مقاله

اصول و کاربرد پایش سلامت سازه‌ها

رسول محرمی
استادیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک
دانشگاه زنجان
r_moharami@znu.ac.ir

امیرحسین بیات*
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه زنجان
amir.h_bayat@znu.ac.ir

سروش آقائی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه زنجان
soroush.aghaiee@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۰۲

چکیده

اساساً تمامی سازه‌ها و قطعات صنعتی در طول کارکرد خود باید در محدودهٔ مورد نظر طراح باشند. این در حالی است که گاهی عوامل محیطی و مخرب موجود می‌تواند آثار مخربی بر عمر و سلامت سازه یا قطعهٔ مورد نظر داشته باشند. از نتایج برخی از این آثار مخرب می‌توان به جوانه‌زنی و رشد ترک در سازه اشاره کرد که در صورت بارگذاری و شرایط محیطی مخرب می‌تواند به واماندگی کامل سازه بیانجامد. چنانچه این معایب پس از رخداد پدیدار شوند، هزینه‌ای سنگین و گاه جبران‌ناپذیر برجای خواهند گذاشت. به‌همین منظور، برای پیش‌بینی و جلوگیری از رخداد این معایب، سامانه‌های پایش سلامت سازه استفاده می‌شوند. در این مقاله کلیات، اصول و روش‌های پایش سلامت سازه‌ها به اختصار تشریح می‌شود و کاربردهای این فن به اجمال مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی: پایش سلامت سازه[۱]، حسگر پیزوالکتریک[۲]، تحلیل مودال[۳]، حسگرهای فیبر نوری[۴]، واماندگی

۱. مقدمه

بنا بر تعریف، فن پایش سلامت سازه‌ها تشخیصی از وضعیت مواد به‌کار رفته در سازه و بخش‌های متفاوت آن را در طول عمر سازه به‌دست می‌دهد. اساساً لازم است وضعیت سلامت هر سازه در محدودهٔ تعریف‌شدهٔ طراحی باشد، اگرچه می‌تواند در اثر واکنش طبیعی با محیط و اتفاقات ناگهانی تغییر کند. با استفاده از بعد زمانی پایش سازه، که امکان لحاظ‌کردن تاریخچهٔ اطلاعات کامل از سازه را فراهم می‌کند، پیش‌بینی خسارت وارد بر سازه میسر خواهد بود. در این‌صورت می‌توان پایش سلامت سازه را به‌عنوان روشی جدید به‌منظور پیش‌بینی غیرمخرب معرفی کرد. اساس این روش بر استفاده از انواع حسگرها، ارسال داده‌ها، کاربرد مواد هوشمند[۵]، محاسبات متنوع و توانایی پردازش سازه‌ها استوار است. نخستین بخش این سامانه، به عملکرد پایش یکپارچهٔ سازه مربوط می‌شود و توسط حسگر به‌منظور ایجاد یک سیگنال (مکانیکی یا الکتریکی) به یک زیرسامانه (جهت جمع‌آوری و ذخیرهٔ داده‌ها) فرستاده می‌شود. چندین حسگر مشابه برای تشکیل یک شبکه می‌توانند به یکدیگر متصل شوند و داده‌های آنها با انواع دیگر حسگرها ادغام شود. همچنین حسگرهای دیگری که در حال پایش شرایط محیطی‌اند، می‌توانند امکان اجرای

پایش سازه را فراهم آورند. سیگنال دریافت‌شده توسط زیرسامانه به‌موازات داده‌های ثبت‌شدهٔ قبلی توسط کنترلر، جهت اعلام وضعیت سلامت سازه استفاده می‌شود. معمولاً ابزارهای بسیاری به‌منظور پایش وضعیت سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به حسگرهای پیزوالکتریک، حسگرهای فیبر نوری و استفاده از مواد هوشمند اشاره کرد. به‌طور کلی پایش سلامت سازه‌ها براساس دو رویکرد، پایش سلامت سازه‌ها مبتنی بر تشخیص و پیش‌بینی استوار است. بخش مهم و قابل پیشرفت در این حوزه همان پیش‌بینی است؛ زیرا رویکرد تشخیص، عمدتاً به همان روش‌های ارزیابی غیرمخرب می‌پردازد [۱].

هر یک از این روش‌ها در صنایع گوناگون کاربرد خاص خود را دارند. امروزه سامانه‌های پایش سلامت سازه‌ها روبه پیشرفت‌اند، به‌طوری‌که در کشورهای توسعه‌یافته به این حوزه بیشتر توجه می‌شود. لذا با توجه به آشنایی نه‌چندان کامل کشور در این زمینه، در این مقاله سعی شده است کلیات، اصول و روش‌های انجام پایش سلامت سازه‌ها مورد بحث و بررسی قرار گیرد.

۲. دلیل اهمیت

دلیل اهمیت پایش سلامت سازه‌ها به کارایی آن بازمی‌گردد. وقتی از پایش سلامت یک سازه در طول دورهٔ کارکرد آن صحبت می‌شود، منظور این است که آن سازه به‌قدری مهم و باارزش است که می‌توان هزینه‌ای را صرف مراقبت از کارایی و سلامت فنی آن نمود. لذا، به بیان ساده‌تر می‌توان گفت دلیل اهمیت پایش سلامت سازه‌ها به اهمیت سازه‌ها و بخش‌هایی بازمی‌گردد که لازم است از آنها مراقبت شود. مثلاً در سازه‌هایی چون پل‌ها، سکوهای نفتی و جز این‌ها، که از اهمیت بالایی برخوردارند، استفاده از سامانه‌های کنترل برخط[۶] سازه امری ضروری است؛ زیرا اگر پلی عظیم تحت تأثیر بارهای ضربه‌ای، ارتعاشی و خستگی، دچار ترک‌خوردگی شود و این ترک تحت تأثیر بارگذاری‌ها رشد کند، می‌تواند به کاهش حد تحمل پل بیانجامد و در نهایت سبب واماندگی[۷] و فروپاشی[۸] آن شود.

از دانش ارتعاشات چنین برمی‌آید که وجود ترک در هر سازه به کاهش فرکانس طبیعی سامانه منجر می‌شود. با کاهش فرکانس طبیعی، حد تحمل سازه نیز کاهش می‌یابد، لذا بارگذاری‌ها زودتر می‌توانند خود را به حد فرکانس طبیعی برسانند. با برابرشدن فرکانس بارگذاری با یکی از فرکانس‌های طبیعی سازه پدیدهٔ تشدید[۹] رخ می‌دهد و در نهایت باعث فروپاشی کلی پل می‌شود. حال اگر سامانهٔ پایش وضعیت سازه روی پل جانمایی شود، به‌محض ایجاد ترک یا هر عیب دیگر، سامانهٔ مذکور اطلاعاتی را به مرکز کنترل ارسال می‌نماید و به‌دنبال آن در جهت رفع آن عیب اقدام می‌شود. تمامی مطالب بیان‌شده بر اهمیت پایش سلامت سازه‌ها دلالت دارد. در شکل ۱ نمایی از سانحهٔ سقوط پرواز شمارهٔ ۲۴۳ شرکت هواپیمایی آلوها[۱۰]، مورخ ۲۸ آوریل ۱۹۸۸، نمایش داده شده است. علت سقوط این هواپیما عدم کنترل خوردگی گزارش شده است. پس از بروز چنین رخدادهایی بود که جامعهٔ بشری درصدد یافتن راه‌حلی برای رفع این مشکلات و جلوگیری از چنین سوانحی برآمد.

از دیگر دلائل پایش سلامت سازه‌ها، صرفه‌جویی تعمیر و نگه‌داری از سامانه‌های متنوع صنعتی است. مثلاً چنانچه یک سازهٔ نیروگاهی یا یکی از قطعات وابسته به صنایع هوافضا دچار مشکل شود یا از کار بیافتد، راه‌اندازی مجدد آن هزینهٔ گزافی خواهد داشت.

۳. روش‌های انجام پایش سلامت سازه

اساساً دو رویکرد کلی برای به‌کارگیری پایش سلامت سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد: پایش بر اساس تشخیص[۱۱] و پایش بر اساس پیش‌بینی[۱۲]. روش‌های استفاده‌شده در رویکرد تشخیص، اغلب همان روش‌های ارزیابی غیرمخرب است. در این رویکرد، اگر عیبی در سازه وجود داشته باشد، فقط در همان لحظه که تست انجام

شکل ۱. پرواز شمارهٔ ۲۴۳ شرکت هواپیمایی آلـوها. در بیست و هشتم آوریل ۱۹۸۸، بخشی از بدنهٔ هواپیمای بوئینگ ۷۳۷ شرکت هواپیمایـی آلـوها در اثر عدم کنترل میزان خوردگی سازهٔ هواپیما منـهدم شد. در اثـر این سانـحه یک مهمانـدار کشته و هشت تـن دیگر مجـروح شدنـد.

می‌شود، قابل شناسایی است و قابلیت شناسایی عیوب سازه در طول کارکرد آن وجود ندارد. از جمله روش‌های پرکاربرد در حوزه‌های تشخیص عیوب می‌توان به روش فراصوتی، رادیوگرافی، تست مایعات نافذ، ذرات مغناطیسی، جریان‌های گردابی و جز این‌ها اشاره کرد. رویکرد پیش‌بینی اما با رویکرد قبل قدری متفاوت است. در این روش رفتار سازه به‌صورت برخط تست می‌شود و در صورت بروز هرگونه عیب، که قابل شناسایی برای حسگر مورد استفاده باشد، می‌توان اقدام اصلاحی و پیشگیرانهٔ مناسبی انجام داد. از جمله مهم‌ترین روش‌های انجام پایش سلامت سازه با این رویکرد می‌توان به استفاده از حسگرهای فعال پیزوالکتریک، حسگرهای فیبر نوری و استفاده از مفاهیم ارتعاشات اشاره کرد. نوع دیگر طبقه‌بندی سامانه‌های پایش سلامت سازه، بر اساس فعال و غیرفعال بودن سامانه تعریف می‌شود. در واقع سامانهٔ غیرفعال، همان روش‌های ارزیابی غیرمخرب است، حال آنکه سامانه‌های فعال به روش‌هایی گفته می‌شود که طی آن سازهٔ مورد نظر توسط سامانه‌های پایش سلامت سازه به‌طور دائم و لحظه‌ای کنترل شود. در ادامه برخی از روش‌های پایش سلامت سازه‌ها معرفی می‌شود.

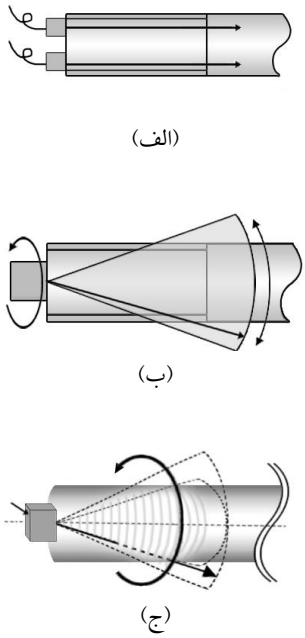
۳-۱. روش‌های مبتنی بر تشخیص

از جمله مهم‌ترین روش‌های مبتنی بر تشخیص، روش فراصوتی است که در ادامه تشریح می‌شود.

۳-۱-۱. روش فراصوتی

روش غیرمخرب فراصوتی از جمله روش‌های کارآمد بازرسی‌های غیرمخرب است که در آن امواج صوتی با فرکانس بالا به‌درون قطعه فرستاده می‌شوند و پس از برخورد به عیوب و ناپیوستگی‌ها انعکاس یافته و توسط سامانهٔ خاصی تحلیل می‌شوند. درجهٔ انعکاس به‌میزان زیادی به خواص فیزیکی مواد تشکیل‌دهندهٔ فصل مشترک و نه خواص فیزیکی ویژهٔ ماده بستگی دارد. مثلاً در فصل مشترک فلز / گاز امواج به‌طور کامل انعکاس یافته، اما در فصل مشترک‌های فلز / مایع یا فلز / جامد انعکاس جزئی صورت می‌گیرد که در این حالت درصد انرژی انعکاسی، به‌طور عمده به نسبت برخی خواص معین مواد اطراف فصل مشترک بستگی دارد. ترک‌ها، حفره‌های انقباضی، پوسته‌ها و حفره‌ها و سایر ناپیوستگی‌ها می‌توانند فصل مشترک‌های انعکاسی ایجاد کنند که به‌راحتی قابل

تشخیص است. آخال‌ها[۱۳]و سایر ناهمگنی‌ها نیز از طریق انعکاس یا پراکندگی[۱۴] امواج فراصوتی یا با ایجاد برخی دیگر از آثار قابل شناسایی قابل ردیابی‌اند. در این روش ابتدا سطح مورد نظر با ماده‌ای به‌نام کوپلنت[۱۵] آغشته می‌شود. استفاده از این ماده بدین دلیل است که امواج فراصوتی در هوا منتشر نمی‌شوند و برای انتشار باید یک محیط فیزیکی وجود داشته باشد. سپس پراب فراصوتی روی آن منطقه قرار داده و با انتشار موج فراصوتی به‌داخل قطعه و بازگشت آن موج از عیوب و ناپیوستگی‌های موجود می‌توان اندازهٔ عیوب و محل قرارگیری آن را شناسایی کرد. در شکل ۲ انواع روش‌های انتشار امواج از پراب به‌داخل قطعه نمایش داده شده است.



شکل ۲. نحوهٔ انتشار امواج فراصوتی از طریق مبدل‌های گوناگون [۸]؛ الف) روش انتقال عمودی (اسکن یک‌بعدی)
ب) روش اسکن مقطعی[۱۶] (اسکن دوبعدی خطی و چرخشی)؛ ج) روش سه‌بعدی (اسکن سه‌بعدی خطی، چرخشی و دورانی حول محور)

در این شکل سه نوع مبدل مشاهده می‌شود: نوع اول امواج را فقط به‌شکل خطی به قطعه ارسال و از آن دریافت می‌کند. این نوع اسکن به ای. اسکن[۱۷] مشهور است. نوع دوم اما امواج را به‌صورت دورانی و در دو بعد (مثلاً صفحهٔ x-y) به‌داخل قطعه ارسال و از آن دریافت می‌کند و نمایی دوبعدی از عیب قطعه را نمایش می‌دهد. به این نوع اسکن اصطلاحاً بی. اسکن[۱۸] گفته می‌شود. نوع سوم این مبدل‌ها، که نمایی سه‌بعدی از عیب را نمایش می‌دهد، امواج را به‌صورت دورانی و در ترکیب با حالت دوم به‌داخل قطعه ارسال می‌کند. به این نوع اسکن اصطلاحاً سی. اسکن[۱۹] گفته می‌شود [۸].

۳-۱-۱-۱. اصول انتشار امواج

دو میله با سطح مقطع A_1 و A_2 و سرعت اولیهٔ $V_2 < V_1$ فرض می‌شود که در راستای طولی به‌هم برخورد می‌کنند. در دینامیک با فرض صلب‌بودن اجسام از اتفاقاتی که در لحظهٔ برخورد در داخل دو ماده رخ می‌دهد صرف‌نظر می‌شود. اما این تحلیل صحیح نیست؛ زیرا اگر اجسام صلب

فرض نشوند، در اثر برخورد انرژی جنبشی به انرژی کرنشی ذخیره‌شده در جسم تبدیل می‌شود. پارامترهای زیادی چون هندسه، شکل سطح مقطع و جز این‌ها در برخورد و اتفاقات ناشی از آن مؤثرند. حال به بررسی پدیده‌ای که در اثر برخورد در داخل ماده رخ می‌دهد، پرداخته می‌شود. همان‌گونه که اشاره شد، در لحظهٔ برخورد ذرات واقع در ناحیهٔ برخورد به‌علت عدم تعادل ایجادشده ($\sum F \neq 0$)، که می‌تواند منشأ مکانیکی یا حرارتی داشته باشد، آشفتگی ایجاد می‌شود. این آشفتگی ذرات را با سرعت u وادار به جابه‌جایی می‌کند و خود با سرعت C_L شروع به انتشار در طول میله می‌کند؛ بدین معنا که هر ذره این آشفتگی را به ذرهٔ کناری خود منتقل می‌کند. بنابراین در این بحث دو سرعت، یکی سرعت جابه‌جایی ذره در مکان خود (u) و دیگری سرعت انتشار موج تنشی الاستیک یا همان سرعت انتشار آشفتگی (C_L) مطرح است. ناگفته نماند چون در ذرات میله در اثر ضربه، کرنش و درپی آن تنش ایجاد می‌شود و با فرض اینکه این تغییر شکل‌ها از محدودهٔ الاستیک خارج نمی‌شود، به این آشفتگی موج تنشی الاستیک گفته می‌شود. حال پرسش مطرح این است که آیا بین u و C_L رابطه‌ای وجود دارد؟ آیا سرعت جابه‌جایی ذره با سرعت انتشار موج برابر است؟

در پاسخ به این پرسش‌ها باید گفت که سرعت جابه‌جایی ذره با سرعت انتشار و جلورفتن موج از نظر فیزیکی کاملاً متفاوت است. امواج منتشره در مواد الاستیک به‌صورت امواج طولی[۲۰] و یا به‌صورت امواج برشی[۲۱] می‌باشند. همچنین به‌هنگام برخورد دو جسم، با توجه به خواص مکانیکی دو جسم، سرعت انتشار آشفتگی در داخل اجسام یکسان نمی‌باشد، اما هر دو این آشفتگی را ذره به ذره در جهت انتشار امواج منتقل می‌کنند. امواجی که در ماده منتشر می‌شوند به امواج حجمی[۲۲] معروف می‌باشند؛ اما امواجی که در سطح قطعه‌کار منتشر می‌شوند به امواج سطحی[۲۳] معروفند. ناگفته نماند که بحث ارتعاش با بحث انتشار موج در جسم دو مبحث کاملاً متفاوت است. ارتعاش ایجاد یک حرکت رفت‌وبرگشتی تکراری برای کل جسم است. جسم می‌تواند صلب یا غیرصلب باشد، البته اگر در مسئلهٔ فوق میرایی مطرح باشد ارتعاشی در سامانه نخواهیم داشت، این بحث به‌طور کامل در ارتعاشات بررسی می‌شود. در حالی‌که انتشار موج مبحثی مربوط به ذرات واقع در ماده است که برای رخ‌دادن آن جسم باید تغییرشکل‌پذیر (غیرصلب) باشد [۷]. اصول انتشار امواج در تست فراصوتی هم بر اساس همین توضیحات است و در واقع امواج فراصوتی تولیدشده در اثر ضربات بسیار آهسته‌ای است که از طرف مبدل به قطعه وارد می‌شود. در شکل‌های ۳ تا ۵ امواج نامبرده در بالا به‌صورت شماتیک نمایش داده شده است.

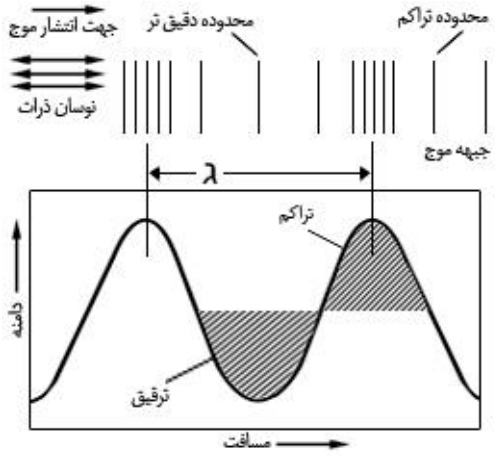
۳-۲. روش‌های مبتنی بر پیش‌بینی

در این بخش سه روش پرکاربرد در رابطه با پایش سلامت سازه‌ها شامل حسگرهای فیبر نوری، حسگرهای پیزو و استفاده از مفاهیم ارتعاشات معرفی و بررسی می‌شود.

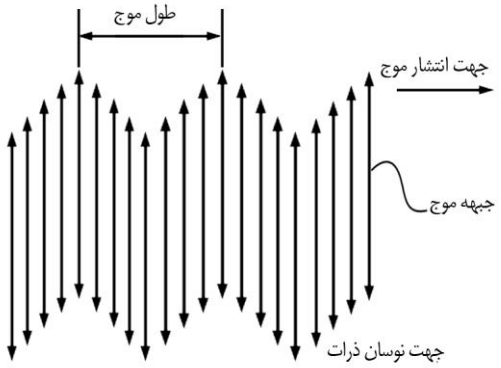
۳-۲-۱. حسگرهای فیبر نوری

طی سالیان اخیر از حسگرهای نوری در زمینه‌های گوناگون به‌طور گسترده‌ای استفاده شده است. از این کاربردها می‌توان به تصویرگیری در زمینه‌های مهندسی عمران، هوافضا، علوم دریایی، نفت و گاز، مواد مرکب و ساختارهای هوشمند[۲۴] اشاره کرد. به‌دلیل ابعاد کوچک، وزن کم و ثابت دی‌الکتریکی معادل شیشه، حسگرهای نوری ابزارهای مناسبی برای کاربرد در پایش سلامت سازه‌ها هستند. حسگرهای الکترونیکی در برابر پارازیت‌های الکتریکی و تداخل نامشابه الکترومغناطیسی دچار خطا می‌شوند، حال آنکه حسگرهای نوری در برابر این نقاط ضعف ایمن هستند. در حال حاضر حسگرهای نوری درون مواد مرکب تعبیه می‌شوند که منجر به عملکرد بهتر، کاهش تنش‌های داخلی و تغییر شکل، یافتن ناحیهٔ شروع ترک و آسیب خواهد شد. ابزارها امکان تصویرگیری همزمان در هنگام

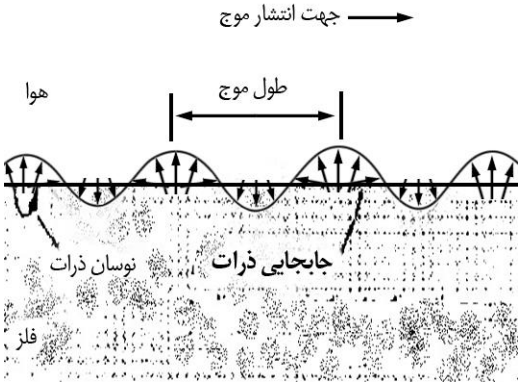
تغییر شکل و کرنش را ایجاد می‌کنند. به‌علاوه، انواع خاصی از حسگرهای نوری قابلیت تست چندین نقطه در مکان‌های مختلف با استفاده از یک فیبر را دارند [۴].



شکل ۳. نحوهٔ انتشار امواج طولی [۸]



شکل ۴. نحوهٔ انتشار امواج عرضی [۸]



شکل ۵. نحوهٔ انتشار امواج سطحی [۸]

۳-۲-۱-۱. اصول کارکرد حسگرهای فیبر نوری

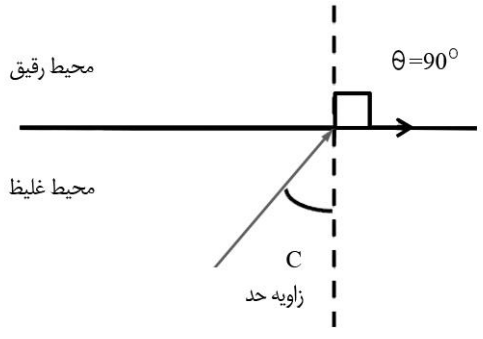
اصول کارکرد حسگرهای فیبر نوری و انتشار موج الکترومغناطیس نور در آنها بر قوانین فیزیک نور استوار است. در پدیدهٔ شکست نور، هرگاه زاویهٔ شکست به ۹۰ درجه برسد؛ یعنی پرتو شکست بر سطح جدایی دو محیط مماس شود، زاویهٔ تابش به مقداری می‌رسد که آن را زاویهٔ حد دو محیط می‌نامند. هر محیط شفاف دارای زاویهٔ حد معینی است. مثلاً زاویهٔ حد آب تقریباً ۴۸ درجه و زاویهٔ حد شیشه در حدود ۴۲ درجه است. زاویهٔ حد هنگامی به‌وجود می‌آید که نور از محیط غلیظ وارد محیط رقیق شود. در شکل‌های ۶ تا ۸ نحوهٔ شکست نور و اصول انتشار آن در داخل فیبر نوری نمایش داده شده است. در پدیدهٔ شکست نور، اگر زاویهٔ تابش از زاویهٔ حد بیشتر شود، پرتو تابش نمی‌تواند از محیط غلیظ خارج شود و تمام نور از سطح جداکنندهٔ دو محیط به درون محیط غلیظ باز می‌تابد؛ یعنی سطح جداکنندهٔ دو محیط همچون یک آینه عمل می‌کند. به این پدیده بازتابش کلی می‌گویند.

فیبر نوری میلهٔ شیشه‌ای بلندی است که ضخامت آن بین کسری از میلی‌متر تا ۵۰ میلی‌متر است. نور می‌تواند درون میلهٔ شیشه‌ای جلو رود، حتی اگر میله خم شده باشد. وقتی پرتو نوری از درون میله به سطح آن بتابد، اگر زاویهٔ تابش بزرگتر از زاویهٔ حد باشد، بازتابش کلی نور رخ می‌دهد و بدین ترتیب نور نمی‌تواند از میله خارج شود؛ چنان‌که گویی سطح درونی میله نقره اندود است، در حالی‌که چنین نیست. میلهٔ شیشه‌ای توپر، از درون، یک سطح بازتابندهٔ کامل دارد. از جمله موارد کاربرد این تارها در آندوسکوپی و صنعت مخابرات است [۴].

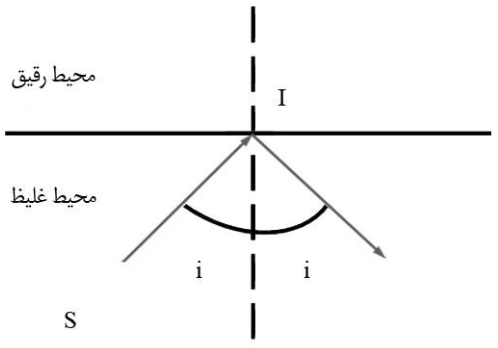
۳-۲-۱-۲. طبقه‌بندی کلی حسگرهای فیبر نوری

حسگرهای فیبر نوری براساس اصول کارکرد، به سه دستهٔ کلی تقسیم می‌شوند: حسگرهای بر پایهٔ تغییرات شدت نور، حسگرهای بر پایهٔ پلاریزاسیون و نهایتاً حسگرهای بر پایهٔ شبکهٔ براگ.

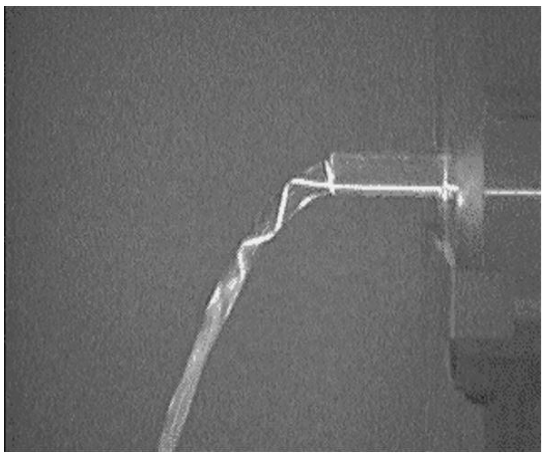
در شکل ۹ نمایی شماتیک از حسگرهای بر پایهٔ شدت نور نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، یک منبع نور در این شکل وجود دارد که وظیفهٔ ارسال امواج نور را برعهده دارد. این منبع نور، امواج الکترومغناطیس نور را از طریق کابل فیبری انتقال‌دهنده به محلی که حسگرهای فیبر نوری نصب شده‌اند ارسال می‌کند. چون حسگرهای فیبر نوری به‌منظور اندازه‌گیری کمیتی خاص در محل مورد نظر نصب شده‌اند، بنابراین پس از رسیدن نور ارسال‌شده از طریق منبع نوری به حسگرها، شدت آن تغییر می‌کند. نور منعکس‌شده از فیبرهای نوری به‌سمت تحلیلگر بازمی‌گردد. با توجه به اینکه نور در ابتدا با شدت مشخصی ارسال شده بود و نور برگشت داده‌شده دارای شدتی متفاوت از شدت نور ارسال‌شده می‌باشد، بخش تحلیلگر از روی همین تغییرات می‌تواند کمیت مورد نظر را اندازه‌گیری کند. لازم به‌ذکر است که این عمل به‌طور فعال انجام شده و به‌صورت برخط، رفتار خاصی را پایش می‌کند. معمولاً از این حسگرها برای اندازه‌گیری دما، کرنش، فشار و پارامترهای دیگر استفاده می‌شود.



شکل ۶. نمایی شماتیک از نحوهٔ شکست نور



شکل ۷. نحوهٔ انتشار نور در فیبر نوری

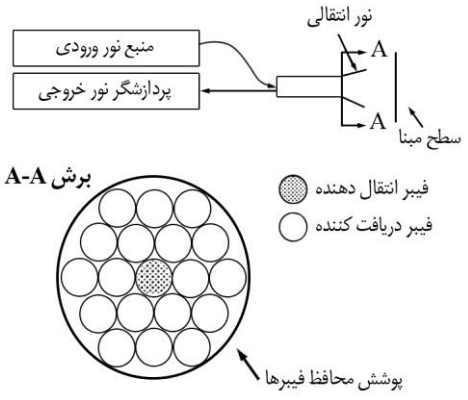


شکل ۸. فیبر نوری و انتشار نور داخل آن [۴]

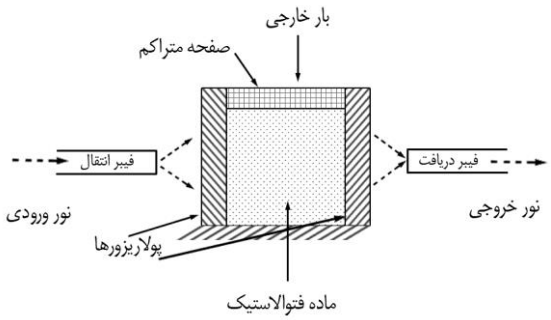
اصول کاری حسگرهای بر پایهٔ پولاریزاسیون اما مشابه آزمایش فتوالاستیسیته است. در شکل ۱۰ نمایی شماتیک از نحوهٔ کارکرد این دسته از حسگرها نمایش داده شده است. مطابق شکل نور از طریق فیبر انتقال سمت چپ ارسال می‌شود. همزمان بار خارجی به صفحهٔ متراکم و از آن به مادهٔ فتوالاستیک اعمال می‌شود. لازم به یادآوری

است که مادهٔ فتوالاستیک ماده‌ای است که در ضریب انکسار نور در آن در اثر اعمال بار خارجی تغییر می‌کند. نور تابیده‌شده به صفحهٔ پلاریزور منتقل شده و از آن به مادهٔ فتوالاستیک، که تحت بار خارجی قرار گرفته است، می‌رسد. مادهٔ فتوالاستیک نور ارسال‌شده را با یک ضریب انکسار دیگر به فیبر دریافت‌کننده تحویل می‌دهد و در نهایت نور دریافت‌شده از طریق همین فیبر به‌سمت تحلیلگر هدایت می‌شود. در نهایت از طریق همین تغییرات در انکسار نیز کمیت‌های مورد نظر اندازه‌گیری می‌شود [۱].

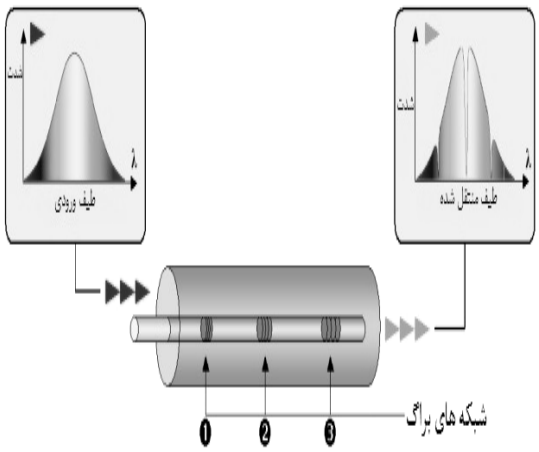
در شکل ۱۱ نیز نمایی شماتیک از نحوهٔ کارکرد یک حسگر فیبر نوری بر پایهٔ شبکهٔ براگ نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در این حسگر استوانه‌ای شفاف، که داخل آن هسته و درون هسته شبکه‌های توری‌مانند وجود دارد، فیبر نوری شبکهٔ براگ را تشکیل می‌دهد. عامل اصلی در نامگذاری این حسگرها همان شبکه‌های توری‌مانند است که به شبکه‌های براگ معروف‌اند. اصول کلی کارکرد این دسته از حسگرها بدین صورت است که وقتی طبق شکل، یک طیف نوری با شکل کاملاً هموار وارد هستهٔ فیبر نوری می‌شود، پس از برخورد به شبکه‌های براگ، بخشی از آن منعکس شده و بخشی دیگر از شبکه‌های براگ رد می‌شود. حال اگر هیچ تغییری در فواصل بین شبکه‌های براگ به‌وجود نیاید، طیف نوری واردشده با طیف نور خروجی کاملاً یکسان خواهد بود، اما اگر مثلاً حسگر روی یک سازه نصب شود و در آن بخش از سازه کشش یا فشار به‌وجود بیاید، شبکه‌های براگ داخل هسته کشیده یا فشرده می‌شوند. لذا وقتی در این حالت طیف نوری به‌داخل هسته انتشار یابد، قطعاً طیف خروجی چیزی متفاوت از طیف ورودی خواهد بود و این هم به‌دلیل کشیده یا فشرده‌شدن شبکه‌های براگ است. در نهایت، همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، طیف ورودی کاملاً صاف و هموارد بوده، اما طیف خروجی در اثر عبور از شبکه‌های براگ، که فواصل مختلفی را در اثر کشش یا فشار نسبت به یکدیگر پیدا نموده‌اند، حالت تیزی و ناهمگونی دارد. با استفاده از این خاصیت می‌توان کرنش، دما و کمیت‌های وابستهٔ آنها را اندازه‌گیری کرد [۱].



شکل ۹. حسگر فیبر نوری بر پایهٔ تغییرات شدت نور [۱]



شکل ۱۰. حسگر فیبر نوری بر پایهٔ پلاریزاسیون



شکل ۱۱. حسگر فیبر نوری برپایهٔ شبکهٔ براگ [۹]

۳-۳. پایش سازه‌ها با روش‌های ارتعاشی

معمولاً تحلیل ارتعاشی سامانه‌ها به‌دلائل مختلفی انجام می‌شود. از این تحلیل در فریاند طراحی سامانه، بررسی عملکرد آن، پیش‌بینی آیندهٔ سامانه با توجه به شرایط حاکم و همچنین بهینه‌سازی، کنترل، کاهش و یا هدفمند نمودن ارتعاشات سامانه استفاده می‌شود.

از جمله جنبه‌های مهم دانش ارتعاشات، انجام تحلیل ارتعاشی یک سامانه به‌منظور تخمین عمر و عملکرد آن است. در این حالت با تحلیل ارتعاشی سامانه، محتوای فرکانسی و دامنهٔ ارتعاشات سامانه به‌دست آمده و اثر آن بر عملکرد سامانه در حال حاضر و تخمین آیندهٔ کاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این شاخه بیشتر عمر سامانه با توجه به ارتعاش و خستگی‌ای که در اثر آن به‌وجود می‌آید مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این منظر نیز یکی از زمینه‌های مورد علاقه در حوزهٔ دانش ارتعاشات است. یکی از جنبه‌های مطالعهٔ ارتعاشات، تحلیل ارتعاشات سامانه به‌منظور کنترل، کاهش یا هدفمندنمودن ارتعاشات آن است. گاهی سامانه‌ای از قبل طراحی و ساخته شده و در حال حاضر به‌دلائلی به کنترل یا کاهش ارتعاشات آن نیاز است. برای کاهش ارتعاشات یک سامانه لازم است تا ابتدا آن را به‌طور کامل شناخت و عوامل مؤثر بر ارتعاشات آن را مشخص کرد. سپس با توجه به این شناخت راهکاری مناسب برای کاهش ارتعاشات سامانه ارائه نمود [۳].

۳-۳-۱. طبقه‌بندی ارتعاشات در پایش سلامت سازه‌ها

همان‌گونه که پیشتر نیز بیان شد، پارامترهای مودال و نقش آنها در تعیین عمر سازه بسیار مهم‌اند. بنابراین استفاده از تحلیل ارتعاشی سامانه به‌منظور پایش رفتار سازهٔ در حال کارکرد و در حالت سکون نیز می‌تواند در تخمین عمر و پیش‌بینی رفتار سازه بسیار مفید باشد. اساساً اعمال آنالیز ارتعاشی سامانه در پایش سلامت سازه‌ها به دو روش کلی انجام می‌شود: آنالیز مودال و آنالیز سیگنال.

۳-۴. روش‌های مبتنی بر تحلیل مودال

پارامترهای مودال در یک سازه شامل فرکانس‌های طبیعی، شکل مود و نسبت میرایی می‌باشند. چون پارامترهای مودال نسبت به تغییرات در سازه حساس‌اند، می‌توان آنالیز مودال را یکی از روش‌های مبتنی بر ارتعاشات برای پایش سلامت سازه در نظر گرفت. از روش‌های به‌دست آوردن پارامترهای مودال مانند فرکانس‌های طبیعی، پاسخ فرکانسی و جز این‌ها برای یک سازهٔ پیچیده می‌توان از روش آنالیز مودال بهره گرفت. مشکلات استفاده از روش‌های عددی مانند روش رانگ کوتا[۲۵] این است که این روش پاسخ ارتعاشی سامانه را به‌صورت عددی حل می‌کند و جواب معادله به‌صورت کلی به‌دست می‌آید و اگر هرکدام از پارامترهای معادله تغییر کند، باید معادلات از ابتدا حل شوند. روش آنالیز مودال تا حدی این مشکل را برطرف کرده است. در روش آنالیز مودال، از معادلات ارتعاشی سامانه با اعمال تغییراتی، یک دستگاه معادله دیفرانسیل قطری به‌دست می‌آید که مقادیر ویژهٔ این دستگاه، همان فرکانس‌های طبیعی هستند. از مقایسهٔ فرکانس‌های حاصل با فرکانس‌های طبیعی سازهٔ سالم می‌توان عمر سازه را تشخیص داد [۱].

۳-۵. روش‌های مبتنی بر تحلیل سیگنال

بیشتر روش‌های تحلیل سیگنال دریافتی بر استفاده از تبدیل فوریه استوارند؛ روشی که هر سیگنال را به جمعی نامتناهی از توابع نمایی مختلط، که هر کدام فرکانس مختلفی دارند، تبدیل می‌کند. در حقیقت تبدیل فوریه یک سیگنال را از فضای زمانی (مکانی) به فضای فرکانسی می‌برد. بنابراین در این تبدیل امکان تشخیص زمان (مکان) که اتفاق خاصی افتاده وجود ندارد. به‌منظور اصلاح این نقص روشی به نام تبدیل فوریهٔ زمان کوتاه[۲۶] توسط دنیس گابور[۲۷] ارائه شده است. این روش پنجره‌ای پس از شکستن سیگنال به بخش‌های کوچک، روی آنها تبدیل فوریه انجام می‌دهد و بدین ترتیب سیگنال را به فضای دوبعدی زمان

(مکان) و فرکانس نگاشت می‌کند. این تبدیل نیز با توجه به اصل عدم قطعیت دارای مشکل دقت محدود اطلاعات زمان (مکان) و فرکانس است که به‌وسیلهٔ اندازهٔ پنجره تعیین می‌شود. اصل عدم قطعیت، به‌عنوان مثال در مورد سیگنال با متغیر زمان، بیان می‌کند که حاصل‌ضرب انحراف معیار زمان و فرکانس (یعنی وضوح زمانی و فرکانسی) مقدار محدودی دارد. در واقع وضوح زمان و فرکانس و همچنین کاهش یا افزایش آنها بر هم اثر می‌گذارد. بیان ریاضی این اصل به شکل رابطهٔ ۱ است:

$$\Delta\omega\,\Delta t \geq \frac{1}{2} \qquad (۱)$$

بنابراین چون در این روش اندازهٔ پنجرهٔ انتخابی برای تمام فرکانس‌ها یکسان است، دقت همزمان در زمان یا مکان و فرکانس نمی‌تواند حاصل شود. به‌منظور غلبه بر مشکل پنجره با اندازهٔ ثابت، تبدیل موجک[۲۸] به‌عنوان روش پنجره‌ای با سایز متغیر مطرح شده است که در نتیجهٔ آن توانایی تحلیل فرکانس‌های مختلف با وضوح مختلف فراهم شده است [۱].

۳-۵-۱. تبدیل موجک

تبدیل موجک نخستین‌بار توسط گراسمن[۲۹] و مورلت[۳۰] در اوائل دههٔ ۱۹۸۰ م به‌منظور نمایش زمان - فرکانس سیگنال ارائه شد. به‌طور کلی سیگنال تحت بررسی می‌تواند متغیری از زمان یا مکان باشد. تبدیل موجک به سه شکل مورد استفاده قرار می‌گیرد: تبدیل موجک پیوسته، تبدیل موجک گسسته و مجموعهٔ موجک. نوع اول به‌طور گسترده در تحلیل زمان - فرکانس مورد استفاده قرار می‌گیرد، حال آنکه نوع دوم برای مواردی چون رمزگذاری زیرشبکه و تحلیل سری‌های زمانی به‌کار می‌رود و نوع سوم می‌تواند تغییرات فرکانس را در یک سیگنال در طی زمان شناسایی نماید.

تبدیل موجک پیوسته تبدیلی است که تابعی پیوسته در زمان را به فضای زمان - فرکانس می‌برد. پایه‌های فضای جدید توابع موجک هستند. در ریاضیات تبدیل موجک پیوسته برای تابع پیوستهٔ $x(t)$، که مربع آن انتگرال‌پذیر باشد، در مقیاس $a>0$ و مکان $b\in R$ چنین تعریف می‌شود:

$$X_{\omega}(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{+\infty}x(t)\psi^{*}\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \qquad (۲)$$

که در آن $\psi(t)$ تابع پیوسته‌ای در زمان و در فرکانس است و با نام موجک مادر شناخته می‌شود. در تحلیل تابعی، تبدیل گسستهٔ موجک، تبدیلی است که توابع موجک آن نمونه‌برداری شده‌اند. ساده‌ترین و اولین تابع موجک گسسته، موجک هار[۳۱] است که توسط آلفرد هار[۳۲]، ریاضی‌دان برجستهٔ مجاری، معرفی شد.

به‌طور کلی مزیت تبدیل موجک در مقایسه با تبدیل فوریه و تبدیل فوریهٔ کوتاه‌مدت این است که این تبدیل قادر است بسیاری از جنبه‌های ناشناختهٔ اطلاعات را که دیگر روش‌های ذکرشده برای تحلیل سیگنال قادر به شناسایی آن نیستند، نمایان کند. تبدیل موجک به‌خصوص در ترک‌یابی بسیار مفید است و یک عیب آن تفکیک فرکانسی ضعیف در نواحی با فرکانس بالا نیز می‌باشد [۶].

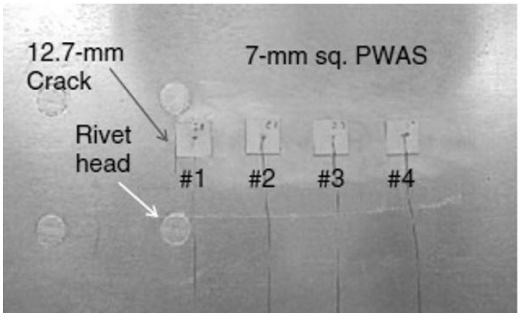
۳-۵-۲. پیزوالکتریسیته

در اثر خاصیت پیزوالکتریک[۳۳]، اعمال فشار به برخی از کریستال‌ها مانند کوارتز یا برخی سرامیک‌ها الکتریسیته تولید می‌شود. فشار یا تنش مکانیکی وارده به برخی کریستال‌ها سبب جابه‌جایی دوقطبی‌ها و پدیدآمدن میدان الکتریکی می‌شود. آرایش یون‌های مثبت و منفی تعیین‌کنندهٔ ایجاد یا عدم ایجاد اثر پیزوالکتریسیته است. به‌همین دلیل اثر پیزوالکتریسیته یا ایجاد جریان الکتریسیته القایی توسط اعمال فشار، در مواد کریستالی ناهمسانگرد رخ می‌دهد؛ یعنی در آن دسته از کریستال‌هایی که مرکز تقارن ندارند؛ زیرا در کریستال‌های متقارن هیچ ترکیبی از تنش‌های یکنواخت نمی‌تواند سبب جدایش بارهای الکتریکی شود. اگر ماده‌ای، مثلاً سرامیک، خاصیت پیزوالکتریک داشته باشد، وقتی تحت فشار قرار بگیرد در سطح آن بار

الکتریکی تولید می‌شود و یا وقتی در میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، تغییر شکل می‌دهد. میزان بار الکتریکی یا تغییر شکل مکانیکی به ترکیب ماده بستگی دارد. در ساختمان این سرامیک‌ها موادی چون اکسید سرب، تیتانیوم، زیرکونیوم و جز این‌ها وجود دارد. از این مواد، که فشار را به انرژی الکتریکی و انرژی الکتریکی را به انرژی حرکتی تبدیل می‌کنند، در مواردی چون مبدل‌های پیزوالکتریکی استفاده می‌شود [۵].

۳-۵-۳. حسگرهای فعال پیزوالکتریک[۳۴]

حسگرهای فعال پیزوالکتریک مبدل‌هایی ارزان‌اند که بر پایهٔ اصول پیزوالکتریک کار می‌کنند. در ابتدا این حسگرها جهت کنترل ارتعاشات استفاده می‌شدند. سنگ[۳۵] در سال ۱۹۹۰ م، لستر[۳۶] و لفبر[۳۷] در سال ۱۹۹۳ م طرح حسگرها و محرک‌های پیزوالکتریک را برای اندازه‌گیری و کنترل دینامیکی مدل نمودند. برای عیب‌یابی، بانکس[۳۸] و همکاران در سال ۱۹۹۶ م از این حسگرها برای تحریک سازه و حس‌کردن پاسخ آزاد حاصل از رفع عیب استفاده کردند. همچنین استفاده از حسگرهای فعال پیزوالکتریک، برای عیب‌یابی با استفاده از انتشار امواج لمب هدایت شده، توسط چانگ[۳۹] و همکارانش به‌طور گسترده دنبال شد. آنها استفاده از این حسگرها را برای ارسال و دریافت امواج الاستیک در مواد مرکب مطالعه نمودند. همان‌گونه که بیان شد، این حسگرها بسیار کوچک‌اند و فضای کمی را اشغال می‌کنند. در شکل ۱۲ نمونه‌ای از این حسگرها نمایش داده شده است.



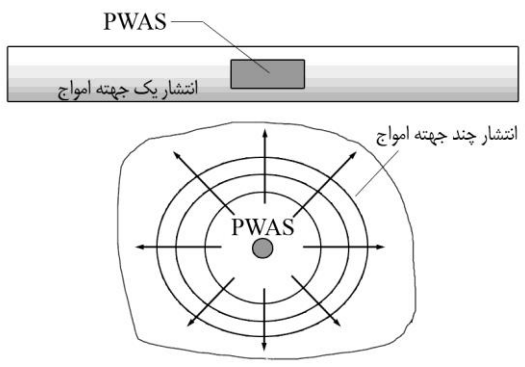
شکل ۱۲. نمونه ای از یک حسگر فعال پیزوالکتریک روی سازه

مطابق شکل، یک حسگر پیزوالکتریک، که به بدنهٔ سازه متصل است، ۷ میلی‌متر مربع مساحت، ۰/۲ میلی‌متر ضخامت و ۷۸ گرم وزن دارد. این حسگرها عملکردی بسیار بهتر از کرنش‌سنج‌های مقاومتی دارند؛ زیرا پایش سلامت سازه‌ها را به‌صورت لحظه‌ای و برخط انجام می‌دهند. حال آنکه کرنش‌سنج‌های مقاومتی ابزارهایی غیرفعال‌اند که تنها توانایی کنترل و اندازه‌گیری کرنش سازه‌ها را در همان لحظه دارند. به‌طور کلی حسگرهای فعال پیزوالکتریک بر سه اساس استوارند: انتشار امواج الاستیک، امپدانس اکوستیکی و تحلیل مودال [۱۰]. توضیح هر یک از روش‌های مذکور از حوصلهٔ این مقاله خارج است. در ادامه روش‌های ارزیابی غیرمخرب با استفاده از حسگرهای فعال پیزوالکتریک تشریح می‌شود.

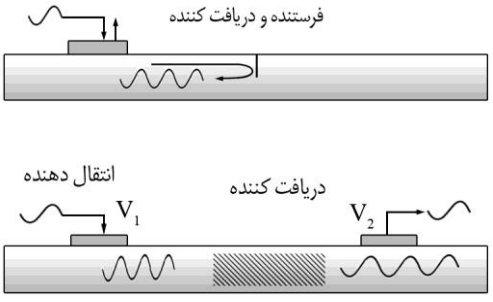
۳-۵-۴. مبدل‌های فراصوتی فعال پیزوالکتریک

برای کاربردهای بازرسی غیرمخرب، که حسگرهای آن در سازه‌ها جاسازی می‌شوند، می‌توان از حسگرهای فراصوتی PWAS استفاده کرد. این ادوات می‌توانند در هر دو نوع کاربرد، محرک و حسگر، استفاده شوند. استفاده از این ادوات به‌عنوان مبدل‌های پیزوالکتریک، کاربری بسیار متفاوتی را نسبت به مبدل‌های مرسوم فراصوتی دارد. مبدل‌های پیشین فراصوتی از طریق ایجاد ضربات آهسته و اعمال فشار ارتعاشی به قطعه امواج را منتقل می‌کنند، حال آنکه پیزوالکتریک‌ها از طریق اعمال فشار و ایجاد کرنش در سازه، امواج را ارسال می‌نمایند. این خاصیت، PWAS را قادر می‌سازد تا بازده بهتری را در انتقال و دریافت امواج لمب و ریلی نسبت به مبدل‌های پیشین داشته باشد. PWAS های مستطیلی با نسبت طول به عرض بالا می‌توانند امواج را به‌صورت یک‌جهته ارسال کنند، اما PWASهای دایروی قادرند امواج چندجهته را که در جبههٔ موج دایروی انتشار می‌یابند، تحریک کنند. در شکل ۱۳ انتشار امواج یک‌جهته و چندجهته نمایش داده شده است. دو روش کلی برای کاربرد حسگرهای فعال پیزوالکتریک،

شامل روش انعکاس امواج[40] و روش انتقال - دریافت[41] می‌باشد. در روش نخست، موج فراصوتی توسط مبدل فعال پیزوالکتریک ارسال می‌شود و پس از برخورد به عیب مورد نظر مانند ترک، انعکاس پیدا می‌کند و نهایتاً توسط همان مبدل که موج را ارسال کرده بود دریافت می‌شود. به‌دلیل فعال‌بودن مبدل پیزوالکتریک، این چرخه دائماً در حال انجام است. این حالت در مبدل‌های معمولی فراصوتی امکان‌پذیر نیست. در حالت دوم، امواج توسط یک مبدل به‌داخل قطعه ارسال و پس از برخورد با عیب، توسط یک مبدل دیگر دریافت می‌شود. در واقع یک مبدل به‌عنوان فرستنده و دیگری به‌عنوان دریافت‌کننده عمل می‌کند. در شکل ۱۴ نمایی شماتیک از نحوهٔ انتشار امواج فراصوت با استفاده از روش‌های انعکاس امواج و انتقال دریافت نمایش داده شده است [۱۰].



شکل ۱۳. نمایی از نحوهٔ انتشار امواج یک‌جهته و چندجهته [۱۰]



شکل ۱۴. نحوهٔ انتشار امواج در روش انعکاس امواج و انتقال دریافت [۹]

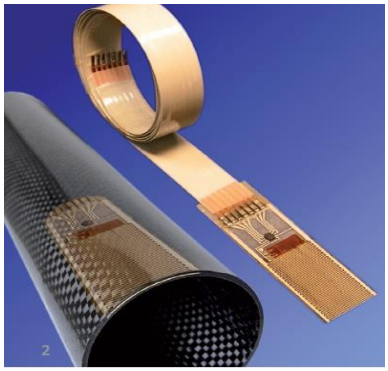
۴. مقایسه و کاربرد روش‌ها

در شکل‌های ۱۵ تا ۱۹ برخی از موارد کاربرد روش‌های پایش سلامت سازه‌ها نمایش داده شده است. در میان این روش‌ها، برخی در مقالهٔ حاضر تشریح و برخی دیگر تنها در قاب تصویر نمایش داده شده است. در این شکل‌ها، نمونه‌ای از کاربردهای تصویربرداری حرارتی[42] به‌همراه روش‌های آن مشاهده می‌شود. در شکل ۱۵ یک باریکهٔ پیزوالکتریک فعال، که قابلیت جاسازی در سازه را دارد، نمایش داده شده است. هدف از انجام این کار اطلاع از وضعیت دقیق سازه در طول کارکرد آن است. در شکل ۱۶ اما روش عکس‌برداری حرارتی نمایش داده شده است؛ به‌کمک این روش می‌توان نقاط تحت بارگذاری سازه که به‌واسطهٔ هندسه دچار تمرکز تنش شده‌اند، شناسایی نمود. همچنین در شکل ۱۷ صفحه‌ای آلومینیومی نمایش داده شده که روی آن چند حسگر فعال پیزوالکتریک جانمایی شده است. همان‌طور که در بخش‌های پیشین تشریح شد، این حسگرها وضعیت دقیقی را در حین کارکرد سازه به‌طور برخط مشخص می‌کنند. در شکل ۱۸ حالتی مشابه شکل ۱۷ نمایش داده شده است. به‌طور کلی هرگاه به پایش برخط رفتار سازه نیاز باشد، حسگرهای فعال پیزوالکتریک نامزد خوبی برای این منظورند. در شکل ۱۹ نیز حسگرهای پیزوالکتریک نصب‌شده روی نمونه‌ای از خطوط لولهٔ صنایع اتمی نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این حسگرها به‌همراه سیستم‌های محرک و تحلیلگرهای پاسخ سیستم برای آزمایش لوله‌ها به‌کار رفته‌اند.

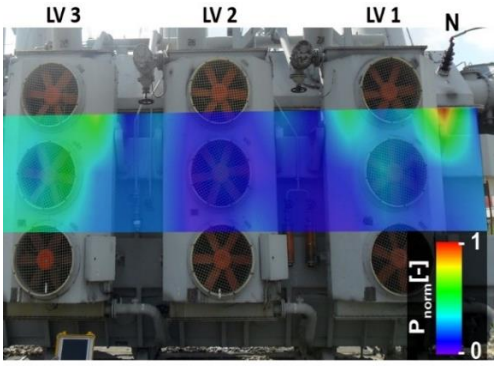
۵. جمع‌بندی

در این مقاله کلیات، اصول و کاربرد سیستم‌های پایش سلامت سازه به‌اجمال مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

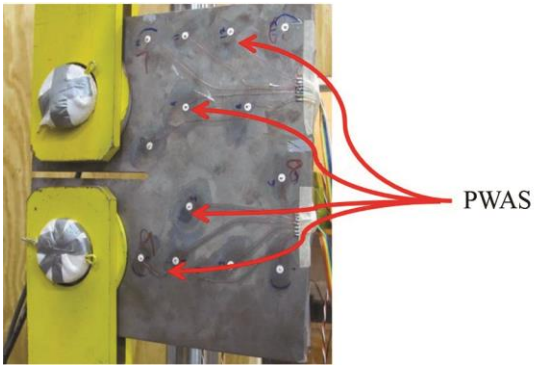
چنانچه هدف، بررسی تمامی روش‌های پایش سلامت سازه‌ها باشد، نتیجهٔ کار حجم زیادی از مطالب خواهد بود. به‌طور کلی، روش‌های پایش سلامت سازه‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند که شامل رویکردهای مبتنی بر تشخیص و پیش‌بینی است. در این مقاله به‌دلیل حجم بالای مطالب در هر کدام از زمینه‌ها، تنها به بررسی روش فراصوتی از رویکرد تشخیص و سه روش حسگرهای فیبر نوری، حسگرهای پیزوالکتریک و روش‌های مبتنی بر ارتعاشات از رویکرد پیش‌بینی پرداخته شد. برای این منظور، نخست سیستم‌های پایش سلامت سازه و لزوم اهمیت آنها معرفی شد و سپس اصول و کاربرد هر یک از روش‌ها تشریح شد. این مقاله تنها بخشی از روش‌های پایش سلامت سازه و کاربردهای آنها را شرح داد و تنها هدف آن آشنایی خوانندگان با این مقوله بود.



شکل ۱۵. حسگرهای فعال پیزوالکتریک جانمایی‌شده روی سازه [۲]

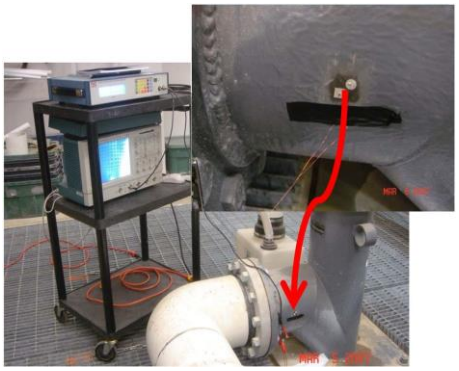


شکل ۱۶. تصویربرداری حرارتی با هدف تشخیص نقاط تمرکز تنش [۳]



شکل ۱۷. حسگرهای فعال پیزوالکتریک جانمایی‌شده روی سازه [۲]

شکل ۱۸. حسگر پیزوالکتریک قرارداده شده روی سازه [۲]



شکل ۱۹. حسگر پیزوالکتریک روی خطوط لولهٔ صنایع انرژی اتمی [۲]

۶. مآخذ

[1] Balageas, Daniel, *Structural Health Monitorig*, ISTE Ltd, 2006.

[2] Laboratory for Active materials and Smart Structures, Victor Giurgiutiu, University of South Carolina.

[3] Encyclopedia of Structural Health Monitoring.

[4] Inaudi, Daniele, *Fiber Optic Methods for Structural Health Monitoring*, John Wiley & Sons, 2007.

[5] Steinem, C., *Piezoelectric Sensors*, Sprlinger, 2006.

[6] Debnath, Lokenath, *Wavelet Transform and Time - Frequency Signal Analysis*, Springer, 2001.

[7] Achenbach, J. D., *Wave Propagation in Elastic Solids*, University of Illinois, North Holland Publishing.1973.

[۸] مجموعه منابع تخصصی مهندسی جوش، مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران، مجموعهٔ چهارم، جلد هفتم، آزمون‌های غیرمخرب.

[9] Hill, K.O., Y. Fujii, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki. "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication." *Appl. Phys. Lett.* 32 (10), 1978, p. 647.

[10] Giurgiutiu, Victor, *Structural Health Monitoring With Piezoelectric Wafer Active Sensors*, 2008.

پی‌نوشت

۱. structural health monitoring (SHM)

2. piezoelectric sensor

۳. modal analysis

۴. fiber optic sensors

۵. intelligent materials

۶. online

۷. failure

۸. collapse

۹. resonance

۱۰. شرکت هواپیمایی آلوها (Aloha Airlines) یک شرکت امریکایی است که در تاریخ ۲۶ ژولای ۱۹۴۶ آغاز به‌کار کرد. این شرکت هواپیمایی در ۳۱ مارس ۲۰۰۸ منحل شده است [ویراستار].

۱۱. diagnosis

۱۲. prognosis

۱۳. هر نوع ذرهٔ غیرفلزی محبوس‌شده در فلز جوش (ذرات سربارهٔ محبوس‌شده) را اصطلاحاً آخال (Inclusion) می‌نامند.

۱۴. dispersion

۱۵. کوپلنت (Couplaut) ماده‌ای است معمولاً مایع که فرایند انتقال انرژی فراصوتی از مبدل به قطعهٔ مورد آزمون را تسهیل می‌کند. اساساً وجود کوپلنت برای انجام چنین تست‌هایی لازم است؛ زیرا عدم مطابقت مقاومت صوتی بین هوا و جامدات (مثلاً بین هوا و قطعهٔ مورد آزمون) زیاد است، لذا تقریباً همهٔ انرژی به مبدل بازگردانده می‌شود و میزان اندکی از آن به مادهٔ مورد آزمون وارد می‌شود. کوپلنت جایگزین هوا می‌شود و امکان ورود انرژی صوتی بیشتری به قطعهٔ مورد آزمون را فراهم می‌کند، به‌طوری‌که سیگنال فراصوتی قابل استفاده‌ای به‌دست می‌آید. به‌طور کلی در آزمون‌های فراصوتی تماسی لایه‌ای نازک از روغن، گلیسیرین یا آب بین سطح و مبدل قرار داده می‌شود [ویراستار].

۱۶. phase array

۱۷. AScan

۱۸. BScan

۱۹. CScan

۲۰. longitudinal

۲۱. shear waves

۲۲. Bulk waves

۲۳. surface waves

24. intelligent structures

۲۵. Runge–Kutta method

۲۶. short time Fourier transform

۲۷. دنیس گابور (Dennis Gabor)، مهندس و مخترع شهیر مجارستانی، در پنجم ژوئن ۱۹۰۰ در بوداپست مجارستان دیده به جهان گشود. عمدهٔ

شهرت وی به‌سبب اختراع هولوگرافی است؛ موضوعی که در سال ۱۹۷۱ م، به بهانهٔ آن مفتخر به دریافت جایزهٔ نوبل فیزیک شد. گابور در انگلستان به کار و فعالیت اشتغال داشت. او اساس نظریهٔ عکس سه‌بعدی را در دههٔ ۱۹۴۰ م ارائه داد، این در حالی است که عکاسی سه‌بعدی مدت‌ها بعد، پس از اختراع لیزر در آغاز دههٔ ۱۹۶۰ م عملی شد. نور بسیار قوی لیزر این امکان را فراهم آورد که هولوگرام‌ها یا عکس‌های سه‌بعدی با کیفیتی بسیار بالا ساخته شوند. دنیس گابور در هشتم فوریهٔ ۱۹۷۹ در لندن دیده از جهان فروبست [ویراستار].

۲۸. Wavelet transform

۲۹. Alexander Grossmann (1930 -)

۳۰. Jean Morlet (1931 – 2007)

۳۱. Haar wavelet

۳۲. آلفرد هار (Alfréd Haar) ریاضی‌دان شهیر مجاری است که موجک هار، تبدیل هار واندازهٔ هار به نام او نامیده شده‌اند [ویراستار].

۳۳. پیزوالکتریک یا اثر فشاربرقی اصطلاحاً به ویژگی خاصی اطلاق می‌شود که در پاره‌ای از مواد بلورین، سرامیک‌های خاص و زیست‌موادی چون استخوان، رشته‌های دی. ان. ای. و پروتئین‌های گوناگون وجود دارد. براساس این خاصیت، این گروه از مواد در برابر تنش مکانیکی، بار الکتریکی تولید می‌کنند. در واقع، واژهٔ پیزوالکتریک به‌مفهوم تولید جریان الکتریسیته در اثر اعمال نیروی مکانیکی است. این واژه برآمده از لغت یونانی پیزو یا پیـزن به‌معنـای فشردن یا فشاردادن و الکتریک یا الکترون، که در روزگاران گذشته برای کهربا به‌کار می‌رفته است، می‌باشد. خاصیت پیزوالکتریک، در سال ۱۸۸۰ م، توسط ژاکوب کوری، فیزیک‌دان برجستهٔ فرانسوی و استاد رشتهٔ کانی‌شناسی دانشگاه مونپلیه، و پیئر کوری، فیزیک‌دان شهیر فرانسوی، برندهٔ جایزهٔ نوبل فیزیک در سال ۱۹۰۳ م و پیشگام در عرصه‌هایی چون بلورشناسی، مغناطیس و واپاشی هسته‌ای، کشف و معرفی شد. در بسیاری از متون و مقالات علمی، اثر پیزوالکتریک به‌عنوان تبادل الکترومکانیک میان وضعیت الکتریکی و مکانیکی در مواد بلورین معرفی شده است. بدین صورت که رابطه‌ای برگشت‌پذیر میان این دو وجود دارد؛ یعنی در اثر اعمال نیروی مکانیکی به یک مادهٔ پیزوالکتریک، بار الکتریکی تولید می‌شود و یا در اثر تولید بار الکتریکی در آن، مادهٔ مورد نظر کشیده یا فشرده می‌شود [ویراستار].

۳۴. Piezoelectric Wafer Active Sensors

۳۵. C. I. Tseng

۳۶. Harold C. Lester

۳۷. Sylvie Lefebvre

۳۸. Banks

۳۹. Chang

۴۰. pulse echo

۴۱. pitch – catch

۴۲. thermal imaging