راه‌کارهای توسعهٔ فناوری بازرسی غیرمخرب به‌روش فراصوتی و جریان گردابی در توربین‌های گاز و بخار

پویا صالحی فیروزآبادی[1]، اصغر نجفی[2]

۱ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، بخش تجهیزات دوار، پژوهشگاه نیرو، تهران

۲ استادیار گروه مهندسی مکانیک، بخش تجهیزات دوار، پژوهشگاه نیرو، تهران،anajafi@nri.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۱۰

چکیده

بازرسی غیرمخرب به‌دلائلی چون صرفهٔ اقتصادی، سرعت و بازدهی در صنعت، به‌ویژه در صنعت توربین‌های گاز و بخار، جایگاه ویژه‌ای دارد. در میان روش‌های مرسوم جهت بازرسی غیرمخرب، روش‌های بازرسی فراصوتی و جریان گردابی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. روش فراصوتی پس از روش‌های چشمی و مایع نافذ پرکاربردترین روش بازرسی غیرمخرب است و به‌دلیل تنوع کاربرد و ماهیت پیچیدگی زیادی دارد. روش جریان گردابی نیز به‌دلیل حساسیت آن به ساختار قطعه، همین‌طور حساسیت زیاد نسبت به عیوب سطحی و قطعات با ضخامت کم، در بازرسی غیرمخرب دارای اهمیت ویژه‌ای است. در این مقاله، نخست اختراعات و مقالات جهانی، زمینه‌های فعالیت شرکت‌های مطرح در بازرسی غیرمخرب و صنایع توربین‌های گاز و بخار در داخل و خارج از کشور بررسی می‌شوند. سپس با در نظر گرفتن این عوامل، راه‌کارهایی جهت توسعهٔ بازرسی غیرمخرب به‌روش فراصوتی و جریان گردابی در داخل کشور ارائه می‌گردد.

واژگان کلیدی

بازرسی فراصوتی، جریان گردابی، آرایهٔ فازی، پردازش سیگنال

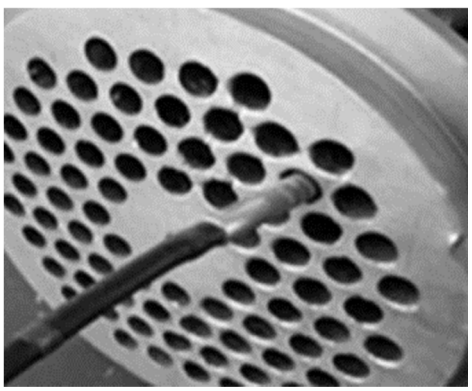
۱. مقدمه

بازرسی غیرمخرب به‌لحاظ صرفهٔ اقتصادی، سرعت و کارایی جایگاه خود را در صنعت توربین‌سازی پیدا کرده و روبه گسترش است. در بین روش‌های مرسوم غیرمخرب، روش فراصوتی از پرکاربردترین روش‌های بازرسی غیرمخرب است. این روش بعد از روش بازرسی چشمی و مایع نافذ، بیشترین استفاده را در پروژه‌های صنعتی ایران و جهان دارد. از لحاظ توسعه، این روش سهم بسیار زیادی در مقالات، اختراعات و نوآوری‌های موجود در جهان دارد. اگرچه میزان استفاده از روش‌های بازرسی چشمی و مایع نافذ در صنعت بیشتر از روش فراصوتی است، اما طبق بررسی انجام‌شده در پایگاه جهانی تست غیرمخرب، در بین شرکت‌های خدماتی آزمون‌های غیرمخرب، که در این سایت جهانی ثبت شده‌اند، آمار شرکت‌های خدماتی در زمینهٔ آزمون فراصوتی بسیار بالاتر از سایر روش‌های غیرمخرب است [۱]. شکل ۱ نمایی از آزمون فراصوتی را در هنگام بازرسی ریشهٔ پرهٔ

توربین نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در روش فراصوتی یک دستگاه پالس‌ساز ابتدا پالس الکتریکی تولید و از طریق کابل آن را به پروب فراصوتی ارسال می‌کند. پس از رسیدن پالس به پروب، پروب بر اثر ساختار درونی‌اش، امواج فراصوتی تولید و به‌داخل قطعه ارسال می‌کند. اغلب پروب‌ها از خاصیت پیزوالکتریک استفاده می‌کنند. امواج فراصوتی ارسال‌شده پس از برخورد به یک بازتابگر، که می‌تواند یک عیب یا یک لبه از قطعه باشد، توسط همان پروب یا پروب دیگری دریافت و به یک سیگنال الکرتیکی تبدیل می‌شوند. سپس این سیگنال با کابل به نمایشگر ارسال می‌شود و نمایشگر می‌تواند این سیگنال را به شکل‌های متنوعی نمایش دهد.

دلیل فعالیت گسترده‌ی شرکت‌ها در روش فراصوتی آن است که در روش‌های مفیدی چون بازرسی چشمی و مایع نافذ به مهارت زیاد نیاز نبوده و لازم نیست خدمات خاصی در زمینهٔ بازرسی با این روش‌ها ارائه شود. روش‌هایی مثل رادیوگرافی نیز از حیث میزان هزینه، سلامت کاربر و تنوع کاربرد قابلیت کمتری نسبت به روش فراصوتی دارند. روش جریان گردابی چون تنها برای عیوب سطحی و نزدیک به سطح کاربرد دارد و پیچیدگی ذاتی آن کمتر از روش فراصوتی است، در بازرسی غیرمخرب کاربرد دارد. اما این روش در صنایع خاص چون هوافضا و توربین‌سازی جایگاه ویژه‌ای دارد؛ زیرا این روش علاوه بر اینکه در تعیین عیوب سطحی و نزدیک به سطح کاربرد دارد، یکی از حساس‌ترین روش‌ها برای دسته‌بندی مواد[1] است و این قابلیت کمتر در روش‌های دیگر وجود دارد. برای مثال این روش نسبت به تغییر دانه‌بندی، وجود میکروترک‌ها، تغییر ساختار و تغییر سختی مواد حساسیت خوبی دارد و می‌تواند با دقت خوبی جایگزین روش‌های نیمه‌مخربی چون متالوگرافی و سختی‌سنجی باشد. اگرچه در روش‌هایی چون روش فراصوتی نسبت به این پارامترها حساسیت وجود دارد، اما حساسیت روش جریان گردابی به‌خصوص برای بازرسی قطعات با ضخامت کم، بسیار بیشتر است [۲]. در کل دقت روش جریان گردابی با کاهش ضخامت قطعه افزایش می‌یابد در صورتی که برای روش فراصوتی در ضخامت‌های کم، به‌دلیل وجود ناحیهٔ نزدیک و ماهیت موج فراصوتی، دقت بازرسی بالا نیست [۳]. در شکل ۲ نمایی از روش جریان گردابی را برای بازرسی لوله‌هایی با قطر کم نمایش داده شده است. پروب روش جریان گردابی در حقیقت یک سیم‌پیچ است که میدان مغناطیسی تولید می‌کند. این میدان مغناطیسی، جریان گردابی را روی سطح قطعه ایجاد می‌کند که این جریان تحت تأثیر شرایط سطح قطعه است. خود این جریان تحت تأثیر شرایط قطعه، می‌تواند میدان مغناطیسی اطرافش را نیز تحت تأثیر قرار دهدکه باعث ایجاد سیگنال‌های الکتریکی توسط پروب می‌شود.

شکل ۱. نمایی از انجام آزمون فراصوتی در بازرسی پرهٔ توربین [۱]


شکل ۲. نمایی از انجام آزمون جریان گردابی [۱]

آزمون فراصوتی و همین‌طور روش جریان گردابی در صنعت توربین‌سازی نیز جایگاه ویژه‌ای دارد. طبق گزارش منتشرشده توسط شرکت زیمنس در سال ۲۰۰۸ م، روش فراصوتی و جریان گردابی از جمله روش‌هایی بوده‌اند که کاربرد ویژه‌ای در صنعت توربین‌سازی دارند و می‌توان برای تخمین عمر باقیماندهٔ قطعات کارکرده از آنها استفاده کرد [۴]. شرکت آلستوم نیز در گزارشی در سال ۲۰۱۲ م به توسعهٔ بازرسی غیرمخرب در صنعت توربین‌سازی پرداخته است [۵]. در این گزارش، دو روش آزمون فراصوتی و جریان گردابی به‌عنوان روش‌هایی مهم برای توسعهٔ بازرسی غیرمخرب مطرح شده است. در صنعت امروز ایران، برای تخمین

عمر و ارزیابی میکروترک‌ها معمولاً از روش‌هایی چون متالوگرافی، سختی‌سنجی و آزمون ذرات مغناطیسی استفاده می‌شود. اما با بررسی فناوری در دنیا و بررسی تمامی روش‌های ممکن می‌توان روش‌های موجود را ارتقاء بخشید.

در این مقاله نخست وضعیت بازرسی غیرمخرب در صنایع و توربین‌های گاز و بخار در داخل کشور بررسی می‌شود. با توجه به توسعهٔ فناوری در فرایند ساخت توربین‌های گاز و بخار و ارائهٔ مثال‌هایی از اختراعات انجام‌شده در زمینهٔ بازرسی غیرمخرب توربین‌های گاز و بخار، راه‌کارهایی جهت توسعهٔ بازرسی غیرمخرب به‌روش فراصوتی و جریان گردابی ارائه می‌گردد.

۲. بررسی بازرسی غیرمخرب در صنعت توربین‌سازی در ایران

براساس نتیجهٔ بررسی‌هاي انجام‌شده در برخی مراکز توربین‌سازی داخلی از جمله شرکت تعمیرات نیروگاهی و شرکت توگا، شرکت‌های توربین‌سازی داخلی معمولاً پس از روش بازرسی چشمی، استفاده از روش‌های ذرات مغناطیسی، مایع نافذ و فراصوتی را در دستور کار خود قرار می‌دهند. از مهمترین بخش‌هایی که روی آنها بازرسی غیرمخرب انجام می‌شود، می‌توان به پره، شفت، یاتاقان و دیسک توربین اشاره کرد. حجم بسیاری از مقالات و اختراعات در مورد بازرسی غیرمخرب در صنعت توربین‌سازی روی بازرسی پرهٔ توربین متمرکز است. در اکثر موارد در ایران برای تولید پرهٔ توربین از روش ماشینکاری استفاده می‌شود. از اینرو روش فراصوتی در بازرسی بلوک خام پره به‌صورت ویژه کاربرد دارد. این روش به‌دلیل سرعت بالا، ایمنی و توانایی در شناسایی عیوب داخل بلوک مناسب‌ترین روش برای بازرسی بلوک خام است. پس از انجام فرایند ماشینکاری و تولید پره با در نظر گرفتن اینکه در ایستگاه اول بازرسی قطعه از نظر عیوب داخلی انجام شده است، تنها عیوبی که در حین فرایند تولید می‌تواند در قطعه ایجاد شود ترک‌های سطحی است. این ترک‌ها ممکن است به‌دلیل فرایند ماشینکاری و انجام عملیات تعمیری سربسته شود بنابراین مهمترین روش بازرسی غیرمخرب برای بازرسی پره‌ها استفاده از روش ذرات مغناطیسی است. اگرچه روش‌های بازرسی چشمی و همین‌طور مایع نافذ نیز در بازرسی پرهٔ توربین کاربرد دارد. محدودیت استفاد از روش ذرات مغناطیسی برای آن دسته از قطعاتی است که امکان مغناطیس‌شدن ندارند. برخی از فولادهای آلیاژی در این دسته‌بندی قرار می‌گیرند و در صنعت توربین‌سازی کاربرد دارند. برای بازرسی این دست از قطعات باید از روش‌های جایگزین استفاده کرد. روش جریان گردابی روشی است که برای عیوب سطحی و نزدیک به سطح و برای هر نوع جنسی کاربرد دارد و لازم نیست که عیوب حتماً راه به در باشند. بنابراین روش جریان گردابی می‌تواند در بسیاری از موارد به‌عنوان جایگزین برای روش ذرات مغناطیسی به‌کار رود. غیر از بررسی بلوک خام، از بازرسی فراصوتی جهت بازرسی جوش‌های شفت استفاده می‌شود. در فرایند جوشکاری امکان ایجاد عیوب حجمی مثل ذوب ناقص و نفوذ ناقص وجود دارد. به همین دلیل از آزمون فراصوتی استفاده می‌شود [۶].

از دیگر کاربردهای آزمون فراصوتی بررسی چسبندگی قطعات است. در این موارد اگر چسبندگی مناسب باشد، اکوهای دریافتی دارای دامنهٔ کمتری هستند و زودتر میرا می‌شوند [۷]. از این خاصیت در صنعت توربین‌سازی برای بررسی چسبندگی بابیت با بدنهٔ یاتاقان استفاده می‌شود [۸-۹]. از دیگر موارد پراهمیت در بازرسی غیرمخرب اجزای توربین، استفاده از بازرسی غیرمخرب در بازرسی حین سرویس است. همواره باید توربین‌ها بعد از گذراندن دوره‌ای از کارکرد خود خاموش و اجزای مختلف آن دمونتاژ شوند و بعد روی آنها بازرسی‌های غیرمخرب انجام شود. در صنایع توربین‌سازی ایران عموماً بعد از دمونتاژ اجزاء با روش‌هایی مثل ذرات مغناطیسی، مایع نافذ و بازرسی چشمی و در بعضی از موارد با کمک روش‌های نیمه‌مخربی چون سختی‌سنجی و متالوگرافی عمل بازرسی و تخمین عمر قطعات انجام می‌شود. در صنعت توربین‌سازی برای بازرسی شفت توربین از بورسکوپ استفاده می‌کنند. بورسکوپ وسیله‌ای است که به آن می‌توان پروب‌های فراصوتی، جریان گردابی و حتی دوربین فیلم‌برداری متصل کرد و با آن داخل سوراخ شفت را بررسی کرد. در شرکت‌هایی چون تعمیرات نیروگاهی هنوز از این وسیله استفاده می‌شود. این روش بیشتر برای بازرسی چشمی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳. روش‌های جدید بازرسی در صنعت توربین‌سازی

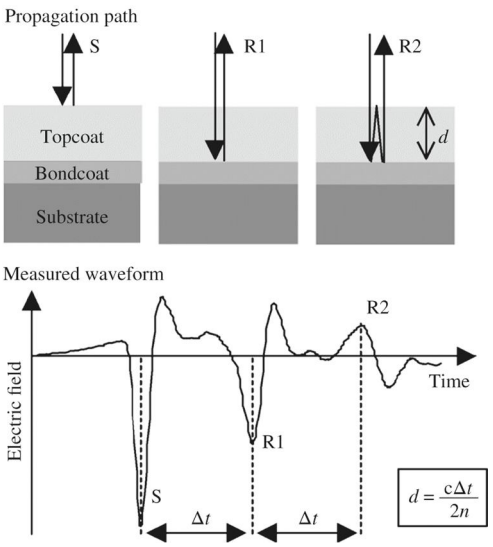
در گزارشی که شرکت زیمنس در سال ۲۰۰۸ م منتشر کرده به این نکته اشاره کرده که استفاده از بورسکوپ برای بازرسی شفت توربین در مورد برخی از توربین‌های جدید موضوعیت ندارد؛ زیرا با توسعهٔ فناوری فورج در بسیاری از موارد نیازی به ایجاد این

سوراخ در توربین نیست [۴]. استفاده از تکنیک‌های فورج می‌تواند فوایدی چون کاهش زمان و مراحل تولید و کمک به بهبود خواص مکانیکی مواد را درپی داشته باشد [۱۰].

در پرهٔ توربین به‌دلیل تحمل بارهای دینامیکی تحت حرارت بالا، امکان ایجاد ترک‌های خستگی زیاد است، بنابراین استفاده از فرایند تولید گرمتر به شرط آنکه گرما سبب نرمی بیش از حد قطعه نشود می‌تواند خواص مکانیکی را بهبود بخشد و همچنین تنش تسلیم را بالاتر ببرد. غیر از این، در روش ماشینکاری به‌دلیل وجود اصطکاک در سطح و جداشدن براده‌ها از سطح قطعه امکان ایجاد ترک‌های سطحی و همچنین تغییر ساختار قطعه در سطح به‌دلیل سوختگی وجود دارد. با توجه به اینکه ترک‌های خستگی از سطح شروع می‌شوند تلاش فراوانی شده است که از روش‌های جایگزین از جمله فورج برای تولید پره استفاده شود. در ضمن موادی که در فرایند تولید پرهٔ توربین استفاده می‌شوند، در برخی از موارد از فولادهای آلیاژی است که ماشینکاری آنها به سختی انجام می‌شود و این عامل باعث شده در زمینهٔ استفاده از فورج در صنعت توربین‌سازی تلاش زیادی انجام شود.

از سوی دیگر استفاده از فناوری‌های جدید ریختگری پره مانند ریختگری جهت‌دار و یا ساخت پرهٔ تک‌کریستال بر پیچیدگی روش‌های بازرسی افزوده است. به‌تازگی لین با استفاده از روش آرایهٔ فازی به بررسی پره‌های تک‌کریستال که در توربین‌های گازی با دمای بالا کاربرد دارند، پرداخته است [۱۱].

مثال دیگر در این‌خصوص تحقیقی در سال ۲۰۰۰ م است که در آن یاماموتو و همکاران با استفاده از روش فورج و ماشینکاری سعی کردند از مادهٔ اولیه با فولاد آلیاژی تیتانیوم‌دار پرهٔ توربین تولید کنند [۱۲]. در سال ۲۰۱۵ م کیمورا و اکاجیما با کمک فورج سعی کردند بخش‌های مختلف پرهٔ توربین را به‌هم متصل کنند و تنش تسلیم را در پره بالا ببرند [۱۳]. این در حالی است که بررسی امکان استفاده از فورج در توربین‌سازی از سالیان پیش نیز در اختراعات مطرح بوده است. مثلاً در سال ۱۹۶۸ م جولیس سعی کرد فورج را در تولید پرهٔ توربین به‌کار گیرد [۱۴] و در سال ۱۹۷۲ م اختراعی در امریکا مطرح شد که در آن با کمک جوشکاری و در نهایت استفاده از فورج اقدام به ساخت پرهٔ توربین کردند [۱۵]. با توجه به این موارد می‌توان دریافت که کاربرد فورج در تولید پره‌ها بالا رفته و گسترش تنوع فولادهای آلیاژی روند تولید را دچار دگرگونی کرده است. با توسعهٔ فناوری فورج در جهان، کاربرد این فناوری در مورد صنایع توربین و گاز روزبه‌روز در حال گسترش است. برای نمونه در سال ۲۰۱۳ م تحقیقی در خصوص استفاده از روش فراصوت جهت بازرسی روتورهای سنگین که به روش فورج ساخته شده‌اند انجام شده است [۱۶]. به تناسب پیشرفت ساخت قطعات به روش فورج، تکنیک بازرسی غیرمخرب در حال تغییر است. بر این اساس، توسعهٔ روش‌های بازرسی غیرمخرب قطعات فورج در مورد صنایع توربین‌سازی داخل کشور نیز می‌تواند در آینده قابل مشاهده باشد [۱۷]. نمونهٔ دیگر از روش‌های پیشرفته ساخت در قطعات داغ نیروگاهی که نیازمند روش‌های پیشرفتهٔ غیرمخرب فراصوت و روش جریان القایی است پوشش حرارتی قطعات است. پوشش حرارتی قطعات برای دماهای بسیار بالا طراحی می‌شوند و از لایه‌ای فلزی تشکیل شده است که اندازه‌گیری ضخامت آن یکی از چالش‌های صنعت است [۱۸–۲۰]. در شکل ۳ نحوهٔ قرارگیری باندکت[۲] و شماتیک نحوه اندازه گیری ضخامت آن با انتشار امواج الکتریکی و تحلیل سیگنال مربوط به آن نمایش داده شده است.



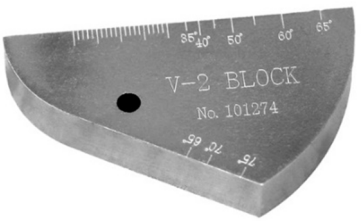
شکل ۳. باندکت و نحوهٔ بازرسی آن با استفاده از سیگنال جریان گردابی [۲۰–۱۸]

٤. کالیبراسیون و بازرسی قطعات توربین

کالیبراسیون از جمله مهمترین مسائل در زمینهٔ اختراعات و نوآوری‌ها در زمینهٔ بازرسی غیرمخرب چه بازرسی فراصوتی و چه بازرسی جریان گردابی است. این امر با در نظر گرفتن گسترش استفاده از فولادهای آلیاژی و همین‌طور تغییرات موجود در فرایند تولید اجزای توربین اهمیت زیادی دارد. اگر به تنوع استانداردهای

ASTM در زمینهٔ تست قطعات توربین توجه شود، بخش قابل ملاحظه‌ای از تست‌ها و آزمایش‌ها از چگونگی کالیبراسیون شروع می‌شود [۲۱]. بحث کالیبراسیون به‌ویژه برای جریان گردابی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا در این روش ابتدا پروب ساخته و روی نمونهٔ استاندارد عمل بازرسی انجام و سیگنال دستگاه با سیگنال نمونه‌های مشابه مقایسه می‌شود. به عمل بازرسی روی نمونهٔ استاندارد به‌منظور دستیابی به سیگنال پایه به‌عنوان مرجع بازرسی کالیبراسیون می‌گویند. بحث ساخت دستگاه و یا روش و کالیبره‌کردن آن از جمله موضوعاتی است که در اختراعات به آن پرداخته می‌شود. در ساخت بلوک کالیبراسیون برای کاربردهای مختلف باید به این موارد توجه شود:

۱. دقت شود که جنس بلوک کالیبراسیون تابع هدف آزمون و جنس قطعهٔ مورد آزمایش است. برای مثال در بازرسی فراصوتی از بلوک استاندارد V_1 و V_2 به‌منظور کالیبراسیون استفاده می‌شود (شکل‌های ۴ و ۵). این بلوک‌ها فولادی‌اند و مادهٔ مورد استفاده در آنها خاصیت دیسپرسیو ندارد. اگر قطعهٔ مورد آزمایش ریخته‌گری و بعد ماشینکاری و جوشکاری شده باشد، استفاده از این بلوک‌ها مناسب است. اما چنانچه بعد از ریخته‌گری دانه‌بندی بزرگ باشد و یا در فرایند ساخت آن از فورج استفاده شود، استفاده از روش فراصوتی تحت بلوک کالیبراسیون‌های معمول باید با دقت بیشتری انجام گیرد. فورج باعث می‌شود که دانه‌بندی جهت‌دار شود. دانه‌بندی بزرگ و جهت‌دار شدن دانه‌ها نیز به نوبهٔ خود باعث می‌شود خواص آکوستیکی در جهات گوناگون متفاوت باشد. این امر باعث می‌شود نتایج آزمایش برای حتی دو قطعهٔ هم‌جنس و فورج‌شده یکسان نباشد. توجه به وجود خاصیت دیسپرژن در ماده اهمیت زیادی دارد. خاصیت پراکندگی صوتی[۳] برای هر ماده‌ای متفاوت است، اما برای مواد همگن مثل، پلکسی، فلزات و آب اثر ناچیزی در ابعاد زیر یک متر دارد. اما این خاصیت برای مواد متخلخل، پلیمری و مواد با دانه‌بندی درشت می‌تواند اثرگذار باشد. تاکنون مقالات متعددی در مورد استفاده از فراصوت برای اینگونه مواد نوشته شده است و استفاده از فراصوت برای بازرسی اینگونه مواد چالش‌برانگیز است [۲۲].



شکل ٤. نمونه‌ای از بلوک V_2 برای کالیبراسیون فراصوتی

شکل ۵. نمونه‌ای از بلوک V_1 برای کالیبراسیون فراصوتی

۲. به هدف کالیبراسیون توجه و تمام عوامل در طراحی روش کالیبراسیون در نظر گرفته شود. در کالیبراسیون با اهداف مختلف امکان ایجاد پدیده‌های مختلف وجود دارد. برای مثال وقتی هدف تولید امواج هدایت‌شده است باید دقت شود که مودهای مختلفی از امواج هدایت‌شده ممکن است ایجاد شود. در ارسال زاویه‌ای موج به تبدیل مود طولی و عرضی موج توجه شود. در هنگام کالیبراسیون جریان گردابی به اثر لبه و سطح و فاصله دقت شود [۳].

اساساً تغییر در فرایند ساخت توربین به تغییر و تحول در بازرسی می‌انجامد. برای مثال پرهٔ توربینی که به روش ماشینکاری تولید شده باشد برای عیوب ماشینکاری مساعد است. این عیوب بیشتر شامل ترک‌های سطحی است. به‌همین دلیل است که در صنعت توربین‌سازی ایران بیشتر از تست‌های سطحی مثل MT، PT و VT برای تست غیرمخرب پره‌ها استفاده می‌شود. اما در جوشکاری بیشتر احتمال وجود عیوبی مثل ذوب ناقص، نفوذ ناقص و تخلخل وجود دارد و در فورج امکان وقوع تورق بیشتر از سایر عیوب است. بهترین روش برای شناسایی این عیوب روش‌های رادیوگرافی و بازرسی فراصوتی است. در سال ۱۹۹۵ م، شرکت جنرال الکتریک اختراعی را برای بازرسی اجزای روتور توربین که سوپر آلیاژ فورج شده هستند ثبت کرد [۲۲]. در این اختراع سعی شده است روشی را برای بازرسی روتور توربینی که حاصل از فورج باشد اختراع شود. خواص اکوستیکی قطعات با جنس سوپر آلیاژ فورج‌شده در همهٔ جهات یکسان نیست و نمی‌توان از بلوک‌های کالیبراسیون برای ارزیابی عیوب موجود در

این دسته از قطعات استفاده کرد؛ زیرا فورج جهت دانه‌بندی را عوض می‌کند. از این‌رو پارامترهای فرایند فورج چندان قابل کنترل نیست و نمی‌توان قطعاتی با خصوصیات اکوستیکی مشابه ایجاد کرد. اگر قطعات از نظر خصوصیات اکوستیکی مشابه نباشد، دیگر نمی‌توان برای آنها کالیبراسیون اجرا کرد. با توجه به اینکه دانه‌بندی این قطعات درشت است، برای جلوگیری از دمپ زیاد صوت بهتر است که بازرسی به روش ارسال - دریافت انجام شود. نکتهٔ مهم دیگر آنکه معمولاً در جهت عمود به سطح، که همان جهت فرج است، امکان وقوع عیوب وجود دارد. اگر از روش بازتابی استفاده شود، راستای حرکت موج با راستای عیب یکی است و امکان عدم تشخیص عیب توسط سیستم بازرسی وجود دارد. بنابراین لازم است از یک پروب برای ارسال موج و از پروب دیگر برای دریافت آن استفاده شود و پروب دریافت‌کننده در سطح مقابل پروب ارسال‌کننده قرار گیرد. یکی دیگر از مشکلات بازرسی قطعات فورج‌شده، آن است که در این دست از قطعات نویز چمنی که نوعی نویز ساختاری است بسیار وجود دارد و ممکن است منجر شود تا نویز ساختاری به جای عیوب در نظر گرفته شود [۲۳].

۵. کاربرد پردازش سیگنال و روش‌های حذف نویز در بازرسی قطعات توربین

استفاده از سوپر آلیاژها و همچنین فناوری فورج در ساخت بخش‌های مختلف توربین باعث شده است بسیاری از قطعات داخل توربین نویز زیادی هم برای سیگنال‌های صوتی و هم برای سیگنال‌های مغناطیسی تولید کنند. بازرسی این دسته از قطعات می‌تواند با مشکلات زیر همراه شود:

۱. محو اکو در نویز

۲. کاهش نسبت سیگنال به نویز و در نتیجه کاهش دقت اندازه‌گیری تأخیر زمانی[۴] و افزایش عدم قطعیت در اندازه‌گیری و بازرسی

۳. پهن‌شدن پالس به‌دلیل اضافه‌شدن نویز به سیگنال و امکان وقوع درهم‌رفتگی سیگنال‌ها به‌دلیل ادغام اکوهای نزدیک به هم

۴. امکان تشخیص اشتباه عیوب و تفسیر اشتباه سیگنال

نویز عامل ناخواسته‌ای است که به سیگنال اضافه می‌شود و تفسیر نتایج را دشوار می‌کند. این عامل در هر ترانسدیوسری به‌ویژه ترانسدیوسر جریان گردابی، ترانسدیوسر فراصوتی و حتی حتی در ترانسدیوسر سی تی اسکن می‌تواند مشاهده شود. حذف نویز معمولاً براساس محتوی فرکانسی سیگنال و نویز انجام می‌شود. چن و همکاران در تحقیقی نویزها را برای سیگنال‌های فراصوتی به دو دستهٔ صوتی و غیرصوتی تقسیم‌بندی کردند [۲۴]. نویز صوتی حاصل از ماهیت انتشار موج صوتی و تأثیر محیط انتشار بر آن است و نویز غیرصوتی ناشی از اجزای مربوط به دریافت، ارسال و پردازش سیگنال‌های فراصوتی است. در قطعات با دانه‌بندی درشت و قطعات با پراکندگی صوتی زیاد امکان ایجاد نویز چمنی که نوعی نویز صوتی است بیشتر وجود دارد. این دست از نویزها معمولاً دارای فرکانس کمتری نسبت به نویزهای غیرصوتی هستند. نویز سفید نوعی نویز متداول غیرصوتی است. این نوع نویز معمولاً با فرکانس بالا و دامنهٔ کم در سیگنال ظاهر می‌شود و از توزیع گاوسی برخوردار است. اثر نویزها را می‌توان با کمک فیلترهایی در حوزهٔ فرکانس کمتر کرد. در مورد نویزهایی که به‌صورت تصادفی رخ می‌دهند می‌توان با کمک میانگین‌گیری اثر آنها را کاهش داد. نویز در سیگنال‌های جریان گردابی هم تأثیرگذار است. برای مثال در سال ۲۰۱۴ هور[۵] و همکاران روی تأثیر نسبت سیگنال به نویز در ردیابی ترک‌های موجود در لوله‌های ژنراتور نیروگاه‌های هسته‌ای کار کردند [۲۵]. هر سیگنال ابتدا به‌صورت یک نمودار برحسب دامنه و زمان نمایش داده می‌شود. با کمک تبدیل فوریه هر سیگنال به‌صورت جمع توابع سینوسی و کسینوسی در می‌آید. هر تابع سینوسی دارای سه المان دامنه، فرکانس و فاز است. با کمک تبدیل فوریه می‌توان سیگنال را برحسب دامنه - فرکانس و فاز - فرکانس نمایش داد، بنابراین با کمک تبدیل فوریه می‌توان دریافت که در چه فرکانس بیشترین دامنه وجود دارد. در پروب فراصوتی این فرکانس فرکانس مرکزی پروب نامیده می‌شود. بنابراین از تبدیل فوریه می‌توان برای تعیین فرکانس مرکزی پروب استفاده کرد [۲۶]. به کاری که تبدیل فوریه روی سیگنال انجام می‌دهد اصطلاحاً انتقال سیگنال از فضای زمان به فضای فرکانس می‌گویند. فیلترهایی که در فضای فرکانس طراحی می‌شود، معمولاً با کمک تبدیل فوریه سعی می‌کنند بخشی از فرکانس‌ها را از سیگنال حذف کنند. این فیلترها به سه دستهٔ فیلترهای پایین‌گذر، میان‌گذر و بالاگذر تقسیم می‌شود. فیلترهای پایین‌گذر فرکانس‌های پایین را عبور می‌دهند. این دسته از فیلترها برای حذف نویزهای فرکانس بالا و بیشتر نویزهای غیرصوتی مناسبند. فیلترهای میان‌گذر محدودهٔ فرکانسی

مشخصی را عبور می‌دهند. از این نوع فیلتر می‌توان برای ایجاد اکوی نیزه‌ای[۶] و جداسازی اکوهای درهم رفته استفاده کرد. در این حالت سعی می‌شود فیلتر تنها فرکانس‌های در محدودهٔ فرکانس مرکزی پروب را از خود عبور دهد [۲۷]. فیلترهای بالاگذر معمولاً برای از بین بردن نویزهای فرکانس پایین مثل نویزهای صوتی کاربرد دارد. یکی از راه‌کارها برای حل مشکل سیگنال‌هایی که با کمک نویز غیرقابل تفسیر شده‌اند استفاده از روش‌های مبتنی بر مدلسازی است. در این روش‌ها ابتدا سیگنال شبیه‌سازی شده، سپس سیگنال را با سیگنال شبیه‌سازی شده مقایسه کرده و در نهایت اکوهای مورد نظر شناسایی شده و دقت افزایش پیدا می‌کند. برای مدلسازی صحیح سیگنال می‌توان از روش‌های مختلف بهینه‌سازی مثل الگوریتم ژنتیک و سایر روش‌های بهینه‌سازی استفاده کرد [۲۸]. در بسیاری از موارد، زمان فرکانسی که در سیستم وجود دارد نیز دارای اهمیت است. ممکن است یک سیگنال پایه وجود داشته باشد و در مدت زمان مشخصی نویزی با فرکانس خاصی روی آن قرار گرفته باشد، اما همان فرکانس در زمانی دیگر حاوی اطلاعات مفیدی باشد که هدف حذف آن نباشد. در این هنگام باید از پردازش سیگنال در حوزهٔ زمان - فرکانس استفاده کرد. در پردازش سیگنال در حوزهٔ زمان - فرکانس بیشتر از تبدیل فوریهٔ پنجره - کوتاه و تبدیل موجک استفاده می‌شود [۲۹]. ضمن اینکه با کمک استفادهٔ همزمان از تجزیهٔ سیگنال به مودهای ذاتی‌اش و تبدیل هیلبرت می‌توان به فرکانس لحظه‌ای سیگنال دست یافت [۳۰]. در بسیاری از مقالات در زمینهٔ فراصوت از چنین پردازش‌هایی استفاده شده است. برای مثال در سال ۲۰۱۱ توسط لوزولت و همکاران پردازشی روی سیگنال‌های فراصوتی از جنس استخوان با کمک تبدیل موجک انجام شد [۳۱]. استخوان نویزهایی چمنی مانند نویزهای قطعات فورج‌شده را روی سیگنال ایجاد می‌کند. نکته‌ای که در مورد آزمایش این دست از قطعات به روش فراصوتی وجود دارد آن است که با توجه به میرایی زیاد و ساختار این قطعات بهتر است از روش ارسال - دریافت برای بازرسی آنها استفاده کرد. نوع دیگری از فیلترهای مورد استفاده در پردازش، فیلترهای تطبیقی[۷] است. این نوع فیلترها با مقایسهٔ سیگنال با یک معیار مرجع طراحی می‌شوند. در آزمون فراصوتی، اکوستیک امیشن و جریان گردابی بسیاری از عوامل در شکل سیگنال ناشناخته است. اگر سعی شود برای سیگنال‌های مختلف شرایط آزمایش را جز شرایط تحت بررسی ثابت در نظر گرفت می‌توان از این فیلترها برای بررسی آن پارامتر استفاده کرد. در سال ۲۰۰۲ م، جیان و همکاران با کمک این نوع فیلترها به بررسی مرز لایه‌های لاستیکی با کمک روش فراصوتی پرداختند [۷]. هم‌اکنون در ایران در بعضی از موارد از روش فراصوتی برای بررسی اتصالات از جمله اتصال بابیت با بدنه در یاتاقان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از فیلترهای تطبیقی نیز می‌تواند به این مهم کمک کند. در روش جریان گردابی نیز استفاده از این نوع روش‌ها کاربرد زیادی دارد. از جمله در سال ۲۰۰۳ م، سوفیان و همکاران با ساخت نمونه‌های زیادی از عیوب و تحلیل آنها سعی کردند دقت روش جریان گردابی را نسبت به روش قلهٔ سیگنال[۸] بخشد [۳۲].

یکی دیگر از فیلترهای مورد استفاده فیلترهای وینر است. فیلتر وینر از معروفترین فیلترهایی است که داده‌های ورودی قبلی و خروجی‌های قبلی سیستم را در ضرایبی ضرب و به سیگنال اضافه می‌کند. در این فیلتر نحوهٔ تعیین ضرایب با کمک روش‌های بهینه‌سازی تعیین می‌شود [۳۳]. یکی دیگر از موضوعات مهم در پردازش سیگنال بررسی زاویهٔ فاز و دامنه در پاسخ فرکانسی سیگنال است. بررسی این موضوع یکی از راه‌حل‌های استاندارد ASTM برای افزایش دقت ضخامت‌سنجی است [۲۱].

از دیگر مواردی که در ارزیابی سیگنال‌های آزمون غیرمخرب اهمیت ویژه‌ای دارد بحث تعیین دقیق زمان تأخیر اکو[۹] است؛ زیرا زمان رسیدن سیگنال می‌تواند نشان‌دهندهٔ موقعیت دقیق عیب باشد. این موضوع به‌خصوص در ضخامت‌سنجی و تعیین دقیق نرخ خوردگی دارای اهمیت است. مهمترین و دقیق‌ترین روشی که برای این مسئله ارائه شده روش همبستگی متقابل[۱۰] است [۳۴]. استفاده از این روش در موارد زیادی کاربرد پیدا کرده است. برای مثال در سال ۲۰۱۳ م طی همکاری بین دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی و دانشگاه تورنتو از این روش برای تعیین دقیق نرخ خوردگی استفاده شد [۳۵]. با در نظر گرفتن اینکه بخش‌های زیادی از توربین تحت تأثیر تنش‌های مکانیکی و حرارتی واقع است احتمال خوردگی و سایش در آن بالاست و می‌توان از این روش‌های پردازشی برای اندازه‌گیری نرخ خوردگی استفاده کرد. برخی از الگوریتم‌ها و عملیاتی که در پردازش سیگنال انجام می‌شود به شرح زیر است [۳۳]:

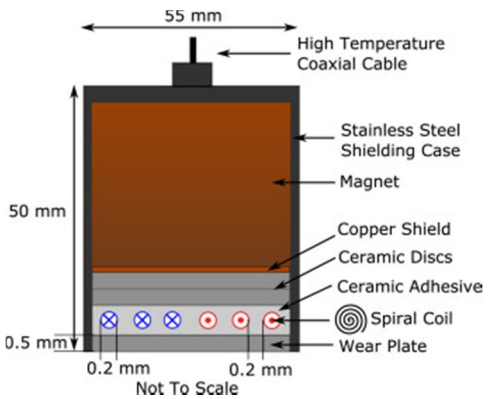
۱. اعمال فیلتر[۱۱]: به‌منظور یکنواخت‌کردن و کاهش اغتشاشات فرکانسی و داده‌های مزاحم
۲. هموار کردن[۱۲]: حذف مناطق محو و نامشخص و بهبود کیفیت تصاویر، تقریب‌زدن روند رویدادها. مثل فیت کردن منحنی بر داده‌ها و جز این‌ها
۳. آنالیز طیف[۱۳]: به‌منظور تغییر و تفکیک اکوها در حوزهٔ زمانی و فرکانسی سیگنال. این نوع آنالیز در طراحی فیلتر فرکانسی و استفاده از تبدیل موجک اهمیت ویژه‌ای دارد
۴. پیش‌بینی[۱۴]: تخمین و پیش‌بینی مقدار دادهٔ بعدی سیگنال
۵. مدلسازی[۱۵]: تخمین و مدلسازی پیوسته و ریاضی سیگنال‌های دیجیتال
۶. دورن‌یابی[۱۶]: درون‌یابی سیگنال‌های دیجیتال با هدف افزایش دقت نمونه‌برداری

یکی دیگر از پردازش‌های مرسوم در سیگنال‌های اکوستیکی و آلتراسونیک استفاده از دکانولشن[۱۷] و تجزیهٔ سیگنال به مودهای ذاتی خود است. دیکانولوشن در مواردی رخ می‌دهد که دو سیگنال درهم فرورفته باشند. در این هنگام با کمک روش‌هایی سعی می‌شود دو سیگنال از هم جدا شود. بسیاری از مقالاتی که در زمینهٔ پردازش سیگنال منتشر شده است در این زمینه است. تجزیهٔ سیگنال به مودهای ذاتی معمولاً برای سیگنال‌های اکوستیکی انجام می‌شود و در آنها سعی می‌شود که براساس فرکانس آنها، سیگنال به مودهای ذاتی‌اش با فرکانس مشخص تقسیم شود [۳۶].

٦. طراحی پروب، موج بر و اتخاذ روش مناسب

در بازرسی فراصوتی و جریان گردابی طراحی پروب، کفشک و موجبر از اهمیت خاصی برخوردار است و تعداد زیادی از پژوهش‌ها و اختراعات انجام‌شده در زمینهٔ بازرسی فراصوتی و جریان گردابی در این زمینه است. طراحی پروب‌ها با در نظر گرفتن کاربرد خاص روش صورت می‌گیرد و این موضوع در مورد استفاده از بازرسی فراصوتی و جریان گردابی نیز باید مورد توجه قرار گیرد. با توجه به کارکرد توربین در دمای بالا، طراحی پروب برای استفاده در دمای بالا می‌تواند امکان بازرسی با کمترین مدت زمان خاموشی را فراهم کند. اکثر پروب‌های موجود در صنعت، پروب‌های پیزوالکتریک هستند. پیزوها در دمای بالا کارکرد خود را از دست می‌دهند؛ لذا باید به سراغ روش‌های جایگزین رفت:

۱. روش EMAT: این روش براساس امواج الکترومغناطیسی موج فراصوت را تولید می‌کند و غیرتماسی است، بنابراین برای تست قطعات دما بالا مناسب است. شکل ۶ نمونه‌ای از یک حسگر EMAT جهت کار در دمای بالا را نشان می دهد. باید توجه شود که در این روش انواع مودهای مختلف موج در قطعه تولید می‌شود و امکان به‌کارگیری آن در فواصل زیاد وجود ندارد [۳۷]. در سال‌های اخیر تحقیقات متنوعی در این زمینه انجام شده است. برای مثال در سال ۲۰۱۷ م، لونا و همکاران در مورد بازرسی قطعات فولادی پوشش داده شده با استفاده از روش EMAT پژوهشی را منتشر کردند [۳۸]. ترینگ و همکاران نیز در سال ۲۰۱۶ م پژوهشی را در مورد بازرسی عیوب سطحی با کمک امواج فراصوتی سطحی تولید شده با کمک روش EMAT منتشر کردند [۳۹]. کاپایا و همکاران از روش EMAT برای بررسی سازوکار آسیب در لوله‌های بویلر استفاده کردند [۴۰] و بایلی و همکاران سعی کردند از روش EMAT برای بازرسی فولاد در حال حرکت استفاده کنند [۴۱].

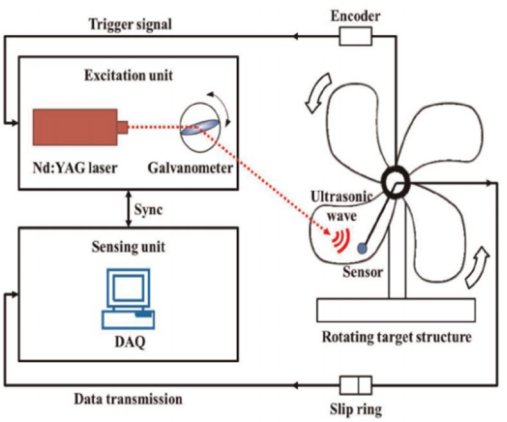


شکل ٦. حسگر EMAT جهت اندازه‌گیری دمای بالا

۲. استفاده از لیزر فراصوتی: در سال ۱۹۸۶ م، شرکت راکول از این روش برای بازرسی پرهٔ توربین استفاده کرد [۴۲]. هم‌اکنون این روش توسعهٔ زیادی یافته، اما در ایران کمتر مورد استفاده قرار گرفته و یا در مورد آن تحقیق شده است. در این روش با کمک اشعهٔ لیزر و ایجاد انبساط و انقباض در قطعه موج فراصوتی تولید می‌شود. این روش برخلاف پروب‌های پیزوالکتریک نیاز به هیچ نوع واسطه‌ای ندارد، از فواصل دور و برای قطعاتی در دماهای بالا قابلیت استفاده دارد و همچنین انواع مدهای مختلف موج با فرکانس بالا با این روش قابل تولید است. اما حرارت تولیدشده با این روش می‌تواند به قطعه

آسیب بزند، ضمن اینکه جداسازی مدهای مختلف موج و تفسیر آن به سادگی امکان‌پذیر نیست [۴۳]. پارک و همکاران توانستند از روش فراصوت برای تشخیص عیب در تجهیزات دوار استفاده کنند [۴۴]. شکل ۷ نمونه‌ای از آزمایشی که توسط آنها انجام شده است را نشان می‌دهد.

۳. استفاده از تماس لحظه‌ای: گود و لوییس در سال ۱۹۷۵ م با کمک تماس لحظه‌ای پیزو توانستند بازرسی فراصوتی را برای قطعاتی با دمای بالای هزار درجهٔ سانتی‌گراد انجام دهند [۴۵]. در این روش سعی شده است که با کاهش زمان تماس بین پروب و قطعه زمان لازم برای انتقال حرارت و آسیب دیدن پروب فراهم نشود. اما این امر ممکن است باعث شود فرصت لازم برای انتقال موج فراصوت به قطعه نیز به دست نیاید؛ زیرا نیروی مکانیکی در پروب‌های پیزو عامل از بین رفتن گپ هوایی بین قطعه و پروب است و این امر باعث می‌شود درصد انرژی بالاتری از موج فراصوتی به قطعه منتقل شود. اگر زمان لازم برای اعمال نیروی مکانیکی فراهم نشود مقدار انرژی موج فراصوتی در قطعه کاهش می‌یابد و این به تضعیف موج فراصوتی می‌انجامد.



شکل ۷. نحوهٔ استفاده از روش فراصوت لیزر برای تشخیص عیب در پره‌های دوار [٤٤]

۴. استفاده از موجبر: موجبر یکی از بهترین و ارزان‌ترین راه‌ها برای ارسال موج فراصوتی به قطعاتی است که امکان تماس مستقیم به آنها وجود ندارد و در دمای بسیار بالایی کار می‌کنند. این روش احتیاج به فناوری خاصی برای ساخت و تنظیم پروب در موقعیت آزمایش ندارد. موجبر به قطعاتی می‌گویند که به‌طور واسطه بین قطعه تا پروب قرار می‌گیرد تا موج را به داخل قطعه منتقل کند. در سال ۲۰۰۵ م راجندان و همکاران با این روش توانستند سرعت امواج صوتی را در مواد را با درجهٔ حرارت بالا به‌دست آورند [۴۶]. در سال ۱۳۹۴ م، اعیانی با این روش توانست موج عرضی را به‌طور عمودی به داخل قطعات منتقل کند [۴۷].

طراحی پروب در آزمون جریان گردابی نیز کاربرد زیادی در صنعت توربین‌سازی دارد. برای مثال در سال ۱۹۹۲ م، شرکت وستینگهوس الکتریک[۱۸] تلاش کرد با طراحی پروب‌های جریان گردابی بسیار کوچک، بازرسی پرهٔ توربین گاز را از طریق سوراخ‌های ریز خنک‌کاری آن انجام دهد [۴۸]. در ایران نیز بسیاری از شرکت‌های پیمانکار از جمله شرکت تکین‌کو برای بازرسی قطعات نیروگاهی از جمله لوله‌های بویلر از پروب‌های مخصوص جریان گردابی استفاده کرده‌اند [۴۹].

۷. طراحی دستگاه‌های تست اتوماتیک

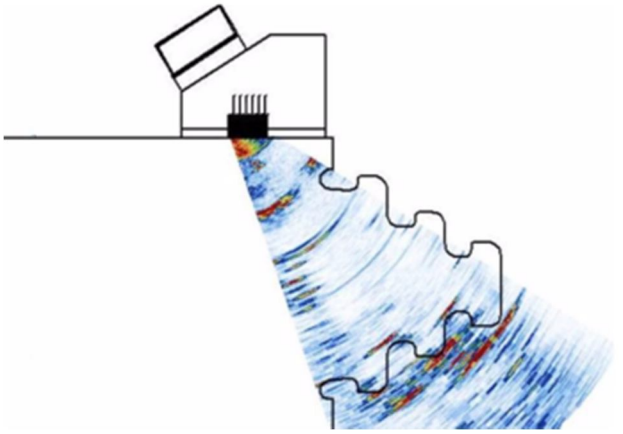
تمرکز بسیاری از اختراعات و شرکت‌ها در ایران و جهان بر این است که برای افزایش سرعت و دقت بازرسی از روش‌های تست خودکار استفاده کنند. برای نمایش اطلاعات سعی شده است از تصاویر روبش C به‌جای روبش A استفاده شود. روبش A دقیقاً شکل سیگنال است اما روبش C شکل قطعهٔ بازرسی‌شده را به کاربر نشان می‌دهد. بسیاری از شرکت‌های مطرح در زمینهٔ بازرسی غیرمخرب از جمله شرکت الیمپوس تلاش زیادی برای ساخت چنین دستگاه‌هایی کرده‌اند [۱]. شرکت‌های مطرح دیگر در بازرسی غیرمخرب نیز اختراعاتی را در زمینهٔ بازرسی اتوماتیک اجزای توربین انجام دادند. برای مثال در سال ۱۹۹۸ م، شرکت جنرال الکتریک دستگاه اسکن سه‌محوره برای بازرسی داخل شفت توربین را به‌عنوان اختراع به ثبت رساند [۵۰]. در سال ۲۰۰۲ م اختراعی توسط زیمنس برای پایش وضعیت پره‌های ردیف‌های ثابت و متحرک توربین گازی با کمک سیگنال‌های صوتی ثبت شد [۵۱]. در ایران نیز پروژه‌های مشابهی برای تهیهٔ دستگاهای اتوماتیک با قابلیت ارائهٔ نتایج به صورت روبش C انجام شده است. برای مثال در سال ۱۳۸۶ در دانشکدهٔ مهندسی برق دانشگاه امیرکبیر، رضایی تست اتوماتیک به روش جریان گردابی با قابلیت ارائهٔ نتایج به صورت روبش C را انجام داد. در این پروژه با کمک چند فرکانس چندلایهٔ متفاوت تحت بررسی قرار گرفته است و در نهایت سعی شده است از تصاویر اسکن C برای نمایش استفاده شود [۵۲]. در سال ۱۳۸۷ نیز پروژه‌ای مشابه در دانشگاه خواجه

نصیرالدین طوسی زیر نظر هنرور برای تهیهٔ تصاویر اسکن C با روش فراصوتی انجام شده است [۵۳]. روش بازرسی در این فرایند به روش غرقابی[19] است. در اختراعی دیگر در سال ۲۰۰۷ م سعی شده است سازوکارهایی ایجاد شود تا با روش بابلر نیز بتوان عمل اسکن فراصوتی و از آنجا تهیهٔ اسکن C را انجام داد [۵۴]. در روش بابلر به‌جای غرق کردن قطعه در آب سعی می‌شود که از ستون آب برای ارسال موج صوتی به داخل قطعه استفاده شود. در ایران، خامنه در سال ۱۳۹۳ با کمک این روش تلاش کرد که اتصالات چسبی را بازرسی کند [۵۵]. با توجه به حجیم بودن بسیاری از اجزای توربین، امکان غرق کردن این قطعات در داخل آب به‌منظور بازرسی اتوماتیک وجود ندارد، بنابراین این روش می‌تواند کاربرد گسترده‌ای در صنعت توربین‌سازی داشته باشد. وقتی شرایط انجام آزمون پیچیده است استفاده از شبیه‌سازی می‌تواند کمک زیادی کند. همچنین استفاده از شبیه‌سازی برای تشخیص شرایط کاری و تعیین احتمال وجود عیوب در آن شرایط بسیار ضروری است. شرکت زیمنس براساس تحلیل‌هایی که با کمک شبیه‌سازی انجام داده است و همچنین ارزیابی قطعات در حین کارکرد تعیین کرده است که وقوع چه عیوبی در اجزای متفاوت توربین محتمل است [۴]. این نوع تحلیل‌ها در انتخاب روش مناسب برای بازرسی کمک فراوانی می‌کند؛ زیرا هر روش برای تشخیص عیوب خاصی تواناست. شبیه‌سازی همچنین در طراحی روش آرایهٔ فازی به‌دلیل پیچیدگی آن کاربرد زیادی دارد. استفاده از تکنیک آرایهٔ فازی در روش فراصوتی در صنعت توربین‌سازی در سالیان اخیر کاربرد فراوانی داشته است. در بازرسی‌های حین سرویس لازم است که کل پره‌ها دمونتاژ و سپس بازرسی‌ها روی دیسک و پره انجام شود. با استفاده از تکنیک آرایهٔ فازی می‌توان بدون نیاز به دمونتاژ کردن پره و دیسک بازرسی را انجام داد. شکل ۸ بازرسی ریشهٔ پره با استفاده از روش آرایهٔ فازی در حالتی که روی دیسک نصب است را نشان می دهد. در سال ۲۰۰۰ م شرکت الکتریک پاور[20] اختراعی را برای بازرسی هاب دیسک توربین در حالتی که پره دمونتاژ نشده است با روش آرایهٔ فازی به ثبت رساند [۵۶]. در سال ۲۰۰۹ م، سنگان[21] و همکاران روی دیسک توربین فشار پایین تحقیقاتی با کمک روش آرایهٔ فازی در وضعیت خاموشی انجام دادند [۵۷]. در این تحقیق با کمک افت دامنه سایز عیوب با هم مقایسه شده و در نهایت یک مجموعه برای تست توربین به این روش ساخته و آن را در عمل به کار گرفته‌اند. لی و همکاران روی بازرسی ریشهٔ توربین کم‌فشار کار کردند. آنها کار شبیه‌سازی را برای تست آرایهٔ فازی انجام دادند و نتایج را با هم مقایسه کردند [۵۸]. در روش آرایهٔ فازی تعداد زیادی کریستال، موج فراصوتی را منتشر می‌کنند، بنابراین طراحی شرایط آزمون با روش آرایهٔ فازی دشوار است. امروزه نرم‌افزارهایی براساس المان محدود وجود دارند که می‌توان با کمک آنها طراحی شرایط آزمون را انجام داد. یکی از این نرم‌افزارها بیم‌تول[22] است. با کمک بخش آرایهٔ فازی این نرم‌افزار می‌توان عمل طراحی شرایط آزمون فراصوتی را انجام داد و سپس آن را در عمل به‌کار گرفت. ادیفای[23] نیز چنین نرم‌افزارهایی را برای روش جریان گردابی به‌کار گرفته است. با توجه به پیچیده‌شدن شرایط بازرسی پیش‌بینی می‌شود که استفاده از شبیه‌سازی در بازرسی غیرمخرب خصوصاً بازرسی به روش‌های جریان گردابی و فراصوتی توسعه یابد.

۹. نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی اختراعات و مقالات منتشرشده در دنیا، همچنین ظرفیت‌های موجود در داخل راه‌کارهای زیر برای توسعهٔ بازرسی به روش فراصوتی و جریان گردابی توصیه می‌گردد:

۱. استفاده از روش‌های اتوماسیون در بازرسی شامل استفاده از سازوکار حرکتی خودکار و استفاده از تصاویر روبش C برای نمایش برای افزایش دقت و سرعت بازرسی
۲. استفاده از فناوری آرایهٔ فازی برای جلوگیری از اتلاف زمان جهت دمونتاژ کردن اجزای توربین
۳. استفاده از روش‌های شبیه‌سازی جهت طراحی شرایط آزمون و همین‌طور پیش‌بینی عیوب احتمالی در قطعه به‌منظور اتخاذ استراتژی صحیح جهت بازرسی
۴. استفاده از روش‌های پردازش سیگنال با در نظر گرفتن گسترش کاربرد صنعت فورج و همین طور استفاده از سوپرآلیاژ در صنعت توربین‌سازی
۵. گسترش استفاده از تکنیک‌های EMAT، لیزر فراصوتی، طراحی موجبر و طراحی پروب‌های خاص برای افزایش انعطاف در بازرسی توربین‌های گاز و بخار



شکل ۸ استفاده از روش آرایهٔ فازی جهت بازرسی ریشهٔ پره و دیسک

۱۰. مآخذ

[۱۰] ف. بیگلری، م. صادقی، *طراحی قالب‌های فورج*، تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۴.

[11] C. Lane, *The development of a 2D ultrasonic array inspection for single crystal turbine blades*, Springer International Publishing, 2013.

[12] M. Yamamoto, Method for producing titanium Alloy turbine blade blades and titanium alloy titanium alloy turbine blades, US. Patent 6, 127, 044, 3 Oct 2000.

[13] T. O. Koji Kimura, Method of forging turbine blade, US Patent 8, 950, 070, 10 Feb 2015.

[14] H. Julius, Method of fabricating a turbine blade having a leading edge formed of weld metal, US Patent 3, 564, 689, 27 May 1968.

[15] H. Widowitz, PROCESS FOR THE PRODUCTION OF TURBINE BLADES, US Patent 3, 660, 882, 9 May 1972.

[16] K. T. Fendt, H. Mooshofer, S. J. Rupitsch, R. Lerch, H. Ermert, Investigation of the Synthetic Aperture Focusing Technique resolution for heavy rotor forging ultrasonic inspection, in Ultrasonics Symposium (IUS), 2013 IEEE International, IEEE, 2013.

[17] J. Vrana, A. Zimmer, K. Bailey, R. Angal, P. Zombo, U. Büchner, A. Buschmann, R. Shannon, H. Lohmann, W. Heinrich, Evolution of the ultrasonic inspection requirements of heavy rotor forgings over the past decades, in AIP Conference Proceedings, 2010.

[18] T. Fukuchi, T. Ozeki, M. Okada and T. Fujii, Nondestructive inspection of thermal barrier

[1] NDT.net, www.ndt.net (accessed 30 Aug 2017).

[۲] ر. مهدیزاد، اندازه‌گیری عمق لایهٔ سخت‌شده قطعات فولادی به روش فراصوتی، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۹.

[3] D.E. Bray, R.K. Stanley, *Nondestructive evaluation: a tool in design, manufacturing and service*, CRC press, 1996.

[4] V. Abbasi, R. Sazzadur, NDE Inspections and Lifetime Assessment of Turbine Equipment, *SIMENS*, Orlando, Florida, 2008.

[5] E. Zwicker, Flying Inspection Industrial Motivation, Alstom, 2012.

[۶] ف. هنرور، *آزمون‌های غیرمخرب: آزمون فراصوتی*، نوپردازان، ۱۳۸۴.

[7] X. Jian, N. Guo, M. Li, H. Zhang, Ultrasonic Evaluation of Bond Using Segment Adaptive Filtering, *Journal of nondestructive evaluation*, vol. 21, no. 2, pp. 55-65, 2002.

[8] R. Kazys, L. Mazeika, R. Sliteris, A. Voleisis, Ultrasonic non-destructive testing of journal bearings, *Insight*, vol. 43, no. 6, pp. 385-389, 2001.

[9] A. Uglov, A. Khlybov, Adhesive-strength quality control of bimetal layers using an acoustic method, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 51, no. 7, pp. 422-427, 2015.

coating of gas turbine high temperature components, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 391-400, 2016.

[19] T. Fukuchi, N. Fuse, M. Mizuno, K. Fukunaga, Nondestructive testing using terahertz waves, *IEEJ Transactions on Power and Energy*, vol. 135, no. 11, pp. 647-650, 2015.

[20] T. Fukuchi, N. Fuse, T. Fujii, M. Okada, K. Fukunaga, M. Mizuno, Measurement of topcoat thickness of thermal barrier coating for gas turbines using terahertz waves, *Electrical Engineering in Japan*, vol. 183, no. 4, pp. 1-9, 2013.

[21] Metals Test and Analytical Procedures, in Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.03, ASTM International, 2005.

[22] R. V. Falsetti, CALIBRATION AND FLAW DETECTION METHOD FOR ULTRASONIC INSPECTION OF ACOUSTICALLY NOISY MATERIALS, US Patent 5, 445, 029, 29 Aug 1995.

[23] M. Ricci, L. Senni, P. Burrascano, M. Calderini, Pulse-compression ultrasonic technique for the inspection of forged steel with high attenuation, *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 54, no. 2, pp. 91-95, 2012.

[24] J. Chen, Y. Shi, S. Shi, Noise analysis of digital ultrasonic nondestructive evaluation system, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 76, no. 9, pp. 619-630, 1999.

[25] Do Haeng Hura, Myung Sik ChoiaHO, Hee-Sang Shima, Deok Hyun Leea, One Yoob, Influence of signal-to-noise ratio on eddy current signals of cracks in steam generator tubes, *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 46, no. 6, pp. 883-888, 2014.

[۲۶] ع. نمازی، بهبود تخمین اختلاف زمانی پالس‌های فراصوتی فراصوتی به کمک پردازش سیگنال، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، شهریور ۱۳۹۱.

[27] F. Honarvar, H. Sheikhzadeh, M. Moles, A. N. Sinclair, Improving the time-resolution and signal-to-noise ratio of ultrasonic NDE signals, *Ultrasonics*, vol. 41, no. 9, pp. 755-763, 2004.

[۲۸] ع. غلامی، مدلسازی سیگنال‌های فراصوتی با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، تهران: پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۳.

[۲۹] ر. کیامهر ،م. غلام‌نیا، *پردازش رقومی سیگنال با کمک نرم‌افزار MATLAB*، زنجان: دانشگاه زنجان، ۱۳۹۴.

[۳۰] م. پرکان، ح. سیاه‌کوهی، ع. غلامی، کاربرد تجزیه مد تجربی و طیف فرکانس لحظه‌ای برای تضعیص نوفه و تشخی سایه فرکانس پایین در داده‌های لرزه‌ای، فیزیک زمین و فضا، تابستان ۱۳۹۴.

[31] M. Loosvelt, P. Lasaygues, A Wavelet-Based Processing method for simultaneously determining ultrasonic velocity and material thickness, 2011.

[32] Y. Li, B. Yan, D. Li, H. Jing, Y. Li, Z. Chen, A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed Eddy current NDT, *NDT & E International*, vol. 36, no. 1, pp. 37-41, 2003.

[۳۳] ف. صالحی، بهبود نتایج ضخامت‌سنجی فراصوتی با استفاده از پردازش سیگنال، پایانامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، بهمن ۱۳۹۰.

[34] D. R. Hull, H. E. Kautz, A. Vary, UltrasD. R. onic Velocity Measurement Using Phase-Slope and Cross-Correlation Methods, in NASA, Colorado, 1984.

[35] F. Honarvar, F. Salehi, V. Safavi, A. Mokhtari, A. N. Sinclair, Ultrasonic monitoring of erosion/corrosion thinning rates in industrial piping systems, *Ultrasonics*, vol. 53, no. 7, pp. 1251-1258, 2013.

[36] N. E. Huang, et al, The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 454, no. 1971, 1998.

[۴۷] م. اعیانی، ف. هنرور، ر. شعبانی، مطالعهٔ تغییرات سرعت امواج طولی و عرضی با تغییر دما، *مدرس*، جلد ۱۶، ش. ۲، ۱۳۹۵، ص. ۱۹۹–۲۰۵.

[48] M. J. Metala, Method for non-destructively assessing the condition of a turbine blade using eddy current probes inserted within cooling holes, US Patent 5, 140, 264, 18 Aug 1992.

[۴۹] ا. م. نیا، *کتابچهٔ راهنمای انتخاب روش جهت بازرسی و کنترل خوردگی*، تهران: تکین کو، ۱۳۹۳.

[50] M. Partika, Portable three axis scanner to inspect a gas turbine engine spool by eddy current or ultrasonic inspection, U.S Patent 5, 781, 007, 14 Jul 1998.

[51] Z. S. R. Harrold, Acoustic waveguide sensing the condition of components within gas turbines, US Patent 6, 487, 909, 3 Dec 2002.

[۵۲] ب. رمضانی، طراحی و ساخت دستگاه C-scan چندفرکانسی به روش جریان گردابی و بهبود ویژگی های آن، تهران: پایان‌نامه، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکدهٔ مهندسی برق، ۱۳۸۶.

[۵۳] م. ضیقمی، ف. هنرور، طراحی و ساخت دستگاه بازرسی غیرمخرب فراصوتی روبش C، در دومین کنفرانس بین‌المللی بازرسی فنی و آزمون غیرمخرب، ۱۳۸۷.

[54] F. Marvin, Rigid-contact dripless bubbler (RCDB) apparatus for acoustic inspection of a workpiece in arbitrary scanning orientations, US Patent 7, 284, 434, 23 Oct 2007.

[۵۵] ف. هنرور، م. سپهری خامنه، طراحی یک سیستم فراصوتی با استفاده از تکنیک حباب‌ساز جهت بازرسی اتصالات چسبی، *صوت و ارتعاش*، س. ۳، ش. ۵، ۱۳۹۳، ص. ۴۸–۵۶.

[56] P. F. Sabourin, Method of ultrasonically inspecting turbine blade attachments, US Patent 6, 082, 198, 4 Jul 2000.

[57] S. Yang, B. Y. Kim, Using phased array ultrasonic technique for the inspection of straddle mount-type low-pressure turbine disc, *Ndt & E International*, vol. 42, no. 2, pp. 128-132, 2009.

[58] Seung-Pyo LEE, Jae-Dong KIM, Chang-Soo KIM, A Comparative Study of Simulation and Experiment Results for Phased Array Ultrasonic

[۳۷] ا. عطایی، *اصول علمی و کاربردهای فنی روش EMAT در تست آلتراسونیک، در بازرسی فنی و آزمون غیرمخرب*، تهران، ۱۳۸۶.

[38] N. Lunna, S. Dixon, M. Potter, High temperature EMAT design for scanning or fixed point operation on magnetite coated steel, *NDT & E International*, vol. 89, pp. 74-80, 2017.

[39] C. Thring, Y. Fan, R. Edwards, Focused Rayleigh wave EMAT for characterisation of surface-breaking defects, *NDT & E International*, vol. 81, pp. 20-27, 2016.

[40] S. D. Kapayeva, M. J. Bergander, A. Vakhguelt, Ultrasonic and EMAT - Important Tools to Analyze a Combined Effect of Multiple Damage Mechanisms in Boiler Tubes, *Ultrasonics for Nondestructive Testing*, 2016.

[41] I. Baillie, P. Griffith, X. Jian, S. Dixon, implementing an ultrasonic inspection system to find surface and internal defects in hot, moving steel using EMATs, AIP Conference Proceedings, 2009.

[42] S. Barkhoudarian, Contact-free ultrasonic transduction for flaw and acoustic discontinuity detection, US Patent 4, 567, 769, 4 Feb 1986.

[۴۳] ح. م. نیا، به‌کارگیری روش لیزر فراصوتی در جهت ارزیابی غیر مخرب قطعات صنعتی، تهران: پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۲.

[44] B. Park, H. Sohn, C. Yeum, T. Truong, Laser ultrasonic imaging and damage detection for a rotating structure, *Structural Health Monitoring*, vol. 12, no. 5-6, pp. 494-506, 2013.

[45] G. Goode, R. Lewis, A momentary-contact system for ultrasonic testing of steel at temperatures up to 1 200° C, *Non-Destructive Testing*, vol. 8, no. 6, pp. 313-319, 1975.

[46] V. Rajendran, N. Palanivelu, B. K. Chaudhur, A device for the measurement of ultrasonic velocity and attenuation in solid materials under different thermal conditions, *Measurement*, vol. 38, no. 3, pp. 248-256, 2005.

[60] G. E. Goode, R. Lewis, A momentary-contact system for ultrasonic testing of steel at temperatures up to 1200 °C, *Non-Destructive Testing*, vol. 8, no. 6, pp. 313-319, 1975.

Testing for the Root Area of Low-Pressure Turbine, *Nuclear Engineering & Technology*.

[59] E. Zwicker, Flying Inspection Industrial Motivation, Alstom, 2012.

پی‌نوشت

1. sorting
2. Bondcoat
3. dispersion
4. TDE (time delay estimation)
5. HUR
6. spike
7. adaptive filter
8. peak
9. TDE (Time Delay Estimation)
10. cross coloration
11. filtering
12. smoothing
13. spectrum analysis
14. prediction
15. modeling
16. interpolation
17. deconvolution
18. westinghouse electric
19. immersion
20. electric power
21. seunghan
22. Beamtool
23. Eddyfi