روش‌های عددی بیشتر مورد توجه بوده است. لودیک و لرد روش المان محدود را برای مدل‌سازی انتشار امواج فراصوت توسعه دادند [۱]. ماهوت و همکاران به منظور ارائه روش‌های جدید بازرسی با استفاده از آرایه فازی، این نوع آزمون را شبیه‌سازی نمودند [۲]. ساتیاناریان و همکاران با شبیه‌سازی امواج طولی آرایه فازی فراصوت عیوب احتمالی در سوژه را شناسایی نمودند به گونه‌ای که قادر به تصویرسازی عیوب و همچنین محاسبه اندازه آن بودند [۳]. به و همکاران، شبیه‌سازی تمرکز دسته پرتو میدان‌های پروب آرایه فازی فراصوت را در سوژه‌های مشخص، جوش فلزات غیرهمجنس، با شبیه‌سازی بر مبنای مدل انجام دادند [۴]. مایک و پنس با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی دخیل در عملکرد پروب‌های فراصوت آرایه فازی، این پروب‌ها را به صورت ریاضی تحلیل کردند و نحوه انتشار موج را به صورت قطبی نمایش دادند و بدین صورت موانع مفروض را مکان‌یابی نمودند [۵].

قبلا به این نکته اشاره شد که تحلیل آزمون‌های فراصوتی نسبتاً دشوار است. روش‌ها و ابزارهای متنوعی برای تفسیر و تحلیل پاسخ‌های دریافتی از پروب‌های فراصوتی وجود دارد و در این زمینه مطالعاتی به منظور معرفی و سنجش ابزار و کارایی این روش‌ها برای تفسیر نتایج صورت گرفته است. روش دکانولوشن پردازش سیگنال به منظور شناسایی عیوب ترک و حفره مورد استفاده قرار گرفته است [۶]. از پیش پردازش و نرمالیزه کردن سیگنال‌های فراصوت و پس‌پردازش آن با شبکه‌های عصبی جهت ارزیابی ساختار کامپوزیت استفاده شده است [۷]. سیستم‌های پایش آنلاین و کنترل کیفیت و ارزیابی از شبکه‌های عصبی و دیگر ابزار پردازش سیگنال از جمله تبدیل موجک گسسته و پیوسته جهت طبقه‌بندی و کلاس‌بندی عیوب استفاده می‌کند [۸]. در این مقاله به کمک دو ابزار المان محدود و پردازش سیگنال موجک به توضیح و تفسیر آزمون غیرمخرب فراصوتی آرایه فازی پرداخته می‌شود. در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار آباکوس دو ورق سالم و معیوب و همچنین پروب آرایه فازی مدل و انتشار امواج در ورق و ثبت سیگنال فراصوتی شبیه‌سازی می‌شود. سپس به کمک نرم افزار متلب و ابزار پردازش سیگنال موجک نتایج ثبت شده توسط پروب آرایه فازی پیش‌پردازش و پردازش می‌شود. جهت تعیین انرژی هر سیگنال از میانگین مقیاس شده موجک استفاده شد. موقعیت عیب و لبه‌های ورق به کمک سرعت موج عرضی یا طولی و مدت زمان ثبت شده هر پیک مکان‌یابی شد. درصد خطای تخمین مکان عیب و لبه ورق قابل قبول است.

۲. طراحی آزمون فراصوت آرایه فازی

هدف از آزمون‌های غیرمخرب فراصوتی پایش وضعیت و سلامت قطعات است و با توجه به سوژه مورد نظر سامانه آزمون به نحوی طراحی می‌شود که تجهیزات مورد نیاز برای آزمون و شناسایی قطعه به طور مناسب انتخاب گردد. در

طراحی آزمون مواردی شامل نوع و تعداد پروب‌ها، مکان و نحوه قرارگیری آنها روی قطعه، نوع موج مورد استفاده برای تحریک و شکل آن، تعیین می‌شود. اساس روش آرایه فازی آزمون‌های فراصوت با روش معمولی آن یکسان است. از جمله تفاوت‌های روش آرایه فازی با روش معمولی می‌توان به طراحی پروب از نظر ابعاد و تعداد المان‌های فراصوتی به کار رفته، نحوه تحریک المان‌ها و کنترل آنها و در نتیجه پایش قطعه مورد نظر اشاره کرد. پروب‌های آرایه فازی علاوه بر توانایی هدایت پرتو تولیدی در یک راستای معین، توانایی تمرکز عمقی آن در نقطه‌ای معین را نیز دارد که به موجب این، دو ویژگی روبش الکترونیکی (روبش بدون جابه‌جایی پروب) و پایش قطاعی سوژه امکان‌پذیر می‌شود. از جمله مزیت‌های پروب‌های آرایه فازی می‌توان به کنترل پویای دسته پرتو برای هدایت و انتقال بهتر به سوژه تحت آزمون، کاهش زمان پایش سوژه، افزایش قابلیت اطمینان در اندازه‌گیری عیوب با پایش قطاعی^۲، تنظیم پارامترهای پروب به منظور رسیدن به بهینه هدایت و تمرکز دسته پرتو اشاره کرد. پرتو منتشر شده از پروب معمولی (تک المانی) واگرا شده و تک جهتی است. در این پروب‌ها حرکت و زاویه پرتو محدودیت دارد، به همین دلیل عیوب بد جهت یا عیوبی که دور از محور پرتو قرار گرفته‌اند، در اکثر موارد شناسایی نمی‌شوند [۹].

روش‌های المان محدود به دلیل تسریع در فرایند شبیه‌سازی و حصول نتایج و هزینه پایین برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. جهت شبیه‌سازی آزمون در نرم افزار تحلیل المان محدود می‌بایست ملاحظات مربوط به انتخاب نوع و اندازه المان هندسی و گام زمانی، که برای حل عددی صحیح مسئله کلیدی هستند، منظور شود تا به نتایج قابل قبول رسید. برای شبیه‌سازی المان محدود آزمون فراصوت آرایه فازی از نرم‌افزار آباکوس ۶/۱۴ استفاده می‌شود. تفاوت در طراحی آزمون‌های فراصوت معمولی و آرایه فازی به کمک المان محدود در طراحی و نوع پروب مورد استفاده است. پس

از تعیین ابعاد قطعه مورد نظر و طراحی آن، آزمون فراصوت آرایه فازی با پروب ۸ المانی خطی مدل و انتشار دسته پرتو فراصوتی به داخل ورق به صورت مستقیم شبیه‌سازی می‌شود [۱۰].

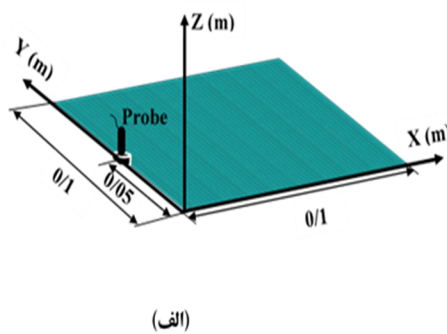
۲-۱. مشخصات نمونه و پروب آرایه فازی

برای طراحی آزمون ابتدا باید نمونه مورد آزمون طراحی شود. نمونه مورد آزمون دو ورق آلومینیومی سالم و معیوب (دارای ترک) با ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی‌متر مربع و ضخامت ۱ سانتی‌متر با مشخصات فیزیکی مکانیکی مطابق جدول ۱ است. عیب ورق شامل ترک در مرکز ورق به طول ۳ سانتی‌متر است. پس از مدل‌سازی ورق و تعیین مشخصات مکانیکی آن، از المان سه بعدی صلب ۸ گره دارای ۲۴ درجه آزادی که در نرم افزار آباکوس با C3D8R^۳ شناخته می‌شود، برای شبکه‌بندی ورق استفاده شده است. پس از طراحی نمونه برای مدل‌سازی آزمون فراصوت آرایه فازی، پروب ۸ المانی با آرایش خطی المان‌ها طراحی می‌گردد. المان‌های پروب به صورت چیدمان خطی و مجاور هم مدل می‌شود. مدل پروب به ازای تعداد المان‌های پروب، به صورت تعدادی از گره‌ها جهت بارگذاری انتخاب می‌گردد. شایان ذکر است که این گره‌ها به عنوان پروب فرستنده و گیرنده بر روی ورق و ثبت سیگنال در نظر گرفته می‌شود. المان‌های پروب به صورت خطی است که فاصله بین المان‌های مجاور به صورت بهینه ۱/۹۵ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود [۱۱].

جدول ۱. خواص فیزیکی - مکانیکی ورق‌های آلومینیومی

مدول کشسانی	نسبت پواسون	چگالی	سرعت موج طولی	سرعت موج عرضی
GPa		kg/m ³	m/s	m/s
۷۲	۰/۳۳	۲۵۸۰	۶۴۲۰	۳۰۴۰

تعیین شده برای المان در تمام حوزه مربعی شکل ورق ثابت است. تغییر اندازه المان در ورق ممکن است به عنوان ناپیوستگی‌های ریز منظور شود که این موضوع در شبیه‌سازی رفتار موج تأثیرگذار خواهد بود [۱۳]. محل قرارگیری پروب مطابق شکل ۱ در وسط ورق و در راستای محور Y است. محل پروب بستگی به نوع آزمون دارد و با توجه به قسمت‌هایی از قطعه و برای بازرسی مورد نظر متغیر است. تمامی لبه‌های ورق به جز لبه‌ای که پروب جهت انتشار موج بر روی آن قرار می‌گیرد، در تمامی جهت مقید می‌شود. در این مقاله هدف نحوه انتشار دسته پرتو فراصوتی به صورت مستقیم جهت پایش ورق است.



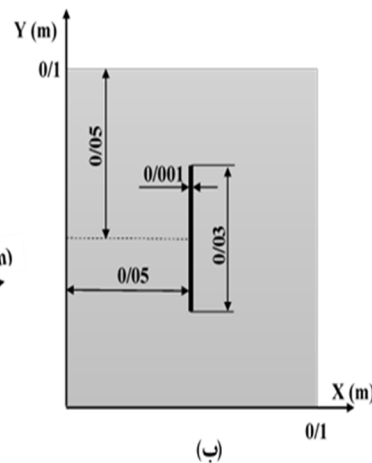
اندازه‌ی المان‌ها جهت پایداری و هم‌گرایی نتایج شبیه‌سازی در محدوده رابطه ۱ انتخاب می‌شود [۱۲].

$$\lambda/20 < h < \lambda/8 \quad (1)$$

در اینجا h اندازه المان و λ طول موج امواج منتشر شده است. طول موج مطابق رابطه تابعی از سرعت و فرکانس موج است.

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2)$$

در اینجا V سرعت موج و f فرکانس انتشار موج است. با توجه به رابطه ۱، رابطه ۲ و سرعت موج و فرکانس مرکزی ۱ مگاهرتز پروب و همچنین تست‌های هم‌گرایی انجام شده، اندازه مناسب المان ۱ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. اندازه



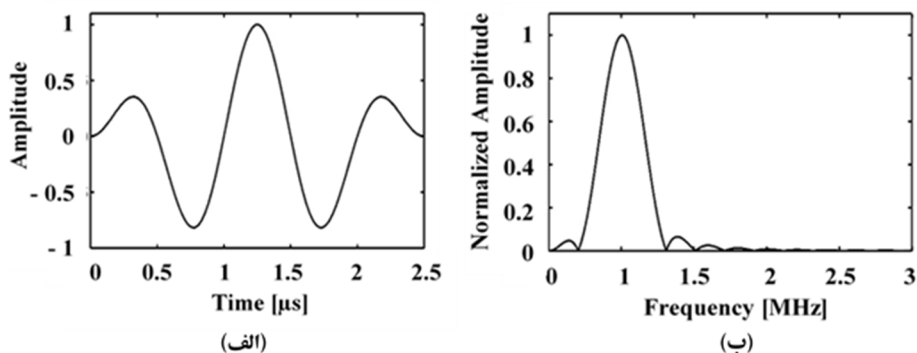
شکل ۱. الف) محل قرارگیری پروب ب) مشخصات هندسی ورق و موقعیت ترک

برانگیزش مورد نظر طول پنجره ۵ برابر دوره تناوب موج سینوسی در بسامد مرکزی $f = 1 \text{ MHz}$ در نظر گرفته شده است. این بازه زمانی برای تحریک و تولید موج نخستین مناسب است.

$$F(t) = \begin{cases} \sin(2\pi ft) \sin\left(\frac{2\pi ft}{5}\right) & t < 2.5/f \\ 0 & t > 2.5/f \end{cases} \quad (3)$$

۲-۲. تابع برانگیزش و تحریک المان‌های پروب

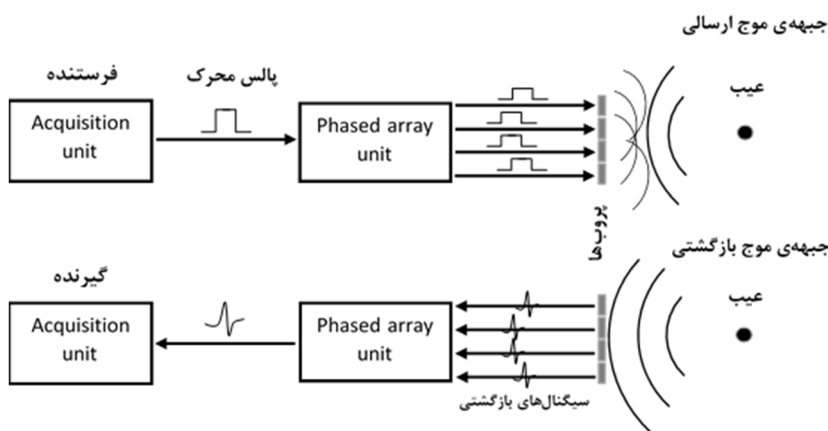
به منظور شبیه‌سازی انتشار دسته پرتو امواج فراصوتی و به‌طور کلی حل مسئله انتشار موج با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس از نسخه آباکوس صریح استفاده می‌شود. برای برانگیزش پروب فرستنده به‌طور معمول از یک تابع زمانی مطابق رابطه ۳ و شکل ۲ استفاده می‌شود. مودولاسیون دامنه سینوسی جهت طراحی تابع برانگیزش در آزمون‌های فراصوتی روشی مرسوم است [۱۱]. در تابع



شکل ۲. سیگنال برانگیزش پروب، با بسامد مرکزی 1 MHz در حوزه الف (زمان ب) فرکانس

همزمان و بدون تأخیر در راستای محور X و به داخل ورق فعال می‌شود. در شکل ۳ نحوه تحریک و ارسال موج به المان‌های پروب و همچنین دریافت سیگنال‌های بازگشتی و ثبت سیگنال واحد با پروب آرایه فازی نشان داده شده است.

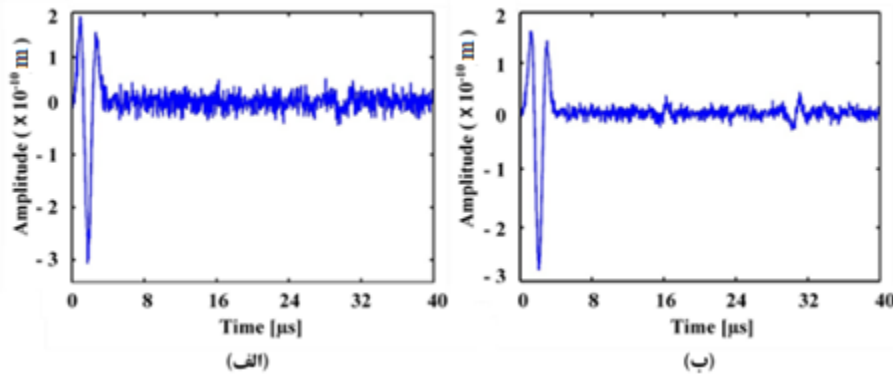
تابع برانگیزش مذکور برای همه المان‌های پروب یکسان است. عملکرد پروب‌های آرایه فازی بر مبنای کنترل و القای تأخیر زمانی است. در این مقاله برای پایش ورق و عیب‌یابی با جبهه مستقیم موج، همه المان‌های پروب به صورت



شکل ۳. چگونگی تحریک المان‌های پروب آرایه فازی در ارسال و دریافت موج

می‌شود مربوط به پردازش سیگنال با هدف حذف اغتشاشات احتمالی و اطلاعات غیرضروری است و در مراحل بعد استخراج ویژگی‌های مورد نظر انجام می‌گیرد. بر این اساس در شکل ۴ سیگنال‌های اندازه‌گیری شده آغشته به نویز که از هر یک از نمونه‌های سالم و معیوب در محل پروب دریافت می‌شود نشان داده شده است.

به منظور ملاحظه نویز آزمون که در عمل وجود دارد و سیگنال اندازه‌گیری شده را مغشوش می‌کند، در این شبیه‌سازی نیز یک فرایند تصادفی سفید با میانگین صفر و انحراف از معیار $0/5$ به سیگنال دریافتی از نرم‌افزار افزوده می‌شود. شایان ذکر است در آزمون‌های فراصوتی سهم عمده‌ای از تلاشی که برای استحصال نتایج صحیح صرف



شکل ۴. سیگنال ثبت شده آغشته به نویز الف) از قطعه سالم ب) از قطعه معیوب

مقادیر دامنه در بازه (۱ و -۱) قرار گیرد و از این رو مقایسه نتایج و تفسیر آنها به نسبت آسان تر خواهد شد. از مهم ترین مراحل پیش پردازش داده برای کسب اطلاعات مفید و حذف داده های نامربوط که همواره در سیستم های دینامیکی وجود دارند، حذف اغتشاش است. به این دلیل که حذف کامل اغتشاش در عمل امکان پذیر نیست، هدف این مرحله تقریب قابل قبولی از سیگنال بدون اغتشاش است. روش های مختلفی برای حذف اغتشاش ارائه شده است. تبدیل موجک گسسته (DWT)، مؤثرترین و جدیدترین روش حذف اغتشاش است. در تبدیل موجک دو پارامتر مهم، اسم تابع موجک و تعیین تعداد مراحل جداسازی باید تعریف شوند. انواع مختلفی از موجک ها، که موجک های مادر نامیده می شوند، برای کاربردهای خاصی مورد استفاده قرار می گیرند. برای تعیین تعداد مراحل بهینه، پس از هر مرحله باید نتایج را بررسی نمود. در هر مرحله ای که تقریب درستی از سیگنال حاصل شود، مرحله مورد نظر خواهد بود. البته برای تعیین مرحله بهینه می توان از الگوریتم های بهینه سازی نیز استفاده نمود. معمولاً اغتشاش دارای ماهیتی با فرکانس بالا است که در ترم های کوتاه ظاهر می شود. به این دلیل اغتشاش در مراحل ابتدایی جداسازی موجک حذف می گردد. برای سیگنال های حاصل از مدل سازی برای حذف اغتشاش از تابع موجک دابچیز^۵ ۳ استفاده شده است، که به خوبی مؤلفه فرکانس بالا را از سیگنال اصلی حذف نموده و تقریب

اکنون لازم است پیش از قضاوت درباره نتیجه آزمون، سیگنال ها جهت حذف نویز پردازش شوند.

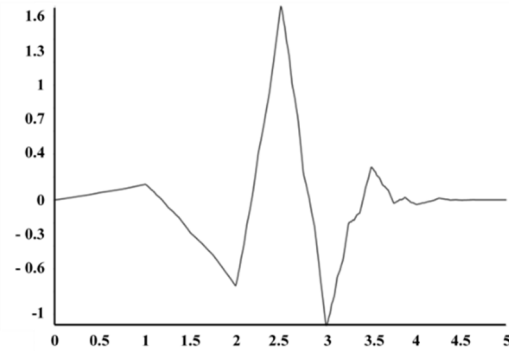
۳. تحلیل سیگنال

در روش آزمون های غیرمخرب مبتنی بر امواج فراصوت برای تفسیر نتایج و پایش سلامت قطعه نسبت به سایر روش های غیرمخرب، به دانش های تخصصی به ویژه در حوزه پردازش سیگنال نیاز است. در آزمون های فراصوتی هدف از پردازش سیگنال در مرحله نخست حذف اغتشاشات احتمالی و اطلاعات غیرضروری و بی تأثیر و در مراحل بعد استخراج ویژگی های مهم و کاربردی در فرایند شناسایی سوژه است. در ادامه این قسمت سیگنال های ثبت شده مدل طی سه مرحله پیش پردازش، پردازش و پس پردازش تحلیل و نتایج حاصل از هر کدام تفسیر می شود.

۳-۱. پیش پردازش سیگنال

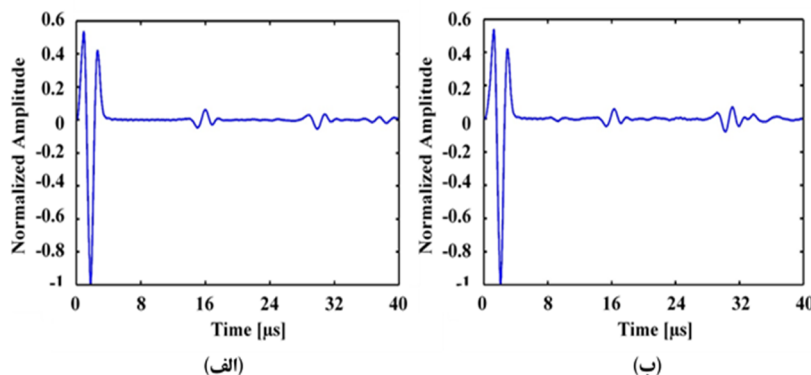
در این مقاله پس از ثبت سیگنال توسط پروب از فرایندهای نرمالیزه کردن دامنه، حذف نویز و اغتشاش، حذف بخش نامتناوب سیگنال برای تفسیر بهتر نتایج استفاده می شود. از نرم افزار متلب و تولباکس موجک جهت پیش پردازش سیگنال های ثبت شده استفاده می شود. نرمال کردن دامنه مبتنی بر بزرگ ترین دامنه سیگنال ثبت شده معیار مناسبی جهت تفسیر نتایج است. این روش سبب می شود تا تمامی

قابل قبولی از سیگنال بدون اغتشاش را نتیجه داد. در شکل ۵ تابع موجک دابچیز ۳ نشان داده شده است [۱۴].



شکل ۵. تابع موجک دابچیز ۳ [۱۴]

بخش نامتناوب سیگنال ناشی از وجود دامنه‌های مثبت و منفی غیریکنواخت است. این ویژگی سیگنال‌ها، در فرایند شناسایی و بازرسی غیرضروری می‌نماید و معمولاً در ادبیات فن برای دامنه سیگنال مقدار میانگین صفر را ترجیح می‌دهند. پس از حذف اغتشاش از سیگنال‌های دریافتی، بخش نامتناوب سیگنال‌ها نیز حذف خواهد شد. به طوری که میانگین آنها تقریباً برابر صفر خواهد شد. شکل ۶ سیگنال‌های حاصل از سه مرحله پیش پردازش را نشان می‌دهد.



شکل ۶. سیگنال‌های پیش پردازش شده، الف) ورق سالم ب) ورق معیوب

نسبت از سایر توابع دیگر بهتر است [۱۶]. برای تبدیل پیوسته موجک سیگنال پیش پردازش شده از تابع مادر دابچیز استفاده می‌شود. جهت تعیین میزان انرژی پیک‌های برگشتی از عیب و انتهای ورق، مطابق رابطه ۵ از تبدیل موجک پیوسته بر مبنای توان میانگین مقیاس شده‌ی موجک (SAP)^۷ استفاده می‌شود [۱۷].

$$\begin{aligned} \text{CWT}(a, b) &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{SAP}(n) &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |\text{CWT}(a_i, n)|^2 \\ , n &= 1, 2, 3, \dots, N \end{aligned} \quad (5)$$

۲-۳. پردازش سیگنال

پردازش سیگنال‌های دریافتی در تحصیل دقیق اطلاعات مربوط به نمونه و در جهت شناسایی عیوب احتمالی آن مفید است. برای پردازش سیگنال‌های حاصل از پیش پردازش از تبدیل موجک پیوسته (CWT)^۶ استفاده می‌شود. رابطه ۴ بیانگر تبدیل موجک پیوسته است [۱۵].

ضرایب a و b به ترتیب مقیاس و شیفت تابع موجک هستند. $\text{CWT}(a, b)$ ، ضرایب موجک، یک ماتریس $M \times N$ است که M ، بزرگ‌ترین مقیاس و تعیین کننده درجه تفکیک تبدیل موجک و N ، تعداد نقاط نمونه سیگنال است. این ضریب میزان همبستگی بین دو موج مورد بررسی، موجک و سیگنال پیش پردازش شده را بیان می‌کند. نتایجی که موجک دابچیز در تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی و انتشار موج ارائه می‌کند به

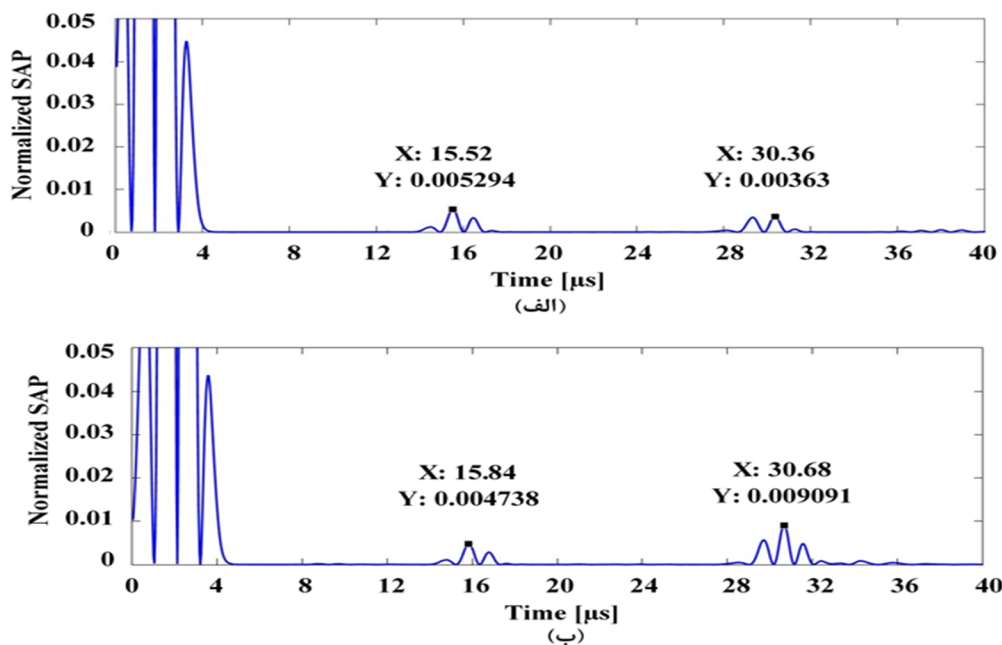
می‌شود و موقعیت‌ها نسبت به این مکان سنجیده می‌شوند. با توجه به درصد خطای تخمین مکان عیب و لبه ورق، نتایج به‌دست آمده از المان محدود صحت‌سنجی می‌شود.

$$\Delta X = \Delta V * t \quad (6)$$

در اینجا، ΔX مسافت طی شده توسط موج، ΔV سرعت طولی موج و t زمان پیک‌های برگشتی موج به پروب است. با توجه به اینکه مسافتی که موج تا لبه ورق یا عیب طی می‌کند شامل رفت و برگشت می‌شود، پس مکان لبه ورق یا عیب نصف مقداری است که از محاسبات به‌دست می‌آید. مطابق رابطه ۷ مقدار درصد خطای تخمین مکان عیب یا لبه ورق محاسبه می‌شود.

$$= \frac{\text{موقعیت مکانی تخمین زده شده - موقعیت مکانی واقعی}}{\text{موقعیت مکانی واقعی}} \times 100 \quad (7)$$

در این رابطه، M ، بزرگ‌ترین مقیاس در طول CWT است. با توجه به انرژی پیک‌های برگشتی و زمان رسیدن آنها و در نتیجه مدت زمان پرواز (TOF)^۷ محل دقیق عیب می‌تواند تعیین شود. در شکل ۷ نتایج حاصل از توان سیگنال‌ها نشان داده شده است. در جدول ۲ مدت زمان پرواز هر یک از پیک‌های برگشتی ارائه شده است. در ورق سالم، پیک اول و دوم هر دو مربوط بازگشت موج از لبه ورق است. فاصله لبه ورق تا پروب برابر فاصله ضلع‌های کناری ورق تا پروب است. در ورق معیوب پیک اول شامل بازگشت موج از لبه ورق و پیک دوم شامل بازگشت موج از عیب و همچنین از لبه ورق برای بار دوم است. با استفاده از سرعت موج در آلومینیوم و مدت زمان پرواز ثبت شده، مکان عیب در ورق معیوب و مسافت طی شده توسط موج در ورق سالم، طبق رابطه ۶ که بیان‌گر رابطه سرعت متوسط است، برآورد شد. مکان پروب به عنوان نقطه مرجع طی موج در نظر گرفته



شکل ۷. توان میانگین مقیاس شده‌ی موجک الف) صفحه سالم ب) صفحه معیوب

جدول ۲. استخراج ویژگی‌های سیگنال به کمک SAP و تخمین لبه ورق و مکان عیب با استفاده از سرعت عرضی و طولی موج در آلومینیوم

زمان پرواز پیک اول	زمان پرواز پیک دوم	تخمین مکان لبه ورق	درصد خطا	تخمین مکان عیب	درصد خطا
μs	μs	mm	%	mm	%
۱۵/۵۲	۳۰/۳۶	۴۹/۸۲	۰/۳۶	۹۷/۴۶	۲/۵۴
۱۵/۸۴	۳۰/۶۸	۵۰/۸۵	۱/۷	-	-

۳-۳. پس پردازش سیگنال

مرحله پایانی پردازش سیگنال، مرحله پس پردازش است. در این مرحله نتایج حاصل از دو مرحله قبلی، پیش پردازش و پردازش، تفسیر و تشریح می‌شود. در این مرحله وضعیت سلامت ماده بررسی می‌شود و عیوب احتمالی موجود در آن مکان‌یابی می‌شود. با تحریک پروب، امواج در سطح و لبه مرزی ورق منتشر می‌شود. با توجه به سیگنال و پیک‌های ثبت شده و همچنین شماتیک پویانمایی مشاهده شد که سرعت طی مسیر موج در لبه ورق تقریباً دو برابر مقدار آن در سطح ورق است. مطابق جدول ۲ و سرعت طولی و عرضی موج در آلومینیوم نتیجه می‌شود که امواج منتشر شده در لبه ورق، طولی و امواج منتشر شده در سطح ورق عرضی است. در شکل ۷ (الف) دو پیک ناشی از پایش ورق سالم ثبت شده است. تضعیف ۳۱/۴۳ درصدی به وجود آمده در پیک دوم بیان‌گر ثبت اطلاعات توسط یک جبهه واحد موج است. با توجه به سرعت موج طولی منتشر شده در لبه ورق و مدت زمان ثبت شده هر پیک مشخص می‌شود که دو پیک ثبت شده مربوط به انعکاس موج طولی پس از برخورد با لبه ورق است. اطلاعات موج عرضی منتشر شده در ورق به دلیل تضعیف شدید آن ثبت نشده است. در شکل ۷ (ب) و پایش ورق معیوب، افزایش ۹۱/۸۷ درصدی پیک دوم مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه سرعت موج طولی تقریباً دو برابر موج عرضی است که در جدول ۱ مشاهده می‌شود و همچنین

برابری فاصله لبه ورق و ترک از پروب، افزایش دامنه پیک دوم ناشی از انعکاس موج عرضی از ترک و ادغام آن با موج طولی بازگشتی از لبه ورق است. در جدول ۲ با توجه به سرعت موج طولی و عرضی در آلومینیوم و مدت زمان ثبت شده هر پیک، فاصله لبه ورق از پروب و همچنین مکان عیب با درصد خطای قابل قبولی برآورد شد.

۴. نتیجه گیری

آزمون فراصوت آرایه فازی یک روش پیشرفته آزمون‌های غیرمخرب است. در این مقاله به منظور ارائه درک صحیحی از این آزمون‌ها، به کمک نرم‌افزار آباکوس دو مدل ورق سالم و معیوب و پروب آرایه فازی مدل شد. پس از پایش ورق و ثبت سیگنال‌ها به منظور تفسیر نتایج از نرم افزار متلب و ابزار پردازش سیگنال موجک استفاده شد. با توجه به نتایج به دست آمده از پردازش سیگنال و مدت زمان پرواز موج، مکان لبه ورق و عیب در ورق ترک‌دار با درصد خطای قابل قبولی برآورد شد. استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود علاوه بر ارائه درک از آزمون‌های فراصوت آرایه فازی، در طراحی این آزمون‌ها نیز بسیار تأثیرگذار خواهد بود. ابزارهای پردازش سیگنال موجک، در بالا بردن کیفیت سیگنال با حذف نویز و محاسبه انرژی آن به کمک تبدیلات پیوسته و گسسته موجک در مکان‌یابی و شدت عیب کاربرد دارد.

- [1] Ludwig, R., and W. Lord, "Developments in the finite element modeling of ultrasonic NDT phenomena", 1986.
- [2] Mahaut, S., S. Chatillon, E. Kerbrat, J. Porré, P. Calmon, and O. Roy, "New features for phased array techniques inspections: simulation and experiments", In *16th World Conf on Non Destructive Testing, Montréal*, 2004.
- [3] Satyanarayan, L., C. Sridhar, C. V. Krishnamurthy, and Krishnan Balasubramaniam, "Simulation of ultrasonic phased array technique for imaging and sizing of defects using longitudinal waves", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2007, Vol.84, no.12, pp.716-729.
- [4] Ye, Jing, Hak-Joon Kim, Sung-Jin Song, Sung-Sik Kang, Kyungcho Kim, and Myung-Ho Song, "Model-based simulation of focused beam fields produced by a phased array ultrasonic transducer in dissimilar metal welds", *NDT & E International*, 2011, Vol.44, no.3, pp.290-296.
- [5] Naik, Ashwini, and M. S. Panse, "Mathematical Modeling of Ultrasonic Phased Array for Obstacle Location for Visually Impaired", *Journal of VLSI and Signal Processing*, 2013, Vol.2, pp.52-56.
- [6] Song, Shoupeng, and Peiwen Que, "An effective defect identification scheme in pipeline ultrasonic testing", *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2006, Vol.42, no.4, pp.255-260.
- [7] D'orazio, T., M. Leo, A. Distanto, C. Guaragnella, V. Pianese, and G. Cavaccini, "Automatic ultrasonic inspection for internal defect detection in composite materials", *NDT & e International*, 2008, Vol.41, no.2, pp.145-154.
- [8] Kesharaju, Manasa, Romesh Nagarajah, Tonzhua Zhang, and Ian Crouch, "Ultrasonic sensor based defect detection and characterisation of ceramics", *Ultrasonics*, 2014, Vol.54, no.1, pp.312-317.
- [9] Yareiee, Shahram, Mohammad Reza Sayyed Noorani, and Ahmad Ghanbari, "Simulation of Waves Propagation via Linear Phased Array Probe with Improved Design in Ultrasonic Inspection Tests", *Modares Mechanical Engineering*, 2016, Vol.16, no.6, pp.353-361.
- [10] Yareiee, Sh., "Design and Modeling of Ultrasonic Phased Array Testing and Ultrasonic wave Propagation Simulation in Metal Plate by Finite Element Method (ABAQUS)", *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, 2018, Vol.9, PP.26-33. (in Persian).
- [11] Yareiee, Shahram, Mohammad Reza Sayyed Noorani, and Ahmad Ghanbari, "Simulation of Waves Propagation via Linear Phased Array Probe with Improved Design in Ultrasonic Inspection Tests", *Modares Mechanical Engineering*, 2016, Vol.16, no.6 pp.353-361. (in Persian)
- [12] Blake, Richard John, "Numerical models for Rayleigh wave scattering from surface features", PhD diss., University College London (University of London), 1988.
- [13] Daryabor, P., M. Farzin, and S. Koohestani, "Modeling of Nondestructive Ultrasonic Test Of Bonding Between Aluminum And Composite Using Fem", 2011, pp.1-13.
- [14] Wavelet daubechies 3 (db3), <http://wavelets.pybytes.com/wavelet/db3> .

- [15] Su, Zhongqing, and Lin Ye, "Identification of damage using Lamb waves: from fundamentals to applications", Vol.48. Springer Science & Business Media, 2009.
- [16] Atashipour, Seyed Abdorahim, Hamid Reza Mirdamadi, Rasoul Amirfattahi, and Saeed Ziaei-Rad, "Application of wavelet transform in damage identification in a thick steel beam based on ultrasonic guided wave propagation", *Modares Mechanical Engineering*, 2013, Vol.12, no.5, pp.154-164.
- [17] Georgiou, Georgia, and Fernand S. Cohen, "Tissue characterization using the continuous wavelet transform. I. Decomposition method", *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 2001, Vol.48, no.2, pp.355-363.

پی نوشت:

1. Finite Element Method
2. Sectorial Scanning
3. An 8-node linear brick, reduced integration
4. Discrete Wavelet Transform
5. Daubechies
6. Continuous Wavelet Transform
7. Scale – Averaged Wavelet Power
8. Time of Flight