دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پیاده سازی الگوریتم‌های پردازش سیگنال برای کاربردهای پایش سلامت سازه‌ها

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق- گرایش الکترونیک

حسین زمانی حسین‌آبادی

اساتید راهنما

دکتر بهزاد نظری

دکتر رسول امیرفتاحی

۱۳۹۱

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی برق - گرایش الکترونیک آقای حسین زمانی حسین‌آبادی

با عنوان

پیاده‌سازی الگوریتم‌های پردازش سیگنال برای کاربردهای پایش سلامت سازه‌ها

در تاریخ ۹۱/۱۱/۳ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر بهزاد نظری
۲- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر رسول امیرفتاحی
۳- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر حمیدرضا میردامادی
۴- استاد داور	دکتر محمدرضا احمدزاده
۵- استاد داور	دکتر محمدصادق فاضل
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مسعود عمومی

اللَّهُمَّ مَالِکَ الْمُلْکِ تُؤْتِی الْمُلْکَ مَنْ تَشاءُ وَ تَنزِعُ الْمُلْکَ مِمَّنْ تَشاءُ وَ تُعِزُّ مَنْ تَشاءُ وَ تُذِلُّ مَنْ تَشاءُ بِیَدِکَ الْخَیرُ إِنَّکَ عَلی کلّ شیءٍ قَدِیرٌ ﴿﴾ تُولِجُ الَّیْلَ فی النَّهَارِ وَ تُولِجُ النَّهَارَ فی الَّیْلِ وَ تُخْرِجُ الْحَی مِنَ الْمَیِّتِ وَ تُخْرِجُ الْمَیِّتَ مِنَ الْحَی وَ تَرْزُقُ مَنْ تَشاءُ بِغَیرِ حِسابٍ ﴿﴾

سپاس می‌گویم خدای بزرگ را که کرم نمود و به من توانایی آموختن بخشید؛ تا قسمتی از عمر خویش را در این راه سپری کنم. هرچند می‌دانم که زبان کوتاه، در ستایش و سپاس آفریدگار ناتوان است.

به یقین، اگر نبودند افرادی که دانش خود را صمیمانه و بی دریغ بیاموزند، هرگز دانشی فرا نمی‌گرفتم. از این روی، از تمامی کسانی که در این راه نکته‌ای به من آموختند، چه اندک و چه بسیار، سپاسگزارم و دست تک تکشان را می‌بوسم؛ چرا که به درستی مرا بنده‌ی خویش کرده‌اند.

از استادان فرهیخته، دکتر بهزاد نظری و دکتر رسول امیرفتاحی که راهنمایی‌های ایشان در این پژوهش مرا در انجام آن یاری رساند، سپاسگزارم. همچنین قدردان تلاش‌های دکتر حمیدرضا میردامادی که استاد مشاور این پروژه بودند، می‌باشم و از ایشان ممنون و سپاسگزارم.

از تمامی استادان فرزانه و دوستان گرامی که در انجام این پژوهش، از آن‌ها کمکی گرفتم یا نکته‌ای آموختم از جمله دکتر سعید صدری، سید عبدالرحیم آتشی‌پور، امیررضا صدری، بهزاد میرمحبوب و محمدرضا حسینی تشکر می‌کنم. از همه‌ی کسانی نیز که در این راه مرا از دعای نیک خود بی بهره ننهادند، سپاسگزارم.

حسین زمانی حسین‌آبادی دی ماه ۱۳۹۱

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به مادرم که جوانی خود را وقف من کرد،

به همسرم که سختی‌های زندگیم نصیب او شد،

به برادر و خواهر مهربانم

و به پدرم که همیشه در قلب من جای دارد؛

و تقدیم به همه‌ی کسانی که رنج تحصیل من را کشیدند

و همه‌ی کسانی که چشم انتظار موفقیت و پیشرفت من بودند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱- معرفی ۲

۱-۲- روش‌های مختلف سلامت سنجی سازه‌ها ۴

۱-۳- امواج هدایت‌شده‌ی فراصوت ۶

۱-۴- استفاده از امواج هدایت شده در پایش سلامت سازه‌ها ۷

۱-۴-۱- اثر پیزوالکتریسیته و مواد پیزوالکتریک ۸

۱-۴-۲- پیاده‌سازی آزمایشگاهی یک سامانه‌ی پایش سلامت ساختاری با استفاده از امواج هدایت شده‌ی فراصوت ۱۰

۱-۵- مروری بر پژوهش‌های انجام شده ۱۱

۱-۶- هدف از پژوهش پیش رو ۱۳

۱-۷- چگونگی ساختار پایان‌نامه ۱۴

فصل دوم: پردازش سیگنال امواج هدایت شده

۲-۱- مراحل شناسایی آسیب به وسیله الگوریتم‌های پردازش سیگنال ۱۵

۲-۲- پیش‌پردازش سیگنال‌های امواج هدایت شده ۱۶

۲-۲-۱- حذف مقدار DC ۱۷

۲-۲-۲- میانگین گیری ۱۸

۲-۲-۳- حذف نویز ۱۸

۲-۲-۴- همپایه‌سازی ۱۹

۲-۲-۵- فشرده‌سازی ۱۹

۲-۳- پردازش سیگنال و استخراج مشخصه ۲۰

۲-۳-۱- تحلیل سیگنال در حوزه‌ی زمان ۲۲

۲-۳-۲- تحلیل سیگنال در حوزه‌ی فرکانس ۲۲

۲-۳-۳- تحلیل سیگنال در حوزه‌ی زمان- فرکانس ۲۳

۲-۳-۴- استفاده از تبدیل موجک در پردازش سیگنال‌های امواج هدایت شده ۲۶

۲-۳-۴-الف- تبدیل موجک پیوسته ۲۸

۲-۳-۴-ب- تبدیل موجک گسسته ۳۲
۲-۳-۴-پ- تبدیل موجک بسته‌ای ۳۶
۲-۴- بازشناسی الگو و هوشمندسازی سامانه‌ی شناسایی آسیب ۳۹
۲-۴-۱- شبکه عصبی مصنوعی ۴۰
۲-۴-۲- ماشین‌های بردار پشتیبان ۴۴
۲-۴-۲-الف- ماشین‌های بردار پشتیبان دو کلاسه ۴۶
۲-۴-۲-ب- ماشین‌های بردار پشتیبان چند کلاسه ۵۰
۲-۴-۳- شبکه‌های موجک ۵۱
۲-۴-۳-الف- ساختار شبکه موجک چند ورودی- چند خروجی ۵۳
۲-۴-۳-ب- ایجاد یک شبکه‌ی موجک رشته ثابت ۵۶

فصل سوم: تخمین ویژگی‌های آسیب با استفاده از الگوریتم‌های پردازش سیگنال

۳-۱- مطالعه‌ی موردی: شناسایی آسیب در تیر ضخیم فولادی ۶۴
۳-۲- نویز زدایی و فشرده‌سازی سیگنال‌های امواج هدایت شده ۶۷
۳-۲-۱- نویززدایی سیگنال‌های امواج هدایت شده با استفاده از تبدیل موجک گسسته ۶۷
۳-۲-۲- فشرده‌سازی سیگنال‌های امواج هدایت شده با استفاده از تبدیل موجک بسته‌ای ۷۳
۳-۳- طبقه‌بندی شدت آسیب در تیر ضخیم فولادی ۷۶
۳-۴- تعیین مکان و شدت آسیب در تیر ضخیم فولادی ۸۱

فصل چهارم: پیاده‌سازی سخت‌افزاری الگوریتم تعیین مکان آسیب در سازه

۴-۱- روش‌های به دست آوردن مکان آسیب در سازه‌ها ۹۱
۴-۲- روش کانولوشن برای محاسبه‌ی زمان پرواز ۹۳
۴-۳- پیاده‌سازی سخت‌افزاری روش کانولوشن به منظور تعیین مکان آسیب ۹۴

فصل پنجم: پیاده‌سازی سخت‌افزاری الگوریتم تعیین مکان آسیب در سازه

۵-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۹۹
۵-۲- پیشنهادها برای پژوهش‌های بعدی ۱۰۲

مراجع ۱۰۳

چکیده

با افزایش توجه به تعمیر و نگهداری در صنایع مختلف، پایش سلامت سازه‌ها با استفاده از روش پخش امواج هدایت‌شده‌ی فراصوت، در سال‌های اخیر از اهمیت بسیاری برخوردار گردیده است. سامانه‌های پایش سلامت سازه‌ها از جمله مهمترین وسیله‌ها برای ارزیابی و تضمین سلامت سازه‌ها و ساختمان‌های مختلف می‌باشند. پژوهش‌های فراوانی در سال‌های اخیر به منظور طراحی و توسعه‌ی کاربرد سامانه‌های پایش سلامت سازه‌ها به منظور شناسایی آسیب در سازه‌های مختلف مکانیکی، هوافضا و عمرانی صورت گرفته است. در این پایان‌نامه، پایش سلامت ساختاری سازه‌ها با استفاده از روش پخش امواج هدایت‌شده‌ی فراصوت، مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا روش پایش سلامت ساختاری سازه‌ها به عنوان یک روش به‌هنگام و مفید در موضوع تعمیر و نگهداری سازه‌ها معرفی شده و استفاده از امواج هدایت‌شده‌ی فراصوت برای پایش سلامتی سازه‌ها شرح داده شده است. سپس پردازش سیگنال، به عنوان مهم‌ترین قسمت در کارایی یک سامانه‌ی پایش سلامت سازه‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است. جنبه‌های مختلف پردازش سیگنال‌های امواج هدایت شده شامل عملیات مختلف پیش پردازش سیگنال‌ها، پردازش سیگنال‌ها و استخراج مشخصه‌های وابسته به آسیب از آن‌ها، بازشناسی الگو و هوشمندسازی فرایند شناسایی آسیب، به طور کامل بررسی شده‌اند. در ادامه، تعیین مکان و شدت آسیب در یک تیر ضخیم فولادی، به عنوان نمونه‌ای از کاربردهای پایش سلامت سازه‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است. به این صورت که با داشتن سیگنال‌های مختلف حاصل از شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای و آزمایش‌های عملی، تعیین مکان و شدت ترک ایجاد شده بر روی سازه، تحقیق شده است. برای این منظور، در پژوهش حاضر، الگوریتم‌های مختلفی به منظور انجام عملیات پردازشی بر روی سیگنال‌ها و تعیین ویژگی‌های آسیب، ارائه شده‌اند. ابتدا، نویز زدایی و فشرده‌سازی سیگنال‌های امواج هدایت شده با استفاده از تبدیل موجک گسسته و تبدیل موجک بسته‌ای، مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر انتخاب موجک‌های مختلف متعامد و متعامد دوسویه در کیفیت نویززدایی و فشرده‌سازی، تحقیق شده است. نتایج حاصل در این مرحله، نشان دهنده‌ی عملکرد بهتر موجک‌های متعامد دوسویه نسبت به موجک‌های متعامد، در نویززدایی و فشرده‌سازی سیگنال‌ها، می‌باشد. در ادامه، الگوریتمی به منظور طبقه‌بندی شدت آسیب در کاربردهای مختلف پایش سلامت سازه‌ها، با استفاده از برخی مشخصه‌های آماری کلی سیگنال‌ها، ارائه گردیده است. این الگوریتم بر مبنای تبدیل موجک بسته‌ای و ماشین‌های بردار پشتیبان معرفی شده و شدت آسیب موجود در سازه را به چندگروه: بدون آسیب، شدت کم، شدت متوسط و شدت زیاد تخمین می‌زند. در سیگنال‌های مربوط به شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، الگوریتم مورد نظر به خوبی شدت آسیب مربوط به هر سیگنال را تخمین می‌زند. کارایی الگوریتم، با مقایسه‌ی آن با چند الگوریتم مشابه تایید شده است. در ادامه‌ی پژوهش، به منظور تعیین دقیق مکان و شدت آسیب موجود در سازه، الگوریتمی بر مبنای تبدیل موجک پیوسته و شبکه‌های موجک رشته ثابت، ارائه گردیده است. این الگوریتم از مشخصه‌های آماری خاص سیگنال مانند زمان پرواز، دامنه و مساحت موج مربوط به آسیب، به عنوان مشخصه‌های وابسته به آسیب، استفاده می‌کند. نتایج حاصل از مقایسه‌ی الگوریتم ارائه شده با یک الگوریتم مشابه بر مبنای شبکه‌ی عصبی و دو الگوریتم موجود دیگر به نام‌های DDC و DDF، نشان دهنده‌ی دقت مطلوب الگوریتم ارائه شده برای تعیین مکان و شدت آسیب و برتری آن نسبت به روش‌های دیگر، می‌باشد. در انتهای پژوهش حاضر، از آنجا که یکی از ویژگی‌های اصلی روش پایش سلامت سازه‌ها، به‌هنگام بودن عملیات پردازشی در آن است، پیاده سازی سخت‌افزاری الگوریتم تعیین مکان آسیب به روش کانولوشن، که یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای تعیین مکان آسیب است، بر روی هسته‌ی پردازشی FPGA، صورت گرفته است. برای این منظور، سامانه‌ای در نرم‌افزار Active-HDL طراحی و کد مربوط به آن به زبان VHDL نوشته شده و شبیه‌سازی‌های مربوطه انجام گرفته است. دقت تعیین مکان آسیب در سخت‌افزار شبیه‌سازی شده در حد مطلوب قرار دارد.

کلمه‌های کلیدی: پایش سلامتی سازه‌ها، پخش امواج هدایت‌شده، شناسایی آسیب، پردازش سیگنال، تبدیل موجک، نویززدایی، فشرده‌سازی، شبکه‌های عصبی، ماشین‌های بردار پشتیبان، شبکه‌های موجک، پیاده‌سازی سخت‌افزاری، FPGA.

فصل اول

مقدمه

۱-۱ معرفی

با رشد فزاینده فناوری و افزایش سازه‌های عمرانی و مکانیکی در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، نفت، عمران، راه‌آهن و ... موضوع پایش سلامت ساختاری[1] سازه‌ها یا (SHM) از اهمیت بسیار زیادی در سالیان اخیر برخوردار گردیده است. یکی از مهمترین مسائل مورد توجه در این صنایع بالابردن ایمنی و کاهش هزینه تعمیرات سازه‌های مهندسی می‌باشد. سازه‌های مهندسی مختلف در هنگام به کارگیری تحت بارهای زیاد و فشارهای مختلفی قرار دارند که ممکن است باعث ایجاد آسیب در آن‌ها شود. فرسودگی سازه‌ها بر اثر مرور زمان، بوجود آمدن و رشد خراش‌ها و شکستگی‌ها در سازه و تاثیر ضربه‌هایی که به سازه وارد می‌شود، باعث می‌شوند که سازه‌های مهندسی از قبیل پل‌ها، ساختمان‌ها، تونل‌ها و سدها، هواپیما و ماهواره‌برها، اتومبیل و کشتی و قطارها، ماشین آلات کارخانجات صنعتی، دکل‌های نفتی و ... احتیاج به مراقبت و تعمیر پیدا کنند. هزینه‌های تعمیر و نگهداری از جمله هزینه‌های سنگین در صنایع مختلف می‌باشند. در کشور آمریکا سالانه ۲۰۰ میلیارد دلار صرف هزینه تعمیر و نگهداری تجهیزات در صنایع مختلف می‌گردد؛ همچنین حدود یک چهارم هزینه‌ها در صنایع هوایی این کشور مربوط به هزینه‌های تعمیر و نگهداری است [۱]. پایش سلامت ساختاری و کشف آسیب[2] در سازه‌ها، باعث پایش و ارزیابی به‌هنگام[3] عملکرد سازه و کشف آسیب‌های بوجود آمده بر روی آن در همان هنگام بروز آسیب می‌گردد. به این ترتیب پایش سلامت ساختاری باعث کاهش هزینه تعمیرات سازه و نیز افزایش قابلیت اطمینان و امنیت سازه می‌شود [۲].

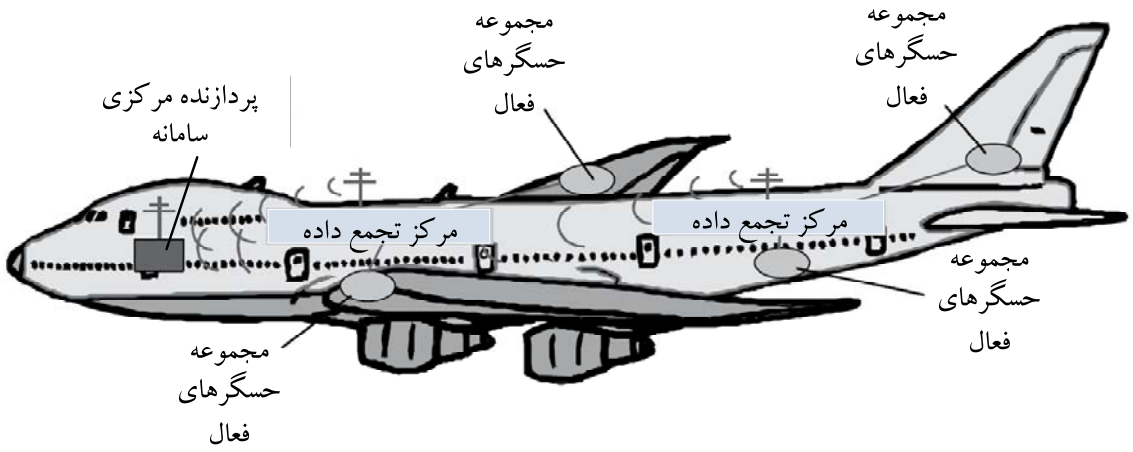
---

[1] Structural health monitoring (SHM)
[2] Damage detection
[3] On-line

به طور کلی هر سازه‌ای دارای ویژگی‌هایی است که در صورت به وجود آمدن آسیب در آن، این ویژگی‌ها تغییر می‌کنند. به این ترتیب می‌توان سلامتی و عملکرد سازه را با استفاده از این ویژگی‌ها و تغییرات آن‌ها در طول زمان مورد پایش و ارزیابی قرار داد. با این هدف سازه با استفاده از تجهیزات خاص نصب شده بر روی آن به طور دائمی مورد برانگیزش قرار گرفته و ویژگی‌هایی که نسبت به آسیب حساس هستند، به طور مدام مورد بررسی قرار می‌گیرند. در صورت بروز آسیب در سازه، این ویژگی‌ها تغییر کرده و با پردازش این ویژگی‌ها می‌توان به مشخصات آسیب بوجود آمده پی برد. این فرایند اصول پایش سلامت ساختاری سازه را تشکیل می‌دهد. به طور کلی یک سامانه پایش به‌هنگام سلامتی سازه‌ها که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد، باید اطلاعات زیر را در اختیار کاربر قرار دهد [۳]:

- بارهای عملیاتی و محیطی
- آسیب‌های ایجاد شده بر روی سازه و مشخصات آن‌ها از قبیل مکان و شدت آسیب
- رشد آسیب‌ها
- کارایی سازه در طی رشد آسیب و تخمین عمر مفید باقی‌مانده سازه

به عنوان نمونه یک سامانه پایش سلامت ساختاری برای هواپیما به صورت شماتیکی در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود یک سامانه پایش سلامت ساختاری سازه می‌تواند شامل اجزایی چون: حسگرهای[1] مختلف نصب شده بر روی سازه، تجهیزات مربوط به انتقال سیگنال‌های به دست آمده از حسگرها و پردازنده مرکزی سامانه باشد [۱]. این سامانه می‌تواند سلامتی قسمت‌های مختلف بدنه هواپیما را به صورت بلادرنگ مورد بررسی قرار دهد و ایجاد هرگونه آسیب در قسمت‌های مختلف را گزارش دهد. به این ترتیب قبل از این‌که این آسیب باعث بوجود آمدن خسارت‌های بسیار زیاد مالی و جانی شود، تعمیرات لازم صورت خواهد گرفت.



شکل ۱-۱- نمایی از یک سامانه پایش سلامت ساختاری بدنه هواپیما به صورت شماتیکی [۱].

[1] Sensor

به طور کلی موارد زیر را می‌توان از مزایای پیاده‌سازی یک سامانه صنعتی پایش سلامت هوشمند سازه‌ها دانست:

- بالا بردن ایمنی و قابلیت اطمینان سازه
- کاهش هزینه تعمیرات با تعمیر سازه در مراحل ابتدایی رشد آسیب
- کاهش هزینه تعمیرات با جایگزین کردن تعمیرات دفعه‌ای به جای تعمیرات دوره‌ای سازه
- عدم نیاز به جداسازی اجزای مختلف سازه در هنگام پایش سلامتی سازه

توسعه روش‌های عملی و صنعتی پایش سلامتی سازه‌ها برای دستیابی به یک سامانه پایش بلادرنگ ایده‌آل، با چالش‌های زیادی روبروست که برخی از آن‌ها عبارتند از: توسعه فناوری حسگرهای با دقت بسیار بالا، طراحی الگوریتم‌های دقیق و هوشمند پردازش سیگنال و شناسایی آسیب و توسعه سامانه‌های انتقال اطلاعات بدون سیم و توان پایین [۳]. علاوه بر این چالش‌ها، مشکلات دیگری نیز در طراحی و پیاده‌سازی یک سامانه پایش بلادرنگ سلامت سازه وجود دارند که زمینه‌های تحقیقاتی فراوانی را در این موضوع به وجود آورده است. عدم تشخیص آسیب، مخصوصا در مراحل اولیه رشد آسیب از جمله بارزترین این مشکلات است. در واقع در صورتی می‌توان آسیب را شناسایی کرد که تاثیر جدی در مشخصات سختی، جرم و یا اتلاف انرژی سازه بگذارد. درحالی که بیشتر آسیب‌ها، چندان بر پاسخ فراگیر و فرکانس پایین سازه‌ها تاثیری ندارند. علاوه بر این، در بیشتر موارد احتیاج است که فرایند شناسایی آسیب به صورت بدون ناظر[1] انجام پذیرد؛ یعنی سیگنال‌های مربوط به سازه آسیب دیده در اختیار نیستند و فقط سیگنال‌های مربوط به سازه سالم می‌توانند به عنوان معیاری برای آموزش سامانه مورد استفاده قرار گیرند. مشکل دیگر در پیاده‌سازی سامانه‌های پایش بلادرنگ سلامت سازه این است که ممکن است خود حسگرها نیز در شرایط مختلف کاری دچار آسیب شوند و عملکرد آن‌ها مختل شود [۴]. این چالش‌ها و مشکلات باعث شده تا موضوع پایش سلامت ساختاری سازه‌ها به یکی از زمینه‌های تحقیقاتی بسیار پرکاربرد و مهم تبدیل شود.

۱-۲ روش‌های مختلف سلامت سنجی سازه‌ها

روش‌های زیادی برای سلامت سنجی سازه‌ها و انجام معاینات بر روی آن‌ها وجود دارد. برخی از این روش‌ها عبارتند از [۳]:

- تحلیل مودال[2]

ویژگی‌های اساسی سازه‌ها را می‌توان در قالب ماتریس‌های جرم و سختی بیان کرد. این ماتریس‌ها در هنگام بروز آسیب تغییر کرده و این تغییرات سبب تغییر در بسامدهای طبیعی و شکل مودهای سازه می‌شوند. تحلیل مودال

[1] Unsupervised
[2] Modal analysis

بر مبنای تغییر در بسامدهای طبیعی سازه، شناسایی آسیب را انجام می‌دهد. در این روش ابتدا توسط ابزاری مانند چکش، یک برانگیزش در سازه ایجاد می‌کنند، سپس با استفاده از حسگرهای مخصوص بسامدهای طبیعی و شکل مودهای سازه آسیب دیده را تعیین می‌کنند. با استفاده از یک الگوریتم شناسایی آسیب، شدت و موقعیت آسیب تعیین می‌گردد. چالش‌های متعددی در این روش وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به عدم یافتن مدل دقیق سازه، عدم توانایی برانگیزش تمامی مودهای سازه و وجود میرایی، اشاره کرد. این روش بیشتر برای معاینات دوره‌ای مناسب بوده و برای پایش بلادرنگ و به‌هنگام سلامتی سازه چندان مناسب نمی‌باشد.

- آزمون فراصوت[1]

روش فراصوت نیز یکی از روش‌های پرکاربرد در زمینه آسیب شناسی سازه‌ها می‌باشد. در این روش در ابتدا توسط مبدل‌های دستی یا پروب[2] ، سازه توسط امواج فراصوت برانگیخته می‌شود. سپس این امواج در سراسر سازه منتشر شده و پس از برخورد با آسیب‌های مختلف موجود در سازه، دوباره توسط همان پروب دریافت می‌گردند. با پردازش سیگنال‌های دریافت شده و مقایسه سیگنال دریافتی با سیگنال فرستاده شده می‌توان به مشخصات آسیب‌های درون سازه پی برد. روش آزمون فراصوت نیز به منظور معاینات دوره‌ای سازه‌های مختلف بسیار مورد توجه و پرکاربرد است. اگرچه این روش نیز به دلیل بزرگ بودن تجهیزات آن و نیز نیاز به وجود یک محیط واسط بین پروب و سازه، برای استفاده در یک سامانه شناسایی آسیب بلادرنگ مناسب نمی‌باشد.

- پخش امواج آکوستیکی[3]

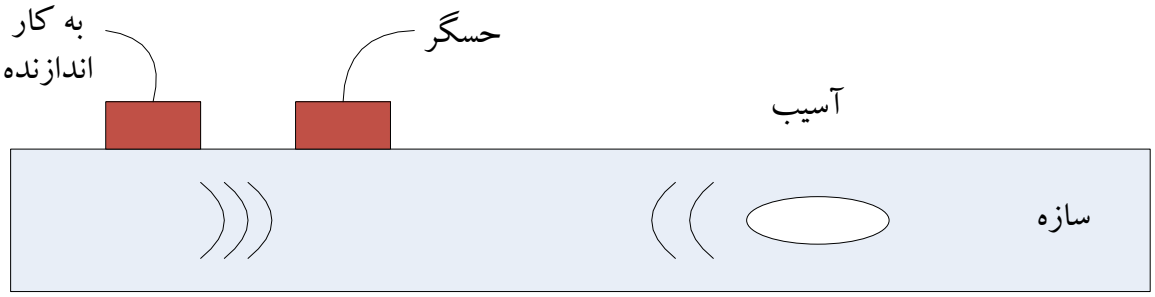
زمانی که یک سازه تحت بارگذاری مکانیکی قرار می‌گیرد، به کلیه آسیب‌های درون آن تنش وارد می‌گردد. با افزایش بار این تنش افزایش یافته و باعث منتشر شدن یک موج آکوستیکی در سرتاسر سازه می‌شود. با دریافت کردن این موج توسط حسگرهای مختلف در سرتاسر سازه و پردازش آن می‌توان به مشخصات آسیب درون سازه دست یافت. این روش نیازمند تحت بارگذاری قرار گرفتن سازه است که خود ممکن است باعث رشد آسیب گردد. بنابراین برای شناسایی بلادرنگ و به‌هنگام آسیب مناسب نیست. این روش نیز به منظور انجام معاینات دوره‌ای بر روی سازه‌ها کاربرد دارد.

- پخش امواج هدایت شده

در این روش ابتدا توسط یک فعال‌ساز[4] یک موج آکوستیک درون سازه منتشر می‌شود. پس از منتشر شدن در سراسر سازه و برخورد با آسیب‌های مختلف، این موج توسط یک یا چند حسگر، دریافت می‌شود. با پردازش سیگنال‌های دریافتی از حسگرها می‌توان به مشخصات آسیب‌های درون سازه پی برد. این روش در شکل ۱-۲ نشان

[1] Ultrasound
[2] Probe
[3] Acoustic waves
[4] Actuator

داده شده است. روش پخش امواج هدایت شده سازه را تحت هیچ گونه بار و فشاری قرار نمی‌دهد؛ از طرفی حسگرهای آن نیز بسیار کوچک و قابل نصب بر روی سازه به صورت دائمی هستند. این روش توانایی بسیار بالایی برای شناسایی آسیب‌ها را دارا می‌باشد و می‌تواند به صورت دائم و بلادرنگ فرایند شناسایی آسیب را انجام دهد. استفاده از امواج هدایت شده برای کاربردهای پایش سلامت ساختاری سازه‌ها در سال‌های اخیر مورد توجه بسیار پژوهشگران قرار گرفته و تحقیقات بسیار زیادی در این زمینه انجام شده است. در قسمت بعد اصول امواج هدایت شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

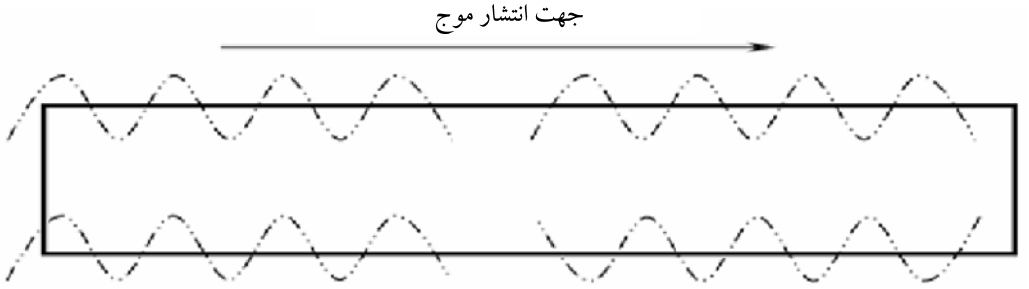


شکل ۱-۲- روش امواج هدایت شده برای شناسایی آسیب در سازه‌ها [۳].

۱-۳ امواج هدایت شده‌ی فراصوت[1]

امواج هدایت شده را می‌توان به عنوان امواج تنشی کشسان معرفی کرد که توسط مرزهای سازه به پیمودن مسیر معینی وادار می‌شوند [۵]. برای مثال هنگامی که یک تیر در فرکانس بالا برانگیخته می‌شود، امواج تنشی در تیر در طول محور آن و به سمت خارج از منبع برانگیزش مسیر مشخصی را می‌پیمایند. به عبارت دیگر، تیر در راستای ضخامت خود، امواج را در طول محور خود هدایت می‌کند. به همین شکل، دو سطح آزاد صفحه، امواج را در محدوده ضخامت صفحه هدایت می‌کنند [۴]. شکل ۱-۳ انتشار امواج هدایت شده را در یک صفحه نشان می‌دهد. از آنجایی که بسامد برانگیزش این امواج در گستره‌ای بالاتر از بسامد صوت است، به این امواج، امواج هدایت شده‌ی فراصوت گفته می‌شود. مطالعه بر روی این امواج اواخر قرن نوزدهم شروع شد. مهمترین این مطالعه‌ها را می‌توان پژوهش‌های ریلی[2]، لمب[3]، استونلی[4] و لاو[5] دانست؛ که هر یک از این پژوهش‌ها به پیدایش نوع خاصی از امواج هدایت شده انجامید[۳]. اکثر این امواج در نزدیکی سطح یا پوسته مواد جامد منتشر می‌شوند و هر یک کاربرد خاص مربوط به خود را دارا هستند.

[1] Guided ultrasonic waves (GUW)
[2] Rayleigh
[3] Lamb
[4] Stoneley
[5] Love



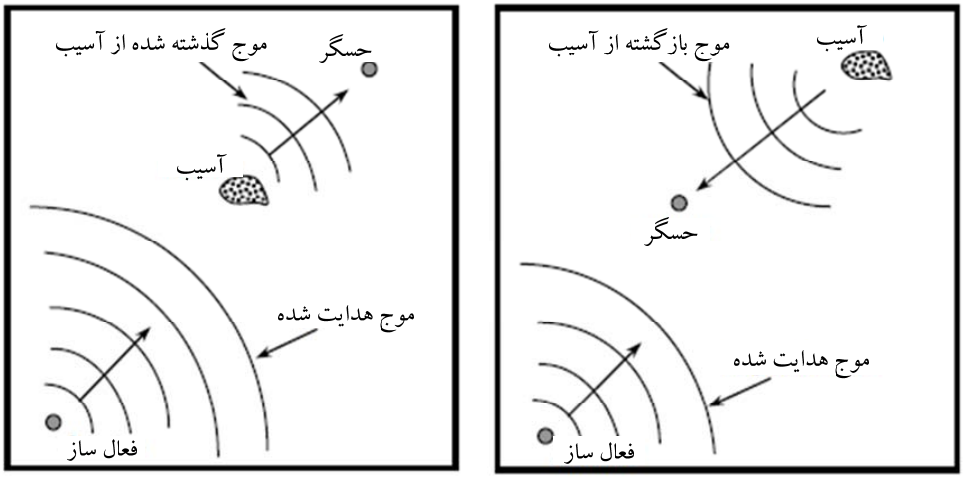
شکل ۱-۳- انتشار امواج هدایت شده در سازه [۶].

در پایش سلامتی ساختاری سازه‌ها توسط امواج هدایت شونده، همان گونه که در شکل ۱-۲ مشاهده می‌گردد، به یک فعال‌ساز جهت اعمال امواج هدایت شونده به سطح سازه نیاز می‌باشد. این فعال‌ساز سطح سازه را توسط یک سیگنال فرکانس بالا برانگیخته می‌کند. هنگامی که میدان امواج هدایت شونده با یک ناپیوستگی (که دارای اندازه قابل مقایسه با طول موج سیگنال برانگیزش است) در سازه برخورد کند، در تمام جهت‌ها پراکنده می‌گردد. ناپیوستگی می‌تواند مربوط به بروز شکستگی و یا ترک در سازه، جداشدن لایه‌های سازه، خوردگی در سازه و یا مرز سازه مربوط باشد. سیگنال پراکنده شده توسط حسگر که بر روی سازه نصب شده است، دریافت می‌گردد و با پردازش این سیگنال می‌توان به اطلاعات ناپیوستگی دست یافت [۴]. برای درک تفاوت بین آسیب و ساختار سازه، داشتن اطلاعات اولیه یا همان اطلاعات مربوط به سازه سالم لازم است. اطلاعات مربوط به سازه سالم از طریق پردازش سیگنال‌های به دست آمده از حالت سالم نمونه آزمایشگاهی و یا عملی به دست می‌آیند. در قسمت بعد اصول و چگونگی استفاده از امواج هدایت شده به منظور کاربردهای پایش سلامت ساختاری سازه‌ها توضیح داده می‌شود.

۱-٤ استفاده از امواج هدایت شده در پایش سلامت سازه‌ها

در سال‌های اخیر استفاده از امواج هدایت شده فراصوت به منظور کشف و شناسایی آسیب‌های مختلف در زمینه‌های مهدسی مکانیک، هوافضا، عمران و ... بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این تکنیک به منظور کشف وجود آسیب، شدت آسیب و محل آن در کاربردهای واقعی استفاده می‌شود [۶]. امواج هدایت شده به دلیل توانایی پخش در فواصل طولانی با میرایی کم، برای کاربردهای پایش سلامت ساختاری سازه‌ها بسیار مناسب می‌باشند [۳]. این امواج را می‌توان به راحتی در سازه فعال کرد و پاسخ سازه را بوسیله آرایه‌ای از سنسورها جمع‌آوری نمود. به منظور ایجاد یک سامانه پایش سلامتی سازه‌ها بر مبنای امواج هدایت شده فراصوت بر روی یک سازه، باید دو قسمت عمده طراحی و پیاده‌سازی شوند: پیاده‌سازی یک سامانه فعال الکترومکانیکی به منظور اخذ سیگنال‌های مورد نیاز از سازه و طراحی الگوریتم‌های پردازش سیگنال قوی برای اخذ اطلاعات مربوط به آسیب از سیگنال‌های به دست آمده [۱].

در روش پایش سلامتی سازه‌ها بوسیله امواج هدایت شده فراصوت، دو روش رایج در چگونگی چیدمان حسگر و فعال‌ساز وجود دارد. این دو روش عبارتند از: روش پالس- بازتاب[1] و روش فرستادن – دریافت[2]. این دو روش در شکل ۱-۴ نشان داده شده‌اند. در رویه پالس – بازتاب، حسگر و فعال‌ساز در یک طرف آسیب قرار دارند؛ پالس ارسال شده توسط فعال‌ساز در سازه منتشر شده، به آسیب و مرز سازه برخورد می‌کند و بازگشت آن در حسگر دریافت می‌شود. با داشتن اطلاعات مربوط به مرز سازه، می‌توان اطلاعات مربوط به آسیب را از درون سیگنال دریافت شده توسط حسگر به دست آورد. در روش فرستادن – دریافت، یک سیگنال توسط فعال‌ساز بر روی نمونه مورد بررسی فرستاده شده و حسگر در طرف دیگر نمونه، سیگنال فرستاده شده را دریافت می‌کند. با استفاده از مشخصه‌های سیگنال دریافت شده مانند تاخیر در زمان عبور، دامنه‌ها، محتوای فرکانسی و ... می‌توان اطلاعات مربوط به آسیب را به دست آورد [۶].



شکل ۱-۴- روش‌های چیدمان فعال‌ساز و حسگر بر روی سازه: (الف) روش پالس- بازتاب؛ (ب) روش فرستادن- دریافت [۶].

در پایش سلامتی ساختاری سازه‌ها به روش امواج هدایت شده فراصوت، فعال‌ساز و حسگر نقش بسیار مهمی دارا می‌باشند. با پیشرفت فناوری مواد پیزوالکتریک، پیشرفت‌های زیادی در تولید حسگرها و فعال‌سازهای مناسب برای کاربردهای پایش سلامت سازه‌ها، صورت گرفته است.

۱-٤-۱ اثر پیزوالکتریسیته و مواد پیزوالکتریک

پیشرفت‌های گسترده در زمینه پیزوالکتریسیته در سال‌های اخیر باعث تولید حسگرها و فعال‌سازهای بسیار مناسب برای کاربردهای پایش سلامت ساختاری سازه‌ها در صنایع مختلف گشته است. اثر پیزوالکتریسیته در ماده کریستال در طبیعت وجود دارد. این ماده دارای اثرات حسگری و فعال‌سازی است. به این ترتیب که با اعمال فشار به

[1] Pulse-echo
[2] Pitch-catch

دو طرف یک ماده پیزوالکتریک مانند کریستال، بار الکتریکی روی سطح آن القا می‌شود. به این اثر، اثر حسگری یا اثر مستقیم پیزوالکتریسیته می‌گویند. علاوه بر این، اگر دو طرف یک ماده پیزوالکتریک اختلاف پتانسیل الکتریکی اعمال شود، در ماده کرنش مکانیکی ایجاد می‌شود. به این اثر، اثر فعال‌سازی یا اثر معکوس پیزوالکتریسیته گویند. ویژگی برقراری ارتباط و تناظر بین میدان‌های الکتریکی و مکانیکی در مواد پیزوالکتریک، این قابلیت را به آن‌ها می‌دهد که هم به عنوان حسگر و هم به عنوان فعال‌ساز در کاربردهای پایش سلامت سازه‌ها به وسیله امواج هدایت شده فراصوت مورد استفاده قرار گیرند. از طرفی دیگر مواد پیزوالکتریک را می‌توان به سادگی روی سازه‌ها نصب کرد و حتی در برخی موارد پس از استفاده آن‌ها را از روی سطح جدا نمود. برخی از مواد پیزوالکتریک که در پایش سلامت سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارتند از [۳]:

- پیزوسرامیک‌ها:

سرامیک سرب- زیرکونات- تایتانات، معرف به PZT، پرکاربردترین نوع از مبدل‌های پیزوالکتریک می‌باشد. علی‌رغم ترد بودن، شکنندگی و عدم انعطاف پذیری بالای این نوع مواد پیزوالکتریک، به دلیل ابعاد کوچک، واکنش سریع، عملکرد مناسب و قابلیت نصب روی سطوح و لایه‌های درونی سازه‌ها، پیزوسرامیک‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته اند.

- پیزوپلیمرها:

پیزوپلیمرها دسته‌ای از مواد پلیمری هستند که رفتار پیزوالکتریکی از خود نشان می‌دهند. این مواد انعطاف‌پذیر و نرم هستند و معمولا به صورت یک لایه نازک ساخته می‌شوند. این مبدل‌ها بیشتر در صنایع نظامی و هوافضا کاربرد دارند.

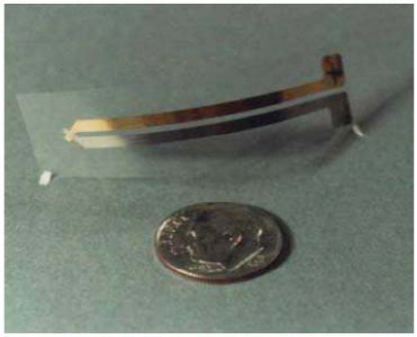
- پیزوکامپوزیت‌ها:

پیزوکامپوزیت‌ها با استفاده از ترکیب پودر پیزوسرامیک و رزین اپوکسی ساخته می‌شوند. این مواد از نظر خاصیت پیزوالکتریسیته یا برقراری ارتباط بین میدان‌های مکانیکی و الکتریکی، بهتر از پیزوسرامیک‌ها عمل می‌کنند. علاوه بر این، این مواد قابل انعطاف بوده و شکننده نیستند. قیمت تمام شده آن‌ها نیز کمتر از پیزوسرامیک‌ها می‌باشد.

- رنگ‌های پیزوالکتریک:

یکی از مبدل‌های پیزوکامپوزیتی که به تازگی بسیار مورد توجه قرار گرفته، رنگ‌های پیزوالکتریک است. این مواد از توزیع ذرات پودر PZT به صورت یکنواخت در یک زمینه پلیمری ساخته می‌شوند. رنگ‌های پیزوالکتریک فقط خاصیت حسگری دارند. این مواد مزایای فراوانی برای استفاده در کاربردهای پایش سلامتی سازه‌ها دارند. از جمله مزایای رنگ‌های پیزوالکتریک عبارتند از: توانایی اعمال بر روی سطوح غیر مسطح، عدم آسیب حسگرها، توانایی اعمال آن به صورت مستقیم بر روی هر سطح دلخواه، مناسب و به صرفه بودن برای سازه‌های بزرگ و

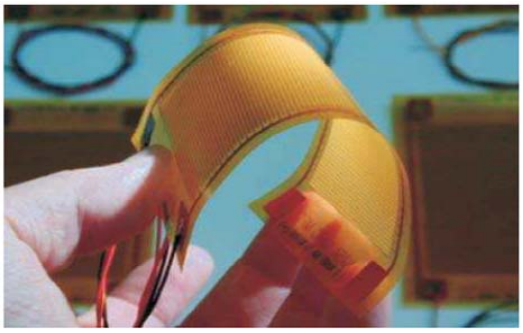
جاهایی که سایر تجهیزات پیزوالکتریک پرهزینه خواهند بود. در شکل ۱-۵ انواع مختلف حسگرهای پیزوالکتریک ساخته‌شده، نشان داده شده‌اند.



(ب)

(الف)

(د)



(ج)

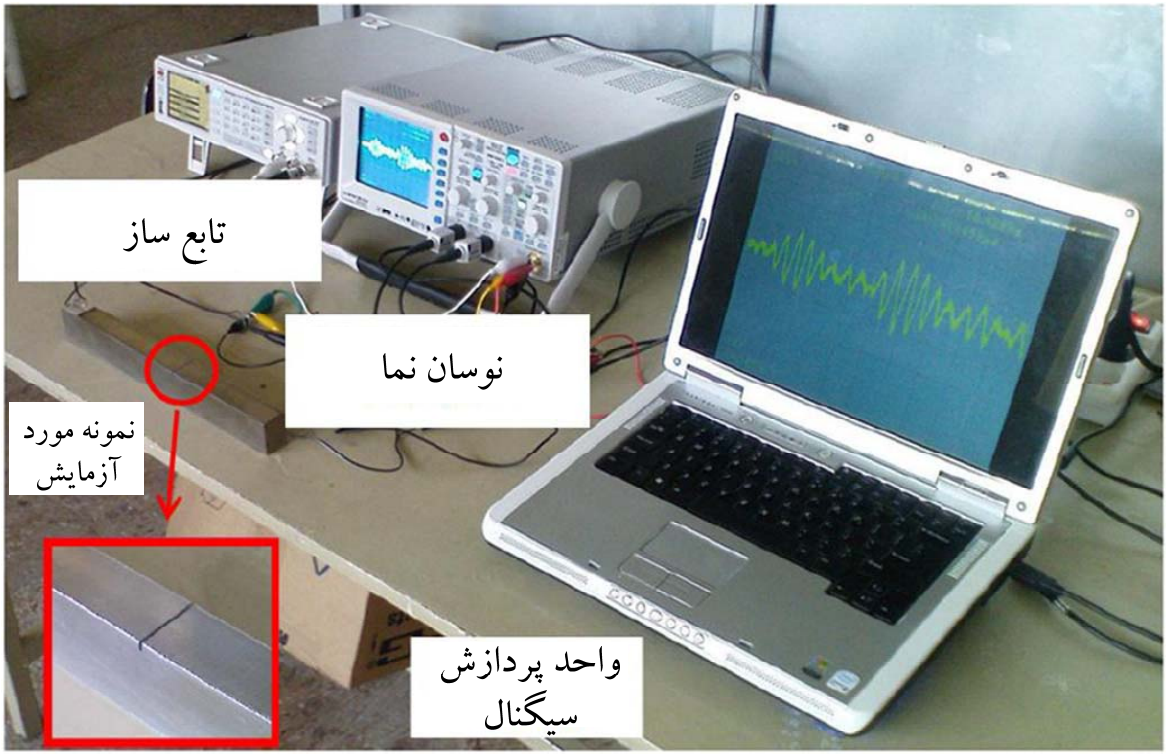
شکل ۱-۵- انواع مختلف حسگرهای پیزوالکتریک: (الف) چند نمونه پیزوسرامیک[۵]؛ (ب) یک نمونه مبدل پیزوپلیمر [۷]؛ (ج) یک نمونه مبدل پیزوکامپوزیت [۸]؛ (د) مبدل رنگ پیزوالکتریک [۹].

۱-٤-۲ پیاده‌سازی آزمایشگاهی یک سامانه‌ی پایش سلامت ساختاری با استفاده از امواج هدایت‌شده‌ی فراصوت

به منظور شناسایی آسیب بوسیله امواج هدایت شده فراصوت در محیط آزمایشگاهی به یک تابع‌ساز[1] برای ایجاد شکل موج تحریک، فعال‌ساز و حسگر به منظور ایجاد تحریک در سازه و دریافت سیگنال از سازه، نوسان‌نما[2] برای نشان دادن و ذخیره شکل موج خروجی و رایانه به منظور پردازش سیگنال به دست آمده و شناسایی مشخصات آسیب، احتیاج می‌باشد. در کاربردهای عملی و صنعتی معمولا باید به جای استفاده از تابع‌ساز و نوسان‌نما، از بوردهای الکترونیکی تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال و دیجیتال به آنالوگ یا A/D و D/A استفاده کرد. ضمن این‌که عملیات شناسایی آسیب باید به صورت هوشمند و خودکار صورت پذیرد بنابراین در اکثر موارد به جای استفاده از رایانه باید از پردازنده‌های محاسباتی برای انجام عملیات پردازش بلادرنگ سیگنال و شناسایی آسیب

[1] Function generator
[2] Oscilloscope

استفاده شود. یک نمونه چیدمان آزمایشگاهی سامانه پایش سلامتی سازه که در آزمایشگاه مواد هوشمند دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان، برقرار گردیده است، در شکل ۱-۶ نشان داده شده است.



شکل ۱-۶- یک نمونه چیدمان آزمایشگاهی سامانه پایش سلامت ساختاری سازه‌ها [۳].

۱-۵ مروری بر پژوهش‌های انجام شده

اگرچه پخش امواج کشسان به منظور شناسایی آسیب در سازه‌ها سابقه‌ای حدود ۱۰۰ ساله دارد [۳] ولی تحقیقات و مطالعات جدی در این زمینه به یکی دو دهه اخیر محدود می‌شود. در یک دهه گذشته تحقیقات زیادی در زمینه شناسایی آسیب در سازه‌های مختلف از جمله ساختارهای فلزی، کامپوزیتی، صفحه‌ها، تیرها، بدنه و بال هواپیما و ... صورت گرفته است. استاسفسکی در سال ۲۰۰۱ شناسایی آسیب در مواد کامپوزیتی را مورد تحقیق و بررسی قرار داد [۱۰]. سو و یه[۱۲،۱۱] و پورکار و پینس[۱۳] شناسایی آسیب و انحنا در مواد کامپوزیتی را توسط حسگرهای پیزوالکتریک مورد بررسی قرار دادند. لی و استاسفسکی انتشار امواج هدایت شده را در سازه‌های فلزی و در برخورد با آسیب‌های مختلف مدل‌سازی کردند [۱۴]. کریکرا و همکاران مکان‌یابی آسیب را بر روی سازه‌های فلزی و کامپوزیتی با استفاده از امواج هدایت شده بررسی کردند [۱۵]. پایش سلامتی لوله‌های فلزی و یک ساختار چهارستونه فلزی به ترتیب توسط احمد و کوندو [۱۶] و هان و همکاران [۱۷] بررسی شد. در تحقیقات جداگانه‌ای میشلز [۱۸]، لو و همکاران [۱۹] و یو و همکاران [۲۰] کشف، مکان‌یابی و تعیین مشخصات آسیب را در ورقه صفحه نازک مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. لی و همکاران انتشار و پخش امواج هدایت شده را در سازه‌های آلومینیومی