http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
دوره ۱۲ شماره ۵ دی ۱۳۹۱ ص‌ص ۱۵۴-۱۶۴

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۰/۹/۱۳
پذیرش ۹۱/۵/۸
ارائه در سایت ۹۱/۸/۳۰

کاربرد تبدیل موجک در آسیب‌یابی یک تیر ضخیم فولادی برپایهٔ روش پخش امواج هدایت‌شدهٔ فراصوت

سیدعبدالرحیم آتشی‌پور[۱]، حمیدرضا میردامادی[۲*]، رسول امیرفتاحی[۳]، سعید ضیایی‌راد[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
۳- استادیار مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
۴- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
* اصفهان، صندوق پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، hrmirdamadi @cc.iut.ac.ir

چکیده- در پژوهش حاضر سلامتی سازه‌ای یک تیر ضخیم فولادی (ST-52)، به کمک روش پخش امواج هدایت‌شدهٔ فراصوت با استفاده از حسگرهای ویفری فعال پیزوالکتریک، که یکی از مهم‌ترین تکنیک‌های پایش بلادرنگ سلامتی سازه‌هاست، بررسی شده است. پارامترهای کلیدی سیگنال برانگیزش مانند بسامد و مدت پنجره با توجه به ابعاد تیر و چیدمان ضربه-پژواک حسگرهای فعال پیزوالکتریک نصب شده روی آن تعیین می‌شود. تحلیل اجزای محدود با هدف مشخصه‌یابی پخش موج در تیر انجام شده است در حالیکه سیگنال‌های پخش موج به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری می‌شوند. برای پردازش سیگنال و استخراج ویژگی، از تبدیل موجک پیوسته و روش توان میانگین مقیاس‌شدهٔ موجک استفاده می‌شود. با استفاده از ویژگی‌های استخراج شده، وجود، موقعیت و شدت آسیب احتمالی موجود در سازه تعیین می‌شود. نتایج بدست آمده نمایانگر دقت بالای روش ارایه شده در شناسایی و مشخصه‌یابی آسیب نسبت به پژوهش گذشته دارد.

کلیدواژگان: پایش سلامتی سازه‌ها، پایش بلادرنگ، امواج هدایت‌شدهٔ فراصوت، تیر ضخیم فولادی، تبدیل موجک.

Application of wavelet transform in damage identification in a thick steel beam based on ultrasonic guided wave propagation

S. A. Atashipour[1], H. R. Mirdamadi[2*], R. Amirfattahi[3], S. Ziaei-Rad[4]

1- MSc Student, Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran
2- Assist. Prof., Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran
3- Assist. Prof., Elect. Comp. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran
4- Prof., Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran
* P. O. B. 84156-83111 Isfahan, Iran. hrmirdamadi@cc.iut.ac.ir

Abstract- In this study, the structural health of a thick steel beam, made of ST-52, is inspected by ultrasonic guided wave propagation method using piezoelectric wafer active sensors that is one of the most important techniques of on-line structural health monitoring. The key parameters of the diagnostic waveform such as excitation frequency and cycle number are determined in relation to beam dimensions as well as pulse-echo configuration of PZT active sensors attached to the beam. Finite element simulations were conducted to characterize wave propagation in the beam, and the signals of wave propagation were experimentally measured. For signal processing and feature extraction, continuous wavelet transform and scaled average wavelet power technique are used. Using the extracted features, probable existing damage in the structure is detected, localized, and intensified. The acquired results are representing a higher precision of the implemented method for damage identification and characterization with respect to a previous study.

Keywords: Structural Health Monitoring (SHM), On-Line Monitoring, Ultrasonic Guided Waves, Thick Steel Beam, Wavelet Transform.

۱- مقدمه

بالا بردن ایمنی و کاهش هزینه‌های نگهداری سازه‌های مهندسی از جمله مهم‌ترین اهداف صنایع دولتی و خصوصی هر کشور به شمار می‌آید. همه ساله بودجهٔ هنگفتی صرف نگهداری و تعمیر ساختمآنها، پل‌ها، هواپیماها، خطوط ریلی و دیگر سازه‌های مهندسی می‌شود. فقط در آمریکا سالانه دویست میلیارد دلار صرف نگهداری تجهیزات صنایع مختلف می‌شود، هم‌چنین یک چهارم کل هزینه‌های اجرایی در صنایع هوایی به نگهداری و تعمیر قطعات تخصیص داده می‌شود [۱]. بسیاری از روش‌هایی که هم‌اکنون برای بررسی سلامتی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند نه تنها پرهزینه‌اند، بلکه در بسیاری از موارد نیز مؤثر نخواهند بود و در برخی اوقات منجر به بروز حوادثی ناگوار می‌شود. نبود یک سامانه برای آسیب‌شناسی توانمند، سریع و قابل اعتماد در سازه، گاه منجر به وقوع حوادث دلخراش می‌شود. در سال ۲۰۰۷ حادثه پل I-35W بر روی رودخانه‌ی میسی‌سیپی در مینیاپولیس آمریکا سیزده کشته و بیش از صد زخمی به جای گذاشت. اگرچه بسیاری از روش‌های مرسوم شناسایی آسیب مانند بازرسی چشمی، آزمون رنگ نفوذی، روش‌های گوناگون پرتونگاری، آزمون جریان گردابی، پخش امواج آکوستیک، آزمون فراصوت و تحلیل مودال هنوز کاربرد فراوانی در صنعت دارد، به دلایل گوناگون امکان استفاده از آنها در سامانه‌های شناسایی بلادرنگ و خودکار آسیب وجود ندارد. برای مثال، روش‌های یاد شده به طور عمده نیازمند خروج سامانه مورد پایش از خط بهره‌برداری هستند. این خود باعث از بین رفتن وقت و سرمایه‌ی زیادی می‌شود. از سوی دیگر، وجود یک یا چند کاربر متخصص ضروری به‌نظر می‌رسد و در بیشتر موارد تجهیزات نسبتاً سنگین و بزرگی مورد نیاز است [۲]. از سویی بیشتر این روش‌ها به‌صورت ذاتی برون‌خط (آفلاین) هستند و امکان استفاده از آنها به صورت بلادرنگ وجود ندارد. آسیب‌شناسی به کمک روش پخش امواج هدایت‌شدهٔ فراصوت حدود یک دهه است که به عنوان جدی‌ترین تکنیک آسیب‌شناسی سازه‌ای مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. دلیل اصلی این توجه توانایی بالای این روش در پایش بلادرنگ سلامتی سازه‌هاست؛ آرزوی دیرینه‌ای که سایر روش‌های شناسایی آسیب مانند روش پخش امواج آکوستیک یا آزمون امواج فراصوت قادر به تحقق آن نبوده‌اند. روش پخش امواج هدایت‌شدهٔ فراصوت نسبت به سایر روش‌های آسیب‌یابی غیرمخرب دارای مزایا و معایبی است. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، توانایی این روش در پایش بلادرنگ از جمله مهم‌ترین مزیت‌های آن به شمار می‌رود؛ به گفته‌ای دیگر این امکان وجود دارد که با طراحی و ساخت یک سامانهٔ آسیب‌یاب مبتنی بر روش پخش امواج هدایت‌شدهٔ فراصوت، تمام فرایند آسیب‌شناسی به صورت تمام خودکار، بدون دخالت کاربر متخصص، به صورت لحظه به لحظه و با دقت و سرعت بالا صورت پذیرد. برتری دیگر این روش نسبت به سایر روش‌ها کوچک و ارزان بودن تجهیزات مورد استفاده در آن است. حسگرهای ویفری فعال پیزوالکتریک به عنوان مهم‌ترین تجهیزات مورد استفاده در این روش از اهمیت بالایی برخوردارند. این حسگرها، کوچک، سبک، بسیار حساس و ارزان قیمت هستند که گسترهٔ بسامدی بالایی نیز دارند و توانایی نصب دائمی، برخلاف پروب‌های سنتی آزمون فراصوت، بر سازه را دارند. شایان ذکر است که این روش دارای معایبی نیز هست؛ شاید بزرگ‌ترین مشکل آن پردازش سیگنال هوشمند، خودکار و بدون دخالت کاربر باشد که باعث خواهد شد این فرایند بسیار پیچیده شود. همچنین وجود همزمان مودهای متعدد و برهم‌کنش آنها از یک طرف و تأثیر منفی لرزش‌ها و اغتشاشات وارد شده از محیط پیرامون، از طرفی دیگر به پیچیده‌تر شدن آن کمک می‌کند. در سال‌های اخیر روش آسیب‌شناسی به کمک امواج هدایت‌شدهٔ فراصوت برای شناسایی آسیب توسط پژوهشگران زیادی در سازه‌های مختلفی بکار گرفته شده است. پایه‌ها و ستون‌های حامل در مهندسی عمران به ویژه در صنعت پل‌سازی، ملخ، بال، بدنه و بخش‌های مختلف بالگرد و هواپیما در صنایع هوافضا و ریل‌های راه‌آهن در سامانهٔ حمل‌ونقل ریلی از جمله مهم‌ترین سازهای مورد بررسی بوده‌اند. افزون بر این، سازه‌های استوانه‌ای شکل مانند خط‌های انتقال لوله در صنعت نفت و مخزن‌های جدار نازک در صنایع پتروشیمی نیز تا حدودی مورد علاقه پژوهشگران واقع شده‌اند. به عنوان مثال، کوک و همکاران کاربردهای مختلف حسگرهای ویفری فعال پیزوالکتریک را در پایش سلامتی سازه‌های رایج در صنایع هوافضا ارایه کردند [۳]. لی و همکاران آسیب‌شناسی در بخشی از یک ریل قطار را با استفاده از پخش امواج هدایت‌شده انجام دادند [۴]. به لحاظ ساختار و جنس سازه‌هایی که به آنها اشاره

شد، هم مواد فلزی مانند فولاد و آلومینیم و هم مواد کامپوزیتی مانند کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی مورد استفاده قرار گرفته است [۵-۷]. از دید پردازش سیگنال نیز روش‌ها و الگوریتم‌های گوناگون مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از معروف‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش‌های تبدیل فوریه، تبدیل زمان کوتاه فوریه، تبدیل ویگنر-وایل و تبدیل موجک اشاره کرد [۶]. نکتهٔ جالب توجه در مورد آسیب‌شناسی به کمک امواج هدایت‌شدهٔ فراصوت این است که بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته [۸-۱۳] به لحاظ ضخامت روی سازه‌های نازک صورت گرفته است. نخستین پژوهش در زمینهٔ آسیب‌شناسی سازه‌های ضخیم به کمک این روش توسط سان و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۰ صورت گرفت. الگوریتم پردازش سیگنال در این مقاله مبتنی بر تبدیل هیلبرت می‌باشد (که تبدیلی در حوزهٔ زمان است). به لحاظ سخت‌افزاری نیز از دو حسگر (یکی برای جایابی و دیگری برای عمق‌سنجی) استفاده شده است.

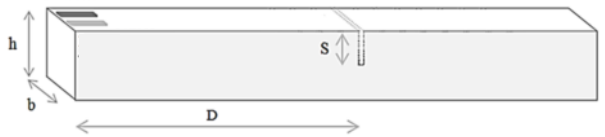
در مقالهٔ حاضر، برای یک تیر ضخیم (مشابه تیر بررسی شده توسط سان و همکاران) از جنس فولاد ST-52 شناسایی آسیب (ترک) با استفاده از امواج هدایت‌شدهٔ فراصوت انجام می‌شود. بدین منظور ابتدا مود خاصی از امواج هدایت‌شدهٔ فراصوت با بسامد مشخصی توسط حسگرهای ویفری فعال پیزوالکتریک برانگیخته می‌شود. امواج ایجاد شده در سراسر سازه پخش شده و بعد از برهم‌کنش با آسیب و مرز انتهایی، در قالب یک چیدمان به‌کارانداز/حسگر ضربه-پژواک[1] [۶] توسط یک حسگر گرداوری می‌شود. بعد از انجام فرایند پیش‌پردازش، سیگنال‌های بدست آمده با استفاده از تبدیل موجک پیوسته و روش توان میانگین مقیاس‌شدهٔ موجک پردازش می‌شوند. در پایان ویژگی‌هایی از سیگنال بدست می‌آید که با استفاده از آنها وجود، موقعیت و شدت آسیب احتمالی تعیین می‌شود. نتایج بدست آمده حاکی از برتری سخت‌افزاری و نرم‌افزاری روش ارایه شده نسبت به پژوهش سان و همکاران دارد.

۲- شبیه‌سازی اجزای محدود

از آنجایی که سیگنال برانگیزش نقش کلیدی در فرایند آسیب‌شناسی مبتنی بر روش پخش امواج هدایت‌شده بر عهده دارد، به منظور ارزیابی توانایی آن در شناسایی آسیب پیش از انجام آزمون‌های آزمایشگاهی از شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده می‌شود. بدین منظور تحلیل سه‌بعدی و گذرای پخش موج با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس (بسته‌ی آباکوس صریح) انجام می‌شود. در کلیهٔ شبیه‌سازی‌ها از المان آجری C3D8R که در مجموع ۸ گره و ۲۴ درجه آزادی دارد، استفاده شده است. اندازهٔ ضلع المان نیز ۱ میلی‌متر درنظر گرفته شده است که به خوبی معیار تعیین اندازهٔ المان ارائه شده در مرجع [۸] را ارضا می‌کند. شکل ۱ نمای کلی تیر ضخیم مورد بررسی را به همراه ویفرهای پیزوالکتریک و یک ترک نمونه نشان می‌دهد. ترک‌هایی که در تحلیل‌های اجزای محدود و آزمون‌های آزمایشگاهی مشخصه‌یابی شده‌اند، همگی با پهنای ۱ میلی‌متر و در ۸ عمق مختلف (S) از ۲/۵ تا ۲۰ میلی‌متر و در موقعیت ۱۷۵ میلی‌متر از لبهٔ سمت چپ تیر (D) در نظرگرفته شده‌اند. همچنین مقطع تیر (b=25×h=34) میلی‌متر می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، از دو حسگر ویفری فعال پیزوالکتریک استفاده شده است که یکی به عنوان به‌کارانداز و دیگری به عنوان حسگر عمل می‌کند.

همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، سیگنال برانگیزش در فرایند شناسایی آسیب به کمک پخش امواج هدایت‌شدهٔ فراصوت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین دلیل لازم است ویژگی‌های مختلف آن مانند بسامد مرکزی، شکل موج و مدت پنجره با دقت زیادی گزینش شود وگرنه فرایند شناسایی بسیار دشوار و گاه ناشدنی خواهد شد. از آنجایی که سازهٔ مورد بررسی به لحاظ پخش موج محیطی پراکننده است (سرعت پخش مودهای مختلف وابسته به بسامد برانگیزش و هندسهٔ سازه است)، لازم است سیگنال برانگیزش به گونه‌ای گزینش گردد که پدیدهٔ پراکنش کمینه باشد. برای دست‌یابی به این هدف می‌توان از نمودارهای پراکنش استفاده کرد.



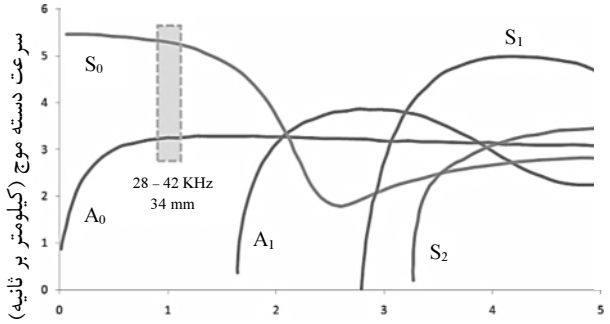
شکل ۱ شمای کلی تیر ضخیم مورد بررسی شامل یک ترک نمونه

1. Actuator/Sensor Pulse-Echo Configuration

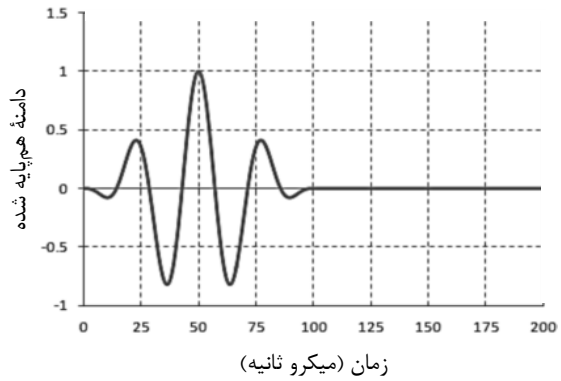
شکل ۲ نمودار پراکنش موج را در یک محیط فولادی نشان می‌دهد. در این شکل یک ناحیه با پهنای بسامدی پایین که در آن سرعت پخش دسته موج کم‌ترین حساسیت را نسبت به حاصل‌ضرب بسامد برانگیزش و ضخامت سازه دارد، با مستطیلی مشخص شده است. با در نظر گرفتن این نکته که ضخامت تیر مورد بررسی ثابت و برابر با ۳۴ میلی‌متر است و از سویی دیگر حسگر ویفری فعال پیزوالکتریک که به عنوان به‌کارانداز عمل می‌کند، مود پادمتقارن اصلی (A_0) را ایجاد می‌کند، بسامد بهینهٔ برانگیزش در گسترهٔ ۴۲-۲۸ کیلوهرتز تعیین می‌شود. آشکار است که در این بازهٔ بسامدی پراکنش موج کمینه است.

ویژگی مهم دیگر سیگنال برانگیزش مدت پنجره آن است. اگر مدت سیگنال (یا همان تعداد دوره‌های تناوب) از مقداری مشخص بیشتر باشد، بسته موج‌های برگشتی از آسیب و مرزها با دسته موج برانگیزش تداخل پیدا خواهد کرد [۱۴] و با برهم‌کنش آنها مودهای جدیدی به وجود خواهد آمد. این مساله باعث می‌شود فرایند پردازش سیگنال و پیامد آن شناسایی آسیب بسیار دشوار شود. از سویی دیگر هرچه مدت پنجره سیگنال بیشتر باشد، پهنای نوار بسامدی آن کوچک‌تر خواهد بود که این خود منجر به کاهش پدیدهٔ پراکنش می‌شود [۱۰,۹]. بنابراین سیگنال برانگیزش باید به گونه‌ای گزینش شود که تعادل نسبی بین این دو ویژگی (کوچک بودن مدت پنجره و پایین بودن پهنای بسامدی) برقرار باشد. به طور معمول در فرایند شناسایی آسیب بر پایهٔ روش پخش امواج هدایت‌شده از یک سیگنال سینوسی با ۵ دورهٔ تناوب استفاده می‌شود که با یک تابع پنجره (مانند هنینگ یا گاوسی) مدوله شده باشد. در مقالهٔ کنونی از یک سیگنال سینوسی با ۳/۵ دورهٔ تناوب در بسامد مرکزی ۳۵ کیلوهرتز مدوله شده با تابع پنجرهٔ هنینگ استفاده شده است. شکل ۳ سیگنال برانگیزش را در حوزهٔ زمان و حوزهٔ بسامد (محاسبه شده با تبدیل فوریه سریع) نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۳- ب نمایان است، سیگنال برانگیزش پهنای نوار بسامدی محدودی دارد. با به‌کارگیری سیگنال برانگیزش نشان داده شده (شکل ۳)، شبیه‌سازی اجزای محدود انجام می‌شود.

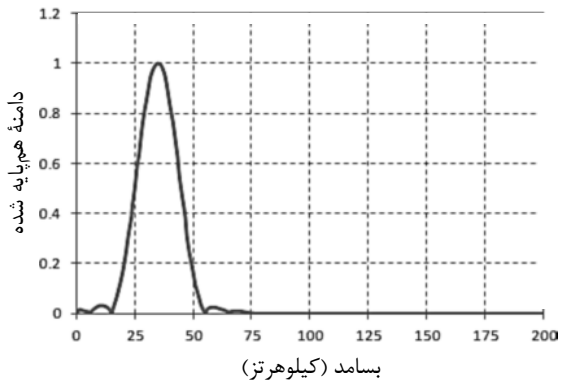
شکل ۴ سیگنال‌های بدست آمده از این تحلیل را برای تیر سالم و تیر دارای ترک با عمق‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص شده است، سه دسته موج از اهمیت زیادی برخوردار است: موج تابشی (یا همان موج ایجاد-شدهٔ نخستین)، موج بازتابیده شده از آسیب و موج برگشتی از مرز سازه. در بخش بعد نشان داده می‌شود که فرایند مشخصه‌یابی آسیب با استفاده از این دسته موج‌ها انجام می‌شود.



شکل ۲ خم‌های پراکنش موج برای یک محیط فولادی [۱۴]

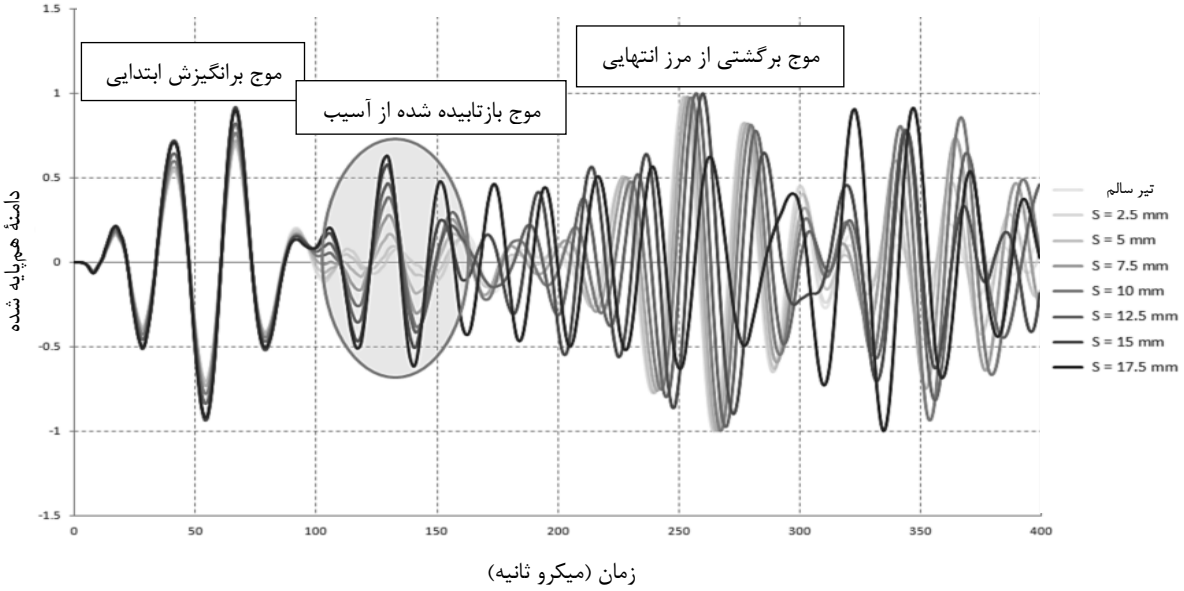


(الف)



(ب)

شکل ۳ سیگنال برانگیزش در الف) حوزهٔ زمان و ب) حوزهٔ بسامد



شکل ۴ یک نمونه از سیگنال‌های پاسخ بدست آمده از تحلیل اجزای محدود برای تیر سالم و تیر دارای ترک با شدت‌های مختلف

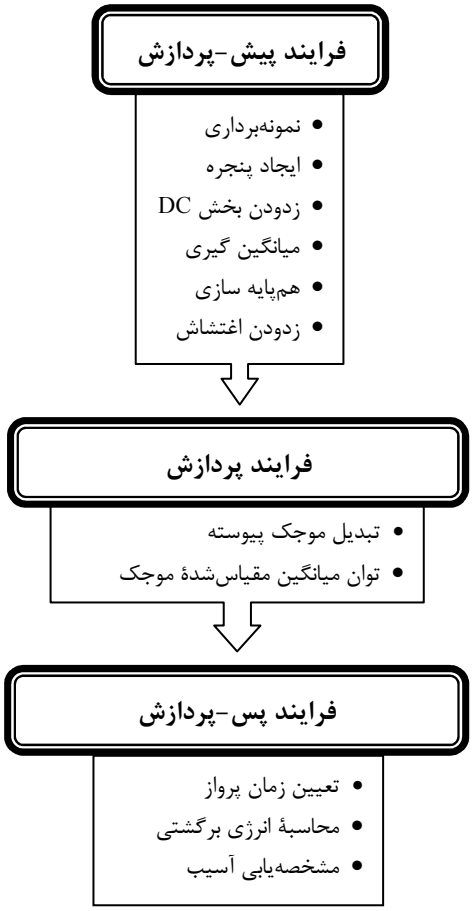
۳- پردازش دیجیتال سیگنال

پردازش سیگنال بخش عمده‌ای از فرایند شناسایی آسیب را دربرمی‌گیرد. هدف از پردازش سیگنال، به طور کلی شناسایی و زدودن اطلاعات غیر مفید و برجسته نمودن اطلاعات مفید و کاربردی سیگنال است. شکل ۵ نمای کلی این الگوریتم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، فرایند پردازش سیگنال از ۳ بخش اصلی تشکیل شده است: فرایند پیش‌پردازش، فرایند پردازش و فرایند پس-پردازش. در این قسمت هر یک از این بخش‌ها تشریح می‌شود:

۳-۱- فرایند پیش-پردازش

۳-۱-۱- نمونه‌برداری

نخستین گام در فرایند پردازش دیجیتال سیگنال، تبدیل سیگنال آنالوگ بدست آمده از حسگر به یک سیگنال دیجیتال از راه نمونه‌برداری در یک بسامد مناسب است. بسامد نمونه‌برداری نقش بسیار مهمی در کیفیت سیگنال ذخیره شده دارد چنان که اگر این بسامد از حدی کمتر باشد، سبب خواهد شد اطلاعات مفیدی از سیگنال از دست رود؛ از طرفی دیگر اگر این بسامد از حدی بیشتر باشد، حجم زیادی از داده‌های ناضروری ایجاد می‌شود که ذخیره‌سازی آنها با مشکل کمبود فضای سخت‌افزاری روبرو خواهد شد.



شکل ۵ الگوریتم پردازش دیجیتال سیگنال

طبق معیار نایکوئیست می‌توان نمونه‌برداری را دست‌کم در بسامدی معادل دو برابر بسامد برانگیزش سیستم انجام داد؛ اما طبق بیشتر مقالات موجود در ادبیات فن، معمولاً با توجه به شرایط خاص آزمایش، نمونه‌برداری در بسامدهایی بالاتر از بسامد نایکوئیست انجام می‌پذیرد؛ به عنوان مثال، نمونه‌برداری در پژوهش مرجع [۱۴] در فرکانس ۲۰/۴۸ مگاهرتز انجام شده است که نویسندگان دلیل این انتخاب را صرفاً بیشتر بودن آن نسبت به فرکانس نایکوئیست (که در اینجا ۷۰ کیلوهرتز می‌باشد) و هماهنگی با سامانه‌های مورد استفاده در آزمایشگاه مربوطه اعلام کرده‌اند. در پژوهش پیش‌رو فرکانس ۴ مگاهرتز انتخاب شده است چرا که هم معیار نمونه‌برداری نایکوئیست را ارضا می‌کند و هم با تنظیمات سامانهٔ جمع‌آوری سیگنال و اسیلوسکوپ مورد استفاده هماهنگی دارد.

۳-۱-۲- پنجره‌گذاری

با در نظر گرفتن طول کوتاه نمونه‌ی مورد بررسی (۳۰۰ میلی‌متر) و بالا بودن سرعت پخش موج (حدود ۳۰۰۰ متر بر ثانیه)، پنجره‌ای به طول ۴۰۰ میکروثانیه، که دربرگیرندهٔ اطلاعات مفید مربوط به ویژگی‌های سازه و آسیب‌های احتمالی موجود است، از سیگنال بدست آمده از حسگر جدا می‌شود و از بقیه‌ی سیگنال نیز که بیشتر برآمده از برهم‌کنش مودهای مختلف موج است، چشم‌پوشی می‌شود.

۳-۱-۳- زدودن بخش DC

بخش نامتناوب (DC) زمانی در یک سیگنال وجود دارد که دامنه‌های مثبت و منفی توزیع یکنواختی نداشته باشد. به طور معمول بهتر است که دامنهٔ میانگین سیگنال مقدار صفر داشته باشد. اگرچه ایجاد بخش نامتناوب در فرایند مدولاسیون دامنه[1] و بسامد[2] کاربرد فراوانی دارد، در بیشتر کاربردهای فرایند پردازش سیگنال از جمله فرایند شناسایی آسیب وجود بخش نامتناوب پدیده‌ای نامفید قلمداد می‌شود و باید آن را حذف کرد. در مقالهٔ حاضر با استفاده از یک فیلتر دست بالا[3] این کار انجام می‌شود. به طور میانگین سیگنال‌های پردازش شده در اینجا حدود ۴/۸ میلی‌ولت بخش نامتناوب دارد.

۳-۱-۴- میانگین‌گیری

در اقدام بعدی، به منظور دست‌یابی به یک رفتار مشخص از سیگنال و انجام عملیات مقدماتی زدودن اغتشاش، میانگین‌گیری که یک فیلتر مهم در پردازش دیجیتال سیگنال به شمار می‌آید، انجام می‌شود. برای میانگین‌گیری سیگنال روش‌های متعددی وجود دارد. یکی از پرکاربردترین آنها که از دسته‌ی فیلترهای در حال حرکت همزمان[4] می‌باشد، روش میانگین‌گیری تناوبی نامیده می‌شود [۱۴]. در این روش، میانگین‌گیری برای هر نقطهٔ نمونه نسبت به تعدادی مشخص نمونه قبل و بعد از آن صورت می‌پذیرد. در اینجا از میانگین‌گیری مرتبه‌ی ۱۰ (میانگین‌گیری با ۱۰ نقطه نمونهٔ همسایه) استفاده شده است.

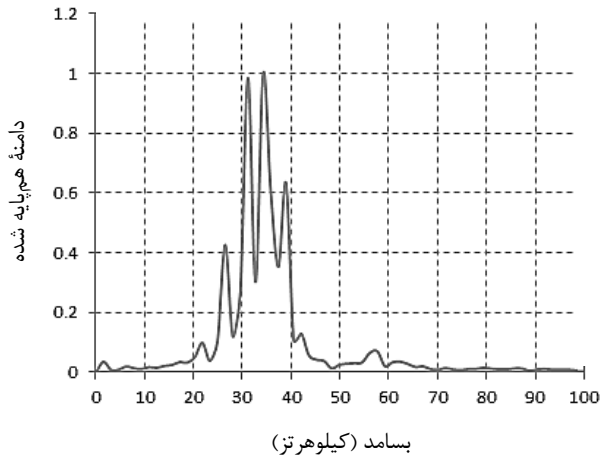
۳-۱-۵- هم‌پایه‌سازی

سیگنال‌های بدست آمده از روش پخش امواج هدایت‌شده به طور معمول در شرایط متفاوت کاری جمع‌آوری می‌شود. از همین‌رو، هم‌پایه‌سازی نقش به‌سزایی در تفسیر صحیح سیگنال‌ها و مقایسهٔ درست آنها با هم دارد. در اینجا سیگنال‌ها نسبت به مقدار دامنهٔ بیشینه سیگنال برانگیزش هم‌پایه شده‌اند به گونه‌ای که تمام مقادیر در بازهٔ [۱،۱-] قرار می‌گیرد.

۳-۱-۶- زدودن اغتشاش

از آنجایی که در واقعیت تمام سیستم‌های دینامیکی دارای اغتشاش هستند، زدودن اغتشاش یکی از مهم‌ترین کارها در زمینهٔ پردازش سیگنال قلمداد می‌شود. اگرچه با انجام اقداماتی نظیر افزایش دامنهٔ سیگنال برانگیزش می‌توان نسبت سیگنال به اغتشاش[5] را پایین آورد، ولی باز هم اغتشاش در سیگنال‌های دریافتی از حسگر وجود دارد. برای زدودن اغتشاش از روش‌های گوناگونی استفاده می‌شود. در الگوریتم حاضر تبدیل موجک گسسته[6] به‌کار گرفته شده است. در این روش ابتدا سیگنال با استفاده از یک موجک مادر (که در اینجا موجک دابوچی مرتبه‌ی ۱۰ است) به سیگنال‌هایی در گستره‌های بسامدی پایین‌تر تقسیم می‌شود. سپس بسامد اصلی سیگنال (بسامد مرکزی) محاسبه می‌شود. بدین منظور می‌توان از تبدیل فوریه سریع استفاده کرد (شکل ۶).

1. Amplitude Modulation (AM)
2. Frequency Modulation (FM)
3. High-Pass Filter
4. Synchronous Moving Filter
5. Signal-to-Noise Ratio (SNR)
6. Discrete Wavelet Transform (DFT)



شکل ۶ اسپکتروم بسامدی سیگنال بدست‌آمده با استفاده از تبدیل فوریه سریع

بعد از محاسبهٔ بسامد اصلی سیگنال، بسامد مرکزی هر کدام از زیربانده‌های بدست آمده از تبدیل موجک گسسته محاسبه می‌شود. بسامد اصلی هر کدام از زیربانده‌ها که نزدیک‌تر به بسامد اصلی سیگنال باشد، همان زیرباند به عنوان بخش اصلی و بدون اغتشاش سیگنال تشخیص داده می‌شود و از بقیهٔ زیر- باندها صرف‌نظر می‌شود. در گام پایانی سیگنال فیلتر شده از زیربانده‌های دربرگیرندهٔ اغتشاش بازسازی می‌شود. شکل ۷ یک سیگنال بدست آمده از حسگر را پیش و پس از انجام فرایند پیش-پردازش نشان می‌دهد.

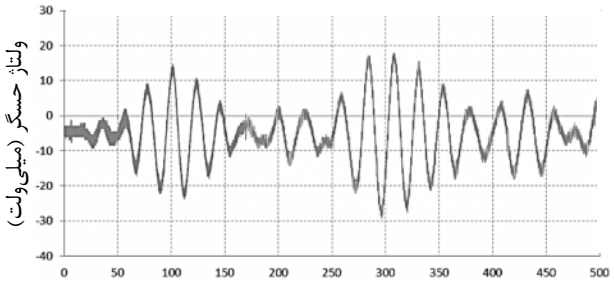
۳-۲- فرایند پردازش

هدف از فرایند پردازش بدست آوردن اطلاعات مفید از سیگنال مرتبط با ویژگی‌های مختلف سازه به ویژه آسیب‌های احتمالی موجود می‌باشد. بدین منظور، نخست با استفاده از تبدیل موجک پیوسته[1]، ضرایب موجک سیگنال پیش-پردازش شده را بدست می‌آوریم. در حالت کلی اگر یک سیگنال در حوزهٔ زمان با $f(t)$ مشخص شود، با انجام تبدیل پیوستهٔ موجک می‌توان به شکل مربعی از سیگنال به صورت زیر دست یافت [۶]:

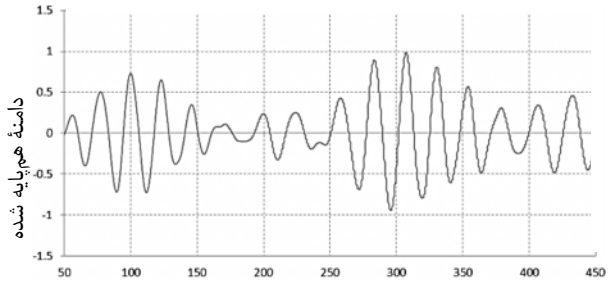
$$CWT(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\,\Psi^{*}\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t \qquad (۱)$$

به گونه‌ای که تابع Ψ^{*} شکل مزدوج‌مختلط تابع Ψ (تابع موجک مادر) است.

1. Continuous Wavelet Transform (CWT)



(الف)



(ب)

شکل ۷ سیگنال خام بدست آمده از آزمایش الف) پیش، و ب) پس از انجام فرایند پیش-پردازش

$CWT(a,b)$ که همان ضرایب موجک در مقیاس a و زمان b است، ماتریسی است $M\times N$ که M بزرگ‌ترین مقیاس و به گونه‌ای تعیین کنندهٔ درجهٔ تفکیک تبدیل موجک است و N تعداد نقاط نمونهٔ سیگنال. برای این‌که بتوان موقعیت زمانی و دامنه‌ی قله‌های انرژی سیگنال دیجیتال شده $f(n)$, n = 1, 2, 3, ..., N را به گونه‌ای دقیق‌تر بدست آوریم [۶]، از تکنیک توان میانگین مقیاس‌شدهٔ موجک[2] به صورت زیر استفاده می‌کنیم [۱۵]:

$$SAP(n)=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\left|CWT(a_i,n)\right|^2 \qquad (۲)$$

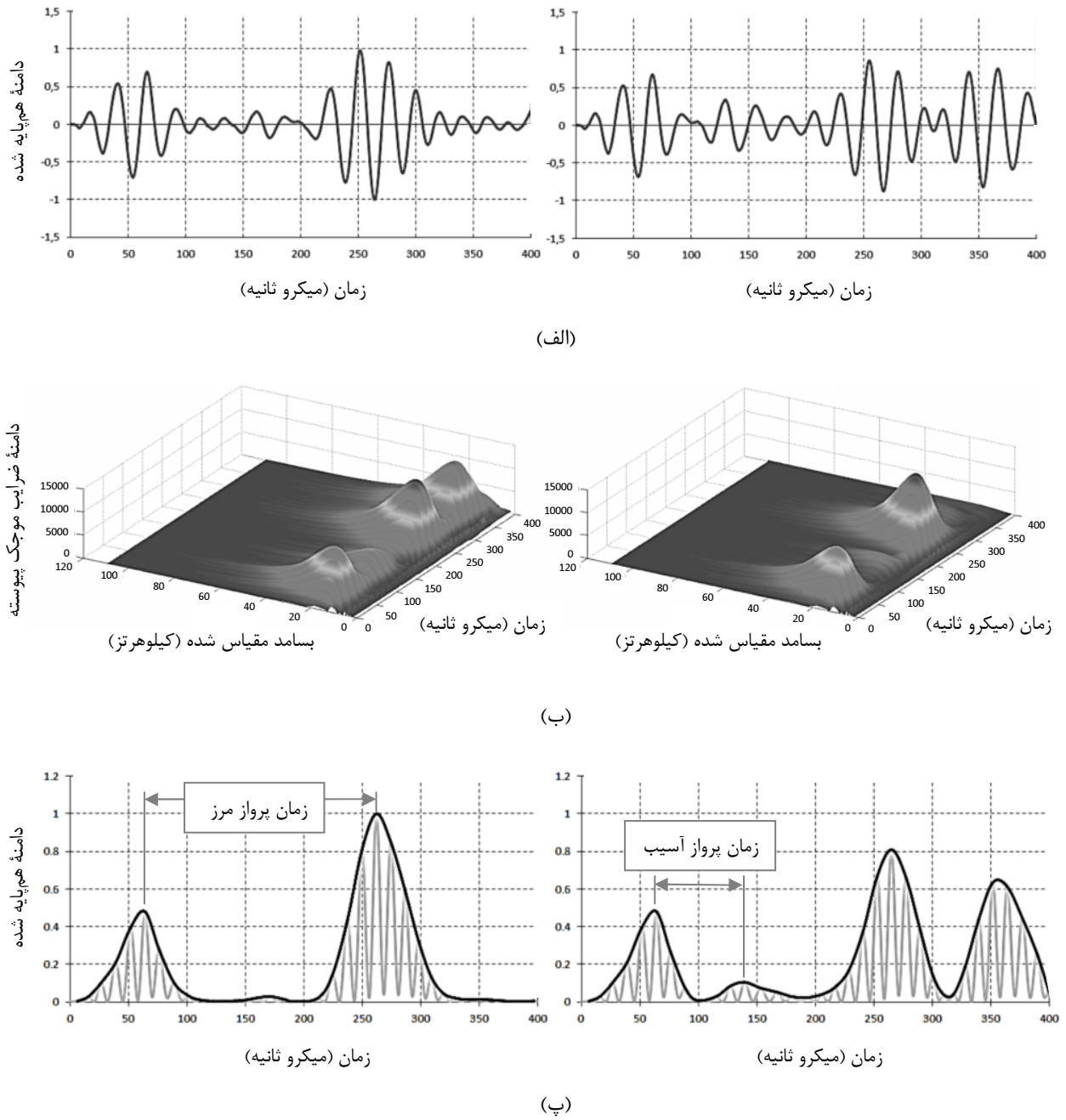
گفتنی است به لحاظ ماهیت فیزیکی، $SAP(n)$ در واقع بیان‌کنندهٔ توزیع انرژی مربوط به پخش موج در سازه است. در این پژوهش از موجک مادر دابوچی ۱۰ استفاده شده است. طبق مرجع [۷]، در زمینه‌ی تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی و پخش موج استفاده از موجک‌های مادر دابوچی نسبت به سایر توابع موجود نتایج بهتری را درپی داشته است.

2. Scale-Averaged Wavelet Power (SAP)

۳-۳ – فرایند پس-پردازش

با رسم منحنی توان میانگین مقیاس‌شدهٔ موجک که در قسمت قبل معرفی شد، می‌توان موقعیت زمانی قله‌های انرژی سیگنال را بدست آورد و از محاسبهٔ تفاوت زمانی بین این قله‌ها، که زمان پرواز (ToF) نامیده می‌شود، سرعت گروهی پخش موج در سازه و پیامد آن موقعیت مکانی آسیب احتمالی را تعیین کنیم.

این فرایند برای دو سیگنال پیش‌پردازش شده در شکل ۸ نشان داده شده است. نمودارهای سمت چپ مربوط به تیر سالم و نمودارهای سمت راست مربوط به تیر ترکدار می‌باشد. همان‌گونه که در این شکل نیز مشخص است، دو نوع کلی زمان پرواز وجود دارد: یکی زمان پرواز مرز سازه و دیگری زمان پرواز آسیب.



شکل ۸ فرایند آسیب‌شناسی با استفاده از تکنیک زمان پرواز. الف) سیگنال‌های پیش‌پردازش شده، ب) بسته‌های انرژی سیگنال‌های (الف) بدست آمده از تبدیل پیوسته موجک، پ) توان میانگین مقیاس‌شدهٔ سیگنال‌های قسمت (الف) با استفاده از مقیاس‌نگارهای قسمت (ب).

با بکارگیری زمان پرواز مرز سازه می‌توان سرعت پخش دسته موج را محاسبه کنیم. به گونه‌ای یکسان، با استفاده از زمان پرواز آسیب و با داشتن سرعت پخش دسته موج، می‌توان موقعیت مکانی ترک را تعیین کرد. برای تعیین شدت آسیب نیز، که در این‌جا همان عمق ترک است، از دامنهٔ انرژی موج بازتابیده شده از آسیب استفاده می‌شود.

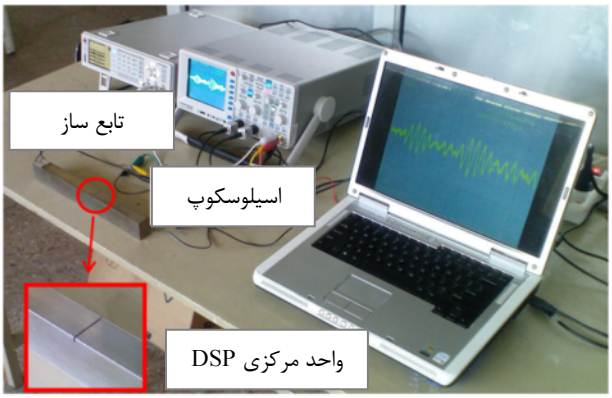
۴- چیدمان آزمایشگاهی

به منظور ارزیابی توانایی الگوریتم ارایه شده در شناسایی آسیب، آزمون‌های آزمایشگاهی روی یک تیر فولادی ضخیم با ابعاد یاد شده در بخش ۲ انجام می‌شود. جنس تیر از فولاد ST-52 می‌باشد که در گروه فولادهای آلیاژی کم‌کربن دسته‌بندی می‌شود. شکل ۹ چیدمان آزمایشگاهی بکارگرفته شده را نشان می‌دهد. در آزمون‌ها از دو مبدل ویفری پیزوالکتریک استفاده شده است که یکی به عنوان به‌کارانداز وظیفهٔ ایجاد امواج هدایت‌شده فراصوت را بر عهده دارد و دیگری به عنوان حسگر عمل می‌کند. همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، حسگرهای ویفری فعال پیزوالکتریک بسیار حساس، کوچک، سبک و ارزان قیمت هستند که دامنهٔ بسامدی بالایی دارند، زمان برخواست بسیار کمی دارند و بسیار سریع به تغییرات محیطی واکنش نشان می‌دهند و از همه مهم‌تر توانایی نصب دائمی، بر خلاف پروب‌های سنتی آزمون فراصوت، بر سازه را دارند. به همین دلیل به عنوان یکی از مهم‌ترین تجهیزات یک سامانهٔ پایش بلادرنگ سلامتی سازه‌ها در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است. جنس این مبدل‌ها از سرامیک‌های پیزوالکتریکی سرب-زیرکونات-تایتانات (PZT) است. جدول ۱ مشخصات فیزیکی و الکترومکانیکی مبدل‌های استفاده‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

به منظور ایجاد و فرستادن سیگنال آنالوگ برانگیزش به به‌کارانداز پیزوالکتریک از یک تابع‌ساز ساخت شرکت HAMEG® مدل HMF-2525 استفاده شده است. بعد از برانگیزش به‌کارانداز و پخش امواج فراصوت در سراسر تیر، امواج برگشتی توسط حسگر ویفری فعال پیزوالکتریک به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شوند. برای جمع‌آوری و ذخیرهٔ سیگنال مربوطه از یک دیجیتال اسیلوسکوپ HAMEG® مدل HM1008-2 استفاده می‌شود. گفتنی است، اسیلوسکوپ سیگنال آنالوگ دریافتی از حسگر را با انجام نمونه‌برداری زمان واقعی در بسامد ۴ مگاهرتز به سیگنال دیجیتال تبدیل می‌کند.

۵- نتایج و بحث

به کمک زمانهای پرواز مربوط به مرز سازه، بدست آمده از منحنی توان میانگین مقیاس‌شدهٔ موجک، سرعت دسته موج پخش شده در تیر محاسبه شود. این مقدار با استفاده از سیگنال‌های بدست آمده از تحلیل اجزای محدود، ۲۸۳۲ متر بر ثانیه، و با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی، ۲۸۴۶ متر بر ثانیه محاسبه شده‌است. گفتنی است سرعت بدست آمده از حل دقیق معادله‌ی پراکنش (شکل ۲) نزدیک ۳۰۰۰ متر بر ثانیه است که در مرجع [۱۴]، ۲۸۰۹ متر بر ثانیه محاسبه شده است.



شکل ۹ چیدمان آزمایشگاهی فرایند آسیب‌شناسی با امواج هدایت شدهٔ فراصوت

جدول ۱ ویژگی‌های هندسی و الکترومکانیکی مبدل‌های پیزوالکتریک

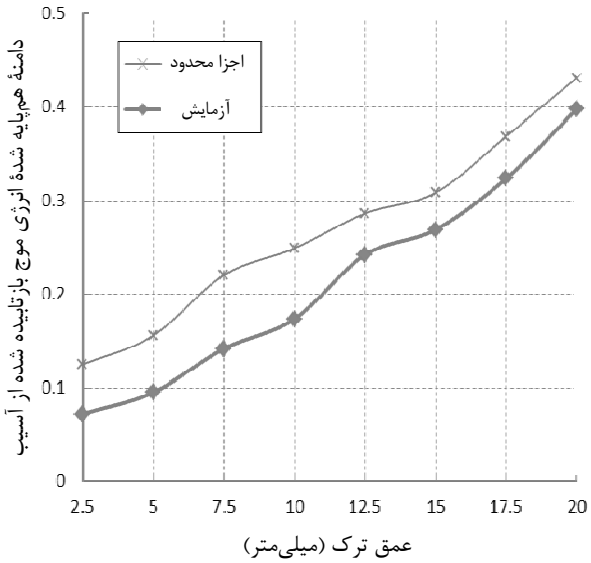
شرکت سازنده	ANNON®
جنس	PZT-5
ابعاد	۱×۱۰×۲۵ میلی‌متر
نوع الکترود	مس-نیکل افشان
چگالی	۷/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب
ضریب پیزوالکتریسیته d_{31}	-۲۲۰×۱۰^{-۱۲} کولن بر نیوتن
ضریب پیزوالکتریسیته d_{33}	۵۲۰×۱۰^{-۱۲} کولن بر نیوتن
ظرفیت خازنی	۷۵۰۰ پیکو فاراد

جدول ۲، نتایج مربوط به جایابی آسیب، با به‌کارگیری سیگنال‌های بدست آمده از تحلیل اجزای محدود و آزمون‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همهٔ عددهای این جدول به میلی‌متر هستند.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش عمق ترک، درصد خطای مربوط به تعیین موقعیت آن کاهش می‌یابد زیرا با افزایش شدت، آسیب، رفتاری شبیه به مرز انتهایی تیر از خود نشان می‌دهد. پیامد آن، افزایش انرژی موج بازگشتی از آسیب خواهد بود و در نتیجه سبب بالارفتن دقت شناسایی می‌شود. شکل ۱۰ که نمایانگر دامنهٔ قله‌های انرژی بسته موج برگشتی از آسیب نسبت به عمق آن است، درستی این ادعا را نشان می‌دهد.

جدول ۲ نتایج مربوط به تعیین موقعیت آسیب (D=175 mm)

شدت آسیب (mm)	نتایج تحلیل اجزای محدود (درصد خطا) (mm)	نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی (درصد خطا) (mm)
۲/۵	۱۹۴/۲ (۱۰/۹۷)	۱۹۷/۶ (۱۲/۹۱)
۵	۱۹۱/۳ (۹/۳۱)	۱۹۴/۷ (۱۱/۲۶)
۷/۵	۱۸۶/۸ (۶/۷۴)	۱۸۹/۴ (۸/۲۳)
۱۰	۱۸۳/۸ (۵/۰۳)	۱۸۵ (۵/۷۱)
۱۲/۵	۱۶۶/۷ (۴/۷۲)	۱۶۳ (۶/۸۶)
۱۵	۱۸۵/۲ (۵/۸۳)	۱۸۸ (۷/۴۳)
۱۷/۵	۱۶۷/۵ (۴/۲۹)	۱۶۴ (۶/۲۹)
۲۰	۱۷۰ (۲/۸۵)	۱۶۸/۱ (۳/۹۴)



شکل ۱۰ شدت انرژی موج برگشتی از آسیب برای عمق‌های مختلف بدست آمده از تحلیل اجزای محدود و آزمون‌های آزمایشگاهی

با استفاده از این شکل می‌توان شدت آسیب را تخمین زد. گفتنی است در پژوهش کنونی در مقایسه با نتایج مرجع [۱۴]، خطای شناسایی آسیب با افزایش شدت آن کاهش می‌یابد به گونه‌ای که این مقدار برای آسیب با شدت نصف ضخامت (۱۷/۵ میلی‌متر) از ۷/۴۱ ٪ به ۶/۲۹ ٪ کاهش یافته است. دلیل این امر استفاده از تبدیل موجک پیوسته و روش توان میانگین مقیاس‌شده است. این در حالی‌ست که در الگوریتم پردازش سیگنال مرجع [۱۴] از تبدیل هیلبرت استفاده شده است. گفتنی است تبدیل موجک به‌دلیل استفادهٔ همزمان از اطلاعات حوزهٔ زمان و بسامد، نسبت به تبدیل هیلبرت که صرفاً از اطلاعات حوزهٔ زمان سیگنال‌ها بهره می‌گیرد، برتری دارد. به لحاظ سخت‌افزاری نیز در مقاله سان و همکاران از دو حسگر استفاده شده است درحالی‌که نتایج پژوهش کنونی نشان دهندهٔ آن است که تنها یک حسگر برای شناسایی ویژگی‌های آسیب، اعم از وجود، موقعیت و عمق کافی می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله مساله‌ی شناسایی و مشخصه‌یابی آسیب در یک تیر ضخیم فولادی از جنس ST-52 با استفاده از روش پخش امواج هدایت‌شدهٔ فراصوت مورد بررسی قرار گرفت. با هدف ارزیابی توانایی سیگنال برانگیزش در شناسایی و مشخصه‌یابی آسیب، شبیه‌سازی ۳ بعدی و آنالیز گذرای پخش موج به روش اجزای محدود انجام شد. سیگنال‌های بدست آمده، با یک کد پردازش دیجیتال سیگنال، پیش-پردازش، پردازش و پس-پردازش شدند. برای فرایند پردازش و استخراج ویژگی، تبدیل پیوسته‌ی موجک و روش توان میانگین مقیاس‌شده استفاده گردید. در پایان به منظور ارزیابی توانایی الگوریتم ارایه شده در شناسایی و مشخصه‌یابی آسیب، آزمون‌های آزمایشگاهی به‌کارگرفته شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که الگوریتم پردازش سیگنال ارایه شده نسبت به پژوهش قبلی، از دقت بیشتری برخوردار است. از سوی دیگر نشان داده شد که به لحاظ سخت‌افزاری، تنها یک حسگر برای شناسایی و مشخصه‌یابی آسیب کافی‌ست. شایان ذکر است که الگوریتم ارایه شده در این پژوهش را می‌توان در مسایل دیگر شناسایی آسیب، مبتنی بر روش پخش امواج هدایت‌شدهٔ فراصوت، به‌کارگرفت.

۷- مراجع

[1] Giurgiutiu V., *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*, New York, Elsevier, Academic Press, 2008, pp. 1–2.

[2] Staszewski W.J., Boller C. and Tomlinson G., *Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing*, New York, Wiley, 2004, pp. 1–2.

[3] Cuc A., Giurgiutiu V., Joshi S. and Tidwell Z., "Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors for Space Applications", *AIAA Journal,* Vol. 45, 2007, pp. 2838–2850.

[4] Lee C.M., Rose J.L. and Cho Y.A., "Guided Wave Approach to Defect Detection under Shelling in Rail", *NDT and E International,* Vol. 42, 2009, pp. 174–180.

[5] Diamanti K. and Soutis C., "Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures", *Progress in Aerospace Sciences,* Vol. 46, No. 8, 2010, pp. 342–352.

[6] Su Z. and Ye L., *Identification of Damage using Lamb Waves: from Fundamentals to Applications*, Berlin, Springer-Verlag, 2009, pp. 152–159.

[7] Raghavan A. and Cesnik C.E.S., "Review of Guided-Wave Structural Health Monitoring", *The Shock and Vibration Digest,* Vol. 39, No. 2, 2007, pp. 91–114.

[8] Diligent O., Grahn T., Bostrom A., Cawley P. and Lowe M.J.S., "The Low-Frequency Reflection and Scattering of the S_0 Lamb Mode from a Circular Through-Thickness Hole in a Plate: Finite element, analytical and experimental studies", *Journal of the Acoustical Society of America,* Vol. 112, 2002, pp. 2589–2601.

[9] Kessler S.S., Spearing S.M. and Soutis C., "Damage Detection in Composite Materials using Lamb Wave Methods", *Smart Materials and Structures,* Vol. 11, 2002, pp. 269–278.

[10] Ihn J.B. and Chang F.K., "Detection and Monitoring of Hidden Fatigue Crack Growth using a Built-in Piezoelectric Sensor/Actuator Network: I. Diagnostics", *Smart Materials and Structures,* Vol. 13, 2004, pp. 609–620.

[11] Lee B.C. and Staszewski W.J., "Sensor Location Studies for Damage Detection with Lamb Waves", *Smart Materials and Structures,* Vol. 16, 2007, pp. 399–408.

[12] Zhao X., Gao H., Zhang G., Ayhan B., Yan F., Kwan C. and Rose J.L., "Active Health Monitoring of an Aircraft Wing with Embedded Piezoelectric Sensor/Actuator Network: I. Defect Detection, Localization and Growth Monitoring", *Smart Materials and Structures,* Vol. 16, 2007, pp. 1208–1217.

[13] Purekar A.S. and Pines D.J., "Damage Detection in Thin Composite Laminates using Piezoelectric Phased Sensor Arrays and Guided Lamb Wave Interrogation", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures,* Vol. 21, 2010, pp. 995–1010.

[14] Sun K., Meng G., Li F., Ye L. and Lu Y., "Damage Identification in Thick Steel Beam Based on Guided Ultrasonic Waves", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures,* Vol. 21, 2010, pp. 225–232.

[15] Georgiou G. and Cohen F.S., "Tissue Characterization using the Continuous Wavelet Transform, Part I: Decomposition Method", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control,* Vol. 48, No.2, 2001, pp. 355–363.