

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکاترونیک

طراحی و ساخت سامانه پایش سلامت سازه به روش امپدانس الکترومکانیکی غیرخطی

نگارنده: فرزانه نجفی راد

استاد راهنما

دکتر ناصرالدین سپهری

استاد مشاور

دکتر حمیدرضا امین داور

بهمن ۱۴۰۰

تهدیه:

مقدس ترین واژه‌های هستی:

روح مادر مهربانم، که زندگی‌ام را مدیون مهر و عطوفت آن می‌دانم.

پدر دلسوزم، که الفبای زندگی و چگونه زیستن را به من آموخت.

دو خواهر عزیزم، همراهان همیشگی که همواره مشوق و حامی من در طول زندگی بوده‌اند.

استادان فرهیخته و پرمایه‌ام، که از محضر پرفیض تدریسشان، بهره‌ها برده‌ام.

همه کسانی که به نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نموده‌اند.

شکر و قدردانی

سپاس خدایی را که به من این توفیق را عطا فرمود تا بتوانم قدمی در راه علم و دانش بردارم و به گردآوری اطلاعات مربوط به این تحقیق بپردازم.

به این وسیله مراتب سپاس خود را از تلاش و زحمات ارزشمند و صادقانه استاد راهنمای گرامی جناب دکتر ناصرالدین سپهری که همواره راهنما و راه گشای نگارنده در اتمام و اکمال این پایان نامه بوده‌اند، تقدیم می‌دارم.

از جناب دکتر حمیدرضا امین داور که استاد مشاور این پایان نامه بوده‌اند، کمال تشکر را دارم.

هم‌چنین از زحمات ارزشمند استادان گرامی در طول تحصیل تشکر و قدردانی می‌نمایم.

تعمیر نامه

اینجانب فرزانه نجفی راد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکترونیک دانشکده مکانیک و مکترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی و ساخت سامانه پایش سلامت سازه به روش امپدانس الکترومکانیکی غیر خطی تحت راهنمایی دکتر ناصرالدین سپهری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ: ۱۴۰۰/۱۱/۱۳

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

حکیده

پایش سلامت سازه حوزه‌ای است که به دلیل اهمیت و تأثیر قابل توجه آن بر افزایش ایمنی زندگی و مزایای اقتصادی، به‌طور گسترده مورد توجه بسیاری از مهندسين هوافضا، عمران و مکانیک قرار گرفته است. در بین روش‌های مختلف پیشنهادی در زمینه سلامت سازه، روش مبتنی بر امیدانس الکترومکانیکی ضمن ساده بودن در مرحله اجرا، نتایج قابل قبولی در شناسایی آسیب‌های سازه‌ای ارائه کرده است.

این روش تشخیص آسیب سازه را با بررسی پاسخ فرکانسی با استفاده از مبدل‌های پیزوالکتریک نصب شده بر روی سازه ممکن می‌سازد؛ که در آن مبدل به‌طور هم‌زمان به‌عنوان یک محرک و حسگر عمل می‌کند و با کاهش سیم‌کشی الکتریکی و تعداد مبدل‌ها، تشخیص آسیب را با سادگی اجرا تسهیل می‌کند.

علیرغم مزایای امیدوارکننده، محدودیت‌های قابل توجهی در شناسایی عیوب بسیار کوچک و در مراحل اولیه تشکیل آن در سازه وجود دارد، زیرا روش‌های ارائه شده تاکنون روش‌های خطی بودند که تنها می‌توانستند عیوب کوچک را در سازه تشخیص دهند. برای رفع محدودیت‌ها، این پایان‌نامه روش جدیدی ارائه کرده است که در آن استفاده از پایش سلامت سازه مبتنی بر روش الکترومکانیکی غیرخطی، آسیب‌های جزئی ایجاد شده در سازه را به‌طور مطمئن شناسایی کرده است. این امر با نصب یک مبدل پیزوالکتریک بر روی ورقه آلومینیومی به دست می‌آید؛ و شل شدن پیچ به‌عنوان آسیب محسوب می‌شود. به‌منظور تشخیص آسیب شل شدن پیچ، ولتاژی بین ۱۰ تا ۱۲۰ ولت در فرکانس‌های بالا تا حدود ۳۲ کیلوهرتز به سازه اعمال می‌شود و پاسخ فرکانس پیزوالکتریک با دو روش تغییر فرکانس و تشکیل هارمونیک در اطراف فرکانس تشدید مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

به‌منظور تشخیص شل شدن پیچ، پاسخ فرکانس پیزوالکتریک در حالت سالم و آسیب‌دیده مقایسه می‌شود. برای این منظور ولتاژهای ۱۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ ولت با فرکانس‌های بالا در بازه‌های مختلف از

حدود ۸.۵ تا ۳۲ کیلوهرتز به سازه اعمال می‌شود. با مقایسه نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که در روش خطی و ولتاژ ۱۰ ولت تغییری در پاسخ فرکانسی حالت سالم و آسیب دیده ایجاد نمی‌شود اما با افزایش ولتاژ و اعمال روش غیرخطی تغییر قابل توجهی در پاسخ فرکانسی وضعیت سالم و آسیب رخ می‌دهد. این تغییرات نشان دهنده آسیب به سازه است؛ و هر چه ولتاژ اعمال شده بیشتر باشد، تشخیص آسیب آسان تر است.

کلمات کلیدی:

پایش سلامت سازه، روش غیرخطی، روش امپدانس الکتریکی، مبدل پیزوالکتریک

فهرست مطالب

ت	فهرست جداول
ث	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ اهمیت پایش سلامت سازه
۵	۱-۲ تفاوت و مروری بر روشهای خطی و غیرخطی پایش سلامت سازه
۷	۱-۳ روش امپدانس الکترومکانیکی
۷	۱-۳-۱ پیزو الکتریک و مواد پیزوالکتریک در SHM
۱۱	۱-۳-۲ روش امپدانس الکترومکانیکی در SHM
۱۵	۱-۴ تئوری تماس
۱۶	۱-۵ اهداف پایان نامه
۱۹	فصل ۲: نتایج تئوری
۲۰	۲-۱ معادلات غیرخطی حاکم بر سیستم
۲۱	۲-۱-۱ شرایط تماس
۲۳	۲-۱-۲ معادله حرکت محدود
۲۵	۲-۱-۳ حل عددی
۲۷	۲-۲ روش حل معادلات
۲۹	۲-۳ نتایج تئوری
۳۳	فصل ۳: نتایج تجربی
۳۴	۳-۱ بستر آزمایشگاهی مورد استفاده

۳-۲ آمپلی فایر ۳۵

۳-۳ ترانسفورماتور فرکانس بالا ۳۹

۳-۳-۱ محاسبه ترانس فرکانس بالا ۴۱

۳-۴ نتایج پاسخ فرکانسی ترانس ۴۲

۳-۵ بررسی نتایج آزمایشگاهی روش خطی ۴۴

۳-۶ بررسی نتایج آزمایشگاهی روش غیرخطی ۴۶

۳-۶-۱ شیفت فرکانسی ۴۷

۳-۶-۲ ایجاد هارمونیک اطراف هارمونیک اصلی ۵۱

۵۳ فصل ۴: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۴-۱ نتیجه‌گیری ۵۴

۴-۲ پیشنهادات ۵۵

۵۷

منابع

فهرست جداول

جدول ۱-۲ مقادیر استفاده شده در معادله ۲۸

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ پاسخ فرکانسی محرک پیزوالکتریک در حال خطی و غیرخطی [۳۱] ۶
- شکل ۱-۲ پیزوالکتریک با ولتاژ تحریک [۴۰] ۹
- شکل ۱-۳ مدار اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی [۴۱] ۱۳
- شکل ۲-۱ سیستم جرم، فنر، دمپر دو درجه آزادی ۲۰
- شکل ۲-۲ پاسخ فرکانسی حالت سالم و معیوب در فرکانس 100Hz ۲۹
- شکل ۲-۳ بزرگ‌نمایی حالت سالم و معیوب در فرکانس 100Hz ۳۰
- شکل ۲-۴ پاسخ فرکانسی حالت سالم و معیوب در فرکانس 73.2Hz ۳۱
- شکل ۲-۵ بزرگ‌نمایی حالت سالم و معیوب در فرکانس 73.2Hz ۳۱
- شکل ۳-۱ تجهیزات آزمایشگاهی تشخیص عیب با روش امپدانس الکتریکی غیرخطی ۳۵
- شکل ۳-۲ مدار تقویت‌کننده قدرت ۳۷
- شکل ۳-۳ تقویت‌کننده قدرت استفاده‌شده ۳۸
- شکل ۳-۴ فانکشن ژنراتور B2012Hantek HDG ۴۲
- شکل ۳-۵ تجهیزات تست ترانسفورماتور ۴۳
- شکل ۳-۶ پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور در بازه 5-30 kHz و ولتاژ 70 ولت ۴۴
- شکل ۳-۷ پاسخ فرکانسی سازه سالم و معیوب در بازه 10.5-12.4kHz ۴۵
- شکل ۳-۸ پاسخ فرکانسی سازه سالم و معیوب در بازه 17-19kHz ۴۶
- شکل ۳-۹ پاسخ فرکانسی سازه در بازه 8.5-10.5kHz ۴۸
- شکل ۳-۱۰ بزرگ‌نمایی پاسخ فرکانسی در بازه 8.5-10.5kHz ۴۸
- شکل ۳-۱۱ پاسخ فرکانسی سازه در بازه 10.5-12.4kHz ۴۹
- شکل ۳-۱۲ بزرگ‌نمایی پاسخ فرکانسی در بازه 10.5-12.4kHz ۴۹

- شکل ۳-۱۳ پاسخ فرکانسی سازه در بازه 17.4-19kHz ۵۰
- شکل ۳-۱۴ بزرگ‌نمایی پاسخ فرکانسی در بازه فرکانسی 17.4-19kHz ۵۰
- شکل ۳-۱۵ پاسخ فرکانسی سازه سالم و معیوب در فرکانس 18kHz ۵۱
- شکل ۳-۱۶ پاسخ فرکانسی سازه سالم و معیوب در فرکانس 32kHz ۵۲
- شکل ۳-۱۷ پاسخ فرکانسی سازه سالم و معیوب در بازه 17-22kHz ۵۲

فصل ۱ : مقدمه

۱-۱ اهمیت پایش سلامت سازه

پایش سلامت سازه^۱، یک حوزه‌ی تحقیقاتی نوظهور با کاربردهای متعدد است که مورد توجه علاقه‌مندان علمی و فنی زیادی قرار گرفته است و دارای اهمیت بالایی در خلق رویکردهای نوآورانه و جدید می‌باشد. همچنین به‌عنوان فرایندی تعریف می‌شود که هدف آن به دست آوردن اطلاعات در مورد وضعیت و رفتار یک سازه در طول زمان است [1]. پایش سلامت سازه و روش‌های عیب‌یابی امکان شناسایی و ارزیابی زودهنگام آسیب یا تخریب اجزای حیاتی را در سازه‌های عمرانی، هوافضا و مهندسی مکانیک فراهم می‌کند. همچنین اقدامات اصلاحی را جهت عملکرد ایمن و اقتصادی اجزای یک سیستم ممکن می‌سازد. این اقدامات شامل اندازه‌گیری سیستم، استخراج ویژگی‌های مرتبط با آسیب ناشی از این اندازه‌گیری‌ها و تجزیه و تحلیل برای ارزیابی وضعیت سیستم است. مدیریت یکپارچه سلامت سازه به سازه‌های فعلی و آینده این امکان را می‌دهد که به‌طور ایمن و کارآمد در محیط‌های سخت کار کنند و نیازهای عملیاتی را برآورده کنند [2].

تعمیرات و نگهداری تجهیزات و تأسیسات حدوداً یک‌چهارم هزینه‌ی عملیاتی را تشکیل می‌دهند و افزایش هزینه‌های مرتبط تبدیل به یک نگرانی فزاینده شده است. از این‌رو، برای صرفه‌جویی در هزینه‌های غیرضروری می‌توان با جایگزینی تعمیر و نگهداری برنامه‌ریزی شده با تعمیر و نگهداری مورد نیاز در سیستم-های نظارت بر سلامت سازه کمک شایانی به این امر داشت [3]، [4]. با استفاده از سنسورها در سازه‌های جدید هم از مرحله‌ی هزینه‌ی چرخه عمر تا حد زیادی کسر می‌شود [5]. از مزیت‌های دیگر پیاده‌سازی سیستم‌های پایش سلامت سازه می‌توان به شناسایی محل آسیب، شناسایی خرابی‌هایی که با چشم قابل‌رؤیت نیستند و تعیین و تفکیک عامل ایجاد آسیب، اشاره کرد.

پایش سلامت سازه، تشخیص و شناسایی آسیب به یک سازه را تسهیل می‌کند که ممکن است به توانایی آن در انجام کامل و ایمن عملکرد موردنظر منجر شود [6]. به‌طور کلی تعریف آسیب در سیستم ساختاری و مکانیکی را می‌توان به‌عنوان تغییرات عمد یا غیر عمد در شرایط مرزی و اتصالات سیستم دانست که منجر به تأثیر منفی بر عملکرد فعلی یا آتی آن سیستم می‌شود [7]. به‌عنوان مثال ترکی که در یک قطعه‌ی مکانیکی ایجاد می‌شود، بسته به اندازه و محل ترک، اثرات نامطلوب این سیستم می‌تواند فوراً ایجاد شود یا ممکن است مدتی طول بکشد تا عملکرد سیستم را تغییر دهد [8].

فارار و وردن^۱ آسیب را به‌عنوان "تغییرات ایجادشده در یک سیستم که بر عملکرد فعلی یا آینده آن تأثیر منفی می‌گذارد" تعریف کردند. همچنین در تعریف آن‌ها از SHM به‌عنوان "مشاهده یک ساختار یا سیستم مکانیکی در طول زمان با استفاده از اندازه‌گیری‌های دوره‌ای، استخراج ویژگی‌های حساس به آسیب از این اندازه‌گیری‌ها و تجزیه و تحلیل آماری این ویژگی‌ها برای تعیین وضعیت فعلی سلامت سازه." اشاره شده است که بر اهمیت تجزیه و تحلیل ویژگی تأکید کردند [6]. هدف SHM شناسایی، مکان‌یابی و کمیت این تغییرات مانند ترک‌ها، اتصالات سست، خوردگی، سوراخ‌ها و لایه‌لایه شدن است و می‌تواند در انواع زیرساخت‌ها مانند ساختمان‌ها، راه‌آهن‌ها، آسیاب‌های بادی، پل‌ها و هواپیما اعمال شود [9]، تا در اولین فرصت ممکن بتوان اقدامات اصلاحی را برای به حداقل رساندن زمان خرابی، هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های تعمیر و نگهداری و کاهش خطر خرابی فاجعه‌بار، آسیب یا حتی از دست‌دادن جان انجام داد [10].

پایش سلامت سازه اطلاعاتی را در مورد وضعیت یک سازه از نظر قابلیت اطمینان و ایمنی، قبل از اینکه آسیب جدی آن سازه را تهدید کند، ارائه می‌دهد [11]، [12]. در الگوی SHM، پنج مرحله اصلی وجود دارد:

(۱) تشخیص آسیب در یک سازه

(۲) محلی سازی آسیب

۳) شناسایی آسیب

۴) تعیین کمیت شدت آسیب

۵) پیش‌بینی عمر مفید باقی‌مانده سازه [13].

پایش سلامت ساختاری را می‌توان با دو روش اصلی انجام داد: نظارت فعال و نظارت غیرفعال. نظارت غیرفعال عمدتاً با اندازه‌گیری پارامترهای عملیاتی مختلف و سپس استنباط وضعیت سلامت سازه از این پارامترها سروکار دارد، اما مستقیماً به اصل مسئله نمی‌پردازد، یعنی مستقیماً بررسی نمی‌کند که آیا ساختار آسیب‌دیده است یا خیر. در مقابل، نظارت فعال به ارزیابی مستقیم وضعیت سلامت سازه با تلاش برای تشخیص وجود و میزان آسیب سازه مربوط می‌شود. SHM فعال تلاش می‌کند حسگرهای تشخیص آسیب را ایجاد کند که می‌توانند به‌طور دائم بر روی ساختار و روش‌های نظارت نصب شوند. روش‌های نظارت فعال معمولی با پیزوالکتریک^۱ شامل موج هدایت‌شده^۲ و امپدانس الکترومکانیکی^۳ است [14].

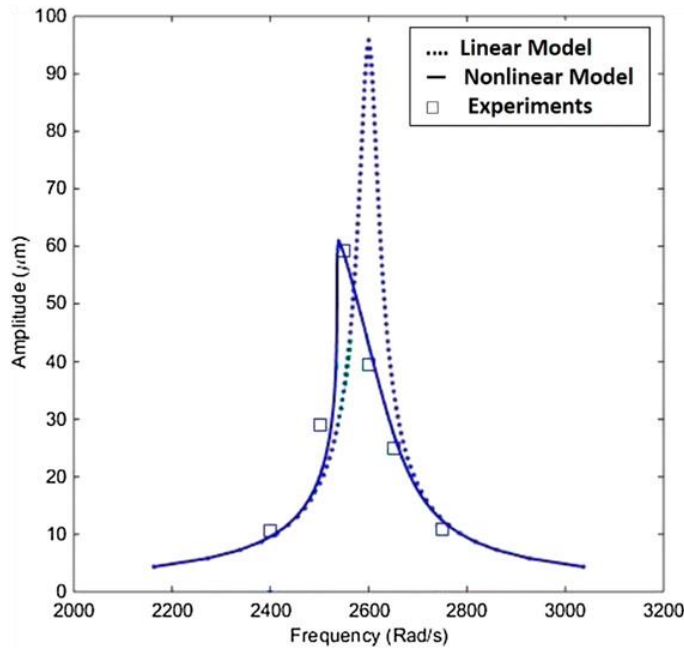
در طول دو دهه گذشته، فن‌آوری‌های مختلف سیستم SHM، از جمله نظارت غیرفعال و فعال، با استفاده از شبکه حسگر توزیع‌شده داخلی ادغام‌شده با ساختارهای فلزی و کامپوزیت هواپیما توسعه یافته‌اند. بسیاری از حسگرها را می‌توان برای پایش سلامت سازه استفاده کرد، مانند فیبرهای نوری، مواد پیزوالکتریک از جمله پیزوالکتریک سرب زیرکونات تیتانات^۴، نانو مواد، گالری‌های هوا/خلأ و حسگرهای فویل جریان گردابی. در میان انواع مختلف مبدل‌ها، مواد پیزوالکتریک به‌طور گسترده برای SHM استفاده می‌شوند [15]، زیرا می‌توانند هم به‌عنوان محرک و هم حسگر استفاده شوند. به‌طور معمول، شبکه حسگر پیزوالکتریک مورد استفاده برای پایش سلامت سازه به ساختار میزبان متصل می‌شود که پایش شود [16].

1- Piezoelectric
2- Guided Wave
3- Electro Mechanical Impedance
4 - Piezoelectric lead Zirconate Titanate

۱-۲ تفاوت و مروری بر روش‌های خطی و غیرخطی پایش سلامت سازه

پایش سلامت سازه می‌تواند سهم عمده‌ای در تشخیص و پیش‌آگهی ساختاری داشته باشد. شیوه‌های خطی و غیرخطی پایش سلامت سازه در سال‌های اخیر پیشرفت قابل توجهی داشته‌اند. معمولاً از روش‌های خطی برای توصیف رفتار الکترومکانیکی محرک‌های پیزوالکتریک استفاده شده است [20]–[17]. بنابراین، مدل‌سازی دینامیکی این محرک‌ها بسیار مهم است. برای این منظور، معادلات دینامیکی خطی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند که برای کاربردهای دامنه‌های تحریک کم و خطاهای بزرگ معتبر هستند [25]–[21]. اما با افزایش دامنه تحریک ورودی، رفتار غیرخطی در سازه بروز خواهد کرد. دامنه بالا یک رفتار غیرخطی بین ولتاژ ورودی و موقعیت محرک ایجاد می‌کند در نتیجه رفتار محرک دیگر با یک مدل خطی قابل پیش‌بینی نیست [26]. تاکنون تحقیقات مختلفی برای مدل‌سازی این پدیده ارائه شده است. در فرکانس‌های اطراف فرکانس‌های طبیعی، پدیده‌های تشدید باعث ایجاد کرنش‌های زیاد می‌شوند. [27]، [28].

برای درک بیشتر روش خطی و غیرخطی، شکل ۱-۱ تفاوت رفتار خطی و غیرخطی محرک پیزوالکتریک را نمایش می‌دهد که با افزایش ولتاژ تحریک پیزوالکتریک از حالت خطی خارج شده و رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود، به‌طور قابل توجهی اثربخشی دو روش پیشنهادی متفاوت هستند [29]، [30] این پایان‌نامه با الهام از تغییر رفتار پیزوالکتریک در دو حالت خطی و غیرخطی، از روش غیرخطی که روش دقیق‌تری می‌باشد برای تشخیص عیب‌های بسیار کوچک در سازه استفاده شده است.



شکل ۱-۱ پاسخ فرکانسی محرک پیزوالکتریک در حال خطی و غیرخطی [31]

هدف این مطالعه تشخیص عیوب بسیار ریز است که قبل از رخ دادن عواقب فاجعه‌بار شناسایی شوند. به‌عنوان مثال، در سال ۱۹۹۸ یک حادثه بسیار شدید راه‌آهن در آلمان رخ داد. پس از انجام تحقیقات علت این حادثه وجود ترک خستگی در یکی از چرخ‌های قطار و تشخیص ندادن آن گزارش داده شد که منجر به خروج قطار پرسرعت از ریل شد و حوادث ناگواری را رقم زد [32]، [33].

در این زمینه، روش‌های غیرخطی پایش سلامت ساختاری، به دلیل حساسیت بالاتر نسبت به تکنیک‌های خطی، برای تشخیص عیوب ریز برجسته شده‌اند [34]، [35]. استانتون و همکاران به‌طور جامع برداشت غیرخطی انرژی پرتوی کنسول پیزوالکتریک را بررسی کرده است و مدل دینامیکی را ارائه دادند که در آن با تشدید پرتو پیزوالکتریک در نزدیکی اولین فرکانس طبیعی آن، پارامترهای غیرخطی ناشناخته به دست آمد. به‌عنوان یک دستاورد مهم، گزارش شده است که مدل میرایی خطی قادر به توصیف رفتار یک پرتو کنسول پیزوالکتریک در فرکانس‌های بالا نیست [36].

در روش خطی، دامنه‌ی تحریک ورودی نهایتاً تا ۱۰ ولت قابل افزایش است که در این حالت هیچ‌گونه تغییری در پاسخ فرکانسی سازه ایجاد نمی‌شود، فقط در صورتی که عیب سازه بزرگ باشد باعث جابه‌جایی مکان فرکانس می‌شود ولی همچنان متقارن می‌باشد؛ اما با افزایش ولتاژ تحریک، مشاهده می‌شود که عامل

غیرخطی باعث از بین رفتن تقارن در فرکانس طبیعی می‌شود و هرچه دامنه بالاتر رود، حالت نامتقارن بیش‌تری تشکیل می‌شود و تعداد داده‌ها در یک فرکانس بیشتر می‌شود. در این حالت به اصطلاح، حالت Hat ایجاد می‌شود که گفته می‌شود پاسخ فرکانسی به شکل کلاه درمی‌آید.

۱-۳ روش امیدانس الکترومکانیکی

۱-۳-۱ پیزوالکتریک و مواد پیزوالکتریک در SHM

پیزوالکتریک در سال ۱۸۸۰ توسط دو برادر و دانشمند فرانسوی، ژاک کوری^۱ و پیر کوری^۲ زمانی که در حال مطالعه اثرات فشار بر تولید بار الکتریکی بر روی گروهی از کریستال‌ها مانند کوارتز، تورمالین و نمک روشل بودند، شناخته و کشف شد. آن‌ها دریافتند که این کریستال‌ها هنگامی که یک کرنش مکانیکی به آن‌ها اعمال می‌شود، بار الکتریکی تولید می‌کنند. این اثر بعدها به‌عنوان اثر پیزوالکتریک مستقیم^۳ شناخته شد.

اثر پیزوالکتریک معکوس^۴ بلافاصله توسط برادران کوری کشف شد که در آن تنش مکانیکی با اعمال میدان الکتریکی به سطوح بلور منجمد ایجاد می‌شود و باعث تغییر شکل و بی‌نظمی سطح آن می‌شود. در دهه ۱۹۵۰ سرب زیرکونات تیتانات، کشف شد که پس از آن به پرمصرف‌ترین پیزوسرامیک تبدیل شد. اثرات پیزوالکتریک مستقیم و معکوس را می‌توان با معادلات سازنده کلی ارائه‌شده توسط استاندارد

IEEE بیان کرد [37]:

$$S_k = d_{jk}^c E_j + S_{km}^E T_m \quad (1-1)$$

$$D_i = \varepsilon_{ij}^T E_j + d_{im}^d T_m \quad (1-2)$$

-
- 1- Jacques Currie
 - 2- Pierre Currie
 - 3- Direct Piezoelectric Effect
 - 4- Inverse Piezoelectric Effect

s_{km}^E : انطباق مکانیکی مواد، که در میدان الکتریکی صفر اندازه‌گیری می‌شود.

ε_{ij}^T : گذردهی دی‌الکتریک، که در تنش مکانیکی صفر اندازه‌گیری می‌شود.

d_{im}^d : جفت پیزوالکتریک بین متغیرهای الکتریکی و مکانیکی.

D: بردار جابجایی الکتریکی

S: تانسور کرنش مرتبه دوم

E: بردار میدان الکتریکی خارجی اعمال شده

T: تانسور تنش

معادله (۱-۲) اثر پیزوالکتریک مستقیم را منعکس می‌کند، در حالی که معادله (۱-۱) به اثر پیزوالکتریک

معکوس اشاره دارد. معادلات سازنده را می‌توان به صورت نماد ماتریس فشرده بازنویسی کرد:

$$\begin{bmatrix} D \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon^T & d_a \\ d_c & s^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ T \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

شکل ۱-۲، پیکربندی رایج صفحه پیزوالکتریک مستطیلی را برای معرفی اثر مستقیم نشان می‌دهد، جایی

که E میدان الکتریکی اعمال شده بر روی مبدل PZT است. مبدل PZT معمولاً به شکل متقارن ساخته

می‌شود؛ بنابراین، تانسور تنش را می‌توان به یک بردار 1×6 ساده کرد:

$$[T] = [T_{11}, T_{22}, T_{33}, T_{44}, T_{55}, T_{66}]^T$$

و همچنین تانسور کرنش:

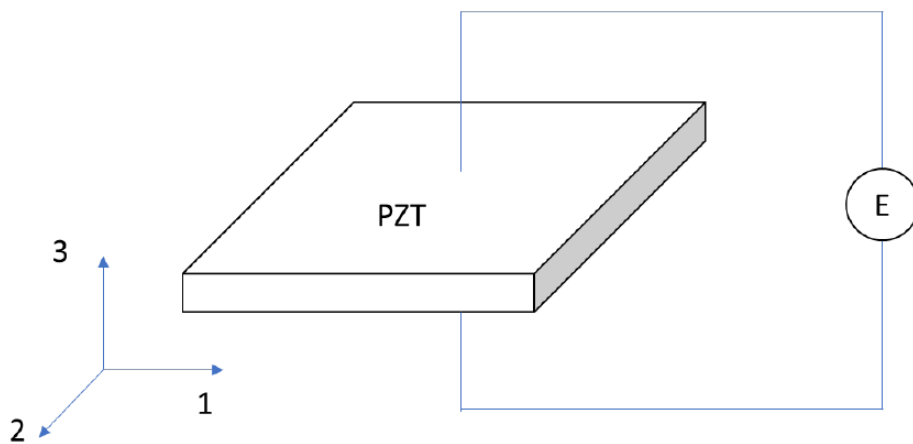
$$[S] = [S_{11}, S_{22}, S_{33}, S_{44}, S_{55}, S_{66}]^T$$

ماتریس ضریب کرنش پیزوالکتریک توسط ساختار کریستال تعیین می‌شود. برای یک مبدل PZT،

ماتریس $[d_c]$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$[d_c] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

در معادله (۴-۱)، ضرایب d_{31} ، d_{32} و d_{33} به ترتیب کرنش‌های حاصل را در صفحات ۳-۱، ۳-۲ و ۳-۳ برای میدان الکتریکی اعمال شده خارجی روی محور ۳ نشان می‌دهند. ضریب d_{24} کرنش برشی در صفحه ۲-۳ تحت میدان الکتریکی اعمال شده E_2 ضریب d_{15} کرنش برشی در صفحه ۳-۱ را به میدان الکتریکی E_1 مرتبط می‌کند. کومار^۱ اشاره کرد که قابلیت سنجش یک مبدل PZT به‌طور قابل‌توجهی با ضرایب d_{31} و d_{33} مرتبط است و مقادیر عددی آن‌ها باید حداکثر شود درحالی‌که ضریب تلفات مکانیکی ϵ_{33} باید به حداقل برسد [38].



شکل ۱-۲ پیزوالکتریک با ولتاژ تحریک [۴۰]

ماتریس کلی $[S]$ برابر است با:

$$[S^E] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (1-5)$$

مطابق با شکل ۱-۲، محور سوم مختصات در جهت ضخامت پیزوالکتریک می‌باشد؛ بنابراین، میدان الکتریکی در این جهت اعمال می‌شود، درحالی‌که تنش و کرنش مکانیکی روی محور ۱ و محور ۲ عمل می‌کند؛

بنابراین، جفت الکترومکانیکی ۳۱ و ۳۲ عمدتاً مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. ورودی الکتریکی در امتداد جهت ضخامت E_3 باعث ایجاد کرنش‌های سطحی S_{11} و S_{22} می‌شود.

برای یک مبدل PZT، ماتریس گذردهی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$[\varepsilon^T] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22}^T & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

در دهه‌های اخیر، مواد پیزوالکتریک به عنوان حسگرهای فعال، توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. برای ارزیابی غیرمخرب، مبدل‌های ارزان قیمت PZT به عنوان محرک برای تولید و سنجش امواج هدایت‌شونده توسعه یافته‌اند. مبدل‌های PZT با یک تحریک سینوسی یا پالسی پیوسته با استفاده از تکنیک انتشار موج مورد بررسی قرار گرفته‌اند [39]، [40].

از زمانی که روش امپدانس الکترومکانیکی ارائه شد، تلاش‌هایی در جهت بهبود و کاربرد آن صورت گرفته است. در این روش، مبدل پیزوالکتریک ساختار میزبان را فعال می‌کند و پاسخ را به طور هم‌زمان حس می‌کند. اثر الکتریکی به طور مستقیم منعکس‌کننده تغییرات در خواص مکانیکی ساختار میزبان است. مزایای روش امپدانس الکترومکانیکی شامل موارد زیر است [41]:

(۱) این روش از مبدل‌های سبک و غیرنفوذی با اندازه کوچک استفاده می‌کند که می‌تواند مکان‌های غیرقابل دسترس را نظارت کند.

(۲) مبدل‌های پیزوالکتریک دارای طیف وسیعی از خطی بودن، پاسخ سریع، راندمان تبدیل بالا و حساسیت طولانی مدت هستند.

(۳) به دلیل فرکانس کاری بالا، این روش برای تشخیص آسیب جزئی حساس است.

۲-۳-۱ روش امپدانس الکترومکانیکی در SHM

در میان روش‌های تشخیص آسیب، روش‌های امپدانس الکترومکانیکی در سال‌های اخیر به دلیل حساسیت بالای آن‌ها به آسیب‌های ساختاری به‌طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [46]–[42]. پایش سلامت سازه رفته‌رفته در حال جایگزین شدن روش‌های معمول تست‌های غیرمخرب می‌باشد.

در میان روش‌های مختلف پایش سلامت سازه، روش امپدانس الکترومکانیکی که در دسته روش‌های پایه ارتعاشی محسوب می‌شود، با استفاده از سنسورهای فعال ویفر پیزوالکتریک^۱ به‌طور گسترده به‌عنوان یک روش تشخیص آسیب در سازه‌ها توسعه یافته است و وضعیت سازه را ارزیابی می‌کند و توانسته عملکرد قابل قبولی را در حوزه پایش سلامت سازه از خود نشان دهد. هرگونه تغییر در سفتی سازه مانند آسیب و خواص مواد، امپدانس مکانیکی سازه را اصلاح کرده و در نتیجه امپدانس الکترومکانیکی سنسور را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ بنابراین استخراج این تغییرات وجود آسیب در سازه را آشکار خواهد کرد [47].

در روش مبتنی بر امپدانس الکترومکانیکی، سنسورهای فعال پیزوالکتریک به‌عنوان یکی از محرک‌های فرکانس بالا استفاده می‌شود؛ و می‌تواند مستقیماً با امپدانس مکانیکی ساختار میزبان توسط جفت شدن بین سنسور و سازه مرتبط باشد [48]؛ بنابراین، اگر امپدانس مکانیکی ساختار میزبان به دلیل آسیب تغییر کند، سیگنال‌های اندازه‌گیری شده نیز تحت تأثیر قرار خواهند گرفت [49].

اصل اساسی روش امپدانس الکترومکانیکی، مشابه روش SHM مبتنی بر ارتعاش است. با این حال، مبدل پیزوالکتریک نقش محرک و سنسور را به‌طور هم‌زمان ایفا می‌کند. علاوه بر این، فرکانس کاری به‌طور کلی بالاتر از ۱۰ کیلوهرتز است که بسیار بالاتر از روش‌های مرسوم مبتنی بر ارتعاش است [50]. در چنین محدوده فرکانس بالایی، طول موج آن قدر کوچک است که روش EMI^2 را نسبت به تغییرات جزئی در خواص ساختاری حساس کند. از طرف دیگر، ناحیه تشخیص موضعی باعث می‌شود امپدانس الکترومکانیکی کمتر

1- PWAS

2- Electro Mechanical Impedance

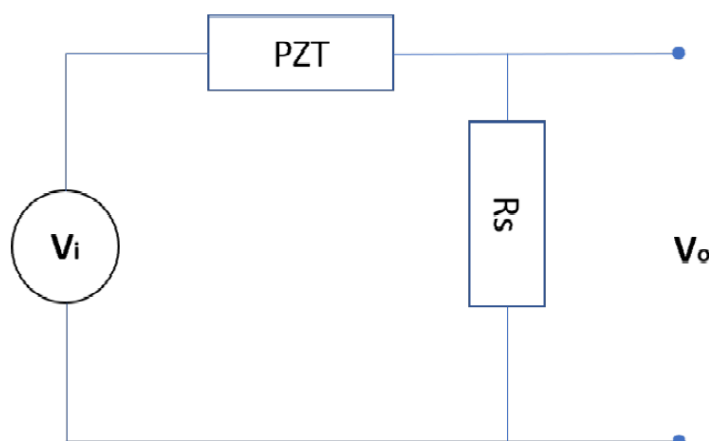
به شرایط مرزی وابسته باشد. پارک و همکاران^۱ [51] خاطرنشان کردند که محدوده‌های فرکانس چندگانه حاوی ۲۰ تا ۳۰ پیک معمولاً برای ارزیابی آسیب انتخاب می‌شوند، زیرا چگالی بالاتر حالت‌ها، دلالت بر تعامل دینامیکی بزرگ‌تری دارد.

در پایش سلامت سازه مبتنی بر روش الکترومکانیکی، سطح مبدل پیزوالکتریک به ساختار میزبان متصل می‌شود یا در آن جاسازی می‌شود. یک آنالایزر امپدانس، مبدل را توسط یک ولتاژ متناوب سینوسی تحت یک محدوده فرکانس مشخص تحریک می‌کند. با توجه به اثر پیزوالکتریک، نیروی ایجادشده توسط پیزو ساختار میزبان را برای ارتعاش تحریک می‌کند و پاسخ الکتریکی مبدل پیزو مستقیماً با امپدانس مکانیکی ساختار میزبان مرتبط است؛ بنابراین، تغییرات در امپدانس الکتریکی پیزو را می‌توان برای تشخیص تغییرات در خواص مکانیکی ساختار میزبان استفاده کرد. مدار اندازه‌گیری امپدانس الکترومکانیکی مبتنی بر PZT در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. امپدانس الکتریکی را می‌توان با تقسیم ولتاژ محرک مبدل PZT بر جریان عبوری از مبدل محاسبه کرد. تقریبی از امپدانس با در نظر گرفتن نسبت تحلیل تبدیل فوریه سریع ولتاژ تغذیه V_i^2 به ولتاژ V_o^3 در مقاومت حسگر R_s^4 تخمین زده می‌شود، I جریان عبوری از مقاومت حسگر است [47]، [52].

$$Z = \frac{V_i}{I} = \frac{V_i}{V_o/R_s} \quad (1-7)$$

PZT یک عنصر خازنی در مدار است؛ بنابراین جریان عبوری از آن با فرکانس افزایش می‌یابد. برای حل این مشکل، می‌توان از مدار تقویت‌کننده برای ارائه ولتاژ خروجی بزرگ‌تر استفاده کرد [51].

-
- 1- Park
 - 2- Input Voltage
 - 3- Output Voltage
 - 4- Sensor Resistance



شکل ۳-۱ مدار اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی [۴۱]

ایمنی و قابلیت سرویس‌دهی سازه همیشه در اولویت بوده. به همین دلیل است که پایش بلادرنگ در ارزیابی کیفی سازه ضروری است؛ چنین ارزیابی می‌تواند هم در سطح کلی و هم به صورت محلی انجام شود. تکنیک‌های کلی یکپارچگی سازه را با کمک پارامترهای گرهی و تغییر شکل‌های سازه تفسیر می‌کنند. این روش‌ها در محدوده فرکانس پایین کار می‌کنند و در تشخیص آسیب‌های موضعی مؤثر نیستند. برعکس، روش‌های محلی مانند امپدانس الکترومکانیکی، امواج اولتراسونیک^۱، آکوستیک^۲ و غیره از فرکانس‌های بالا استفاده می‌کنند که آن‌ها را نسبت به آسیب‌های موضعی حساس‌تر می‌کند. روش امپدانس الکترومکانیکی به دلیل حساسیت به حضور و انتشار آسیب برای تشخیص موضعی مناسب است و می‌تواند حتی به یک آسیب کوچک در محدوده فرکانس بالا بسیار حساس باشد [53]–[55].

گستره تحقیقاتی این روش به دلیل کاربردهای بالا و سادگی در اجرا، بسیار بالا می‌باشد [56]. روش EMI یک روش ارزیابی غیر مخرب^۳ می‌باشد که در سیستم نظارت بر سلامت سازه، در حال توسعه است، زیرا بدون مدل است و همچنین با تشخیص فرکانس بالا و پاسخ سریع مشخص می‌شود.

1- Ultrasonic Waves
2- Acoustic
3- Non Destructive Evaluation

این روش مبتنی بر پایش تغییرات الکترومکانیکی ناشی از آسیب ساختاری در سیستم محرک PZT است؛ زیرا اندازه‌گیری امپدانس مکانیکی ساختاری به‌سختی به دست می‌آید. روش‌ها و مفاهیم مختلفی برای بهبود کاربرد مانیتورینگ مبتنی بر امپدانس وجود دارد [57]. لیانگ و همکاران^۱، اولین کسانی بودند که معادله‌ای را برای پذیرش الکترومکانیکی یک‌بعدی، پیشنهاد کردند که در آن ساختار میزبان به‌عنوان یک عنصر یک‌بعدی در نظر گرفته می‌شود. این تئوری بر روی خاصیت کوپلینگ الکترومکانیکی است که بین ساختار میزبان و محرک پیزوالکتریک کار می‌کند که بسیاری از محققان دیگر متعاقباً آن را برای تشخیص آسیب‌های ساختاری مختلف اعمال کردند [58].

فرآیند تشخیص آسیب خوردگی ساختاری فولاد نیز مورد بررسی قرار گرفته است. ویسالکشی و همکاران^۲ از طریق آزمایشات اشاره کردند که روش EMI برای نظارت بر آسیب خوردگی روی میلگرد مفید بود. یانگ و همکاران^۳ توسعه خوردگی موضعی روی یک تیر فولادی را مورد مطالعه قرار دادند و حساسیت پذیرش الکترومکانیکی را در تشخیص آسیب خوردگی توصیف کردند. پارک و پارک^۴ یک مطالعه تجربی بر روی پایش بی‌سیم آسیب خوردگی در سازه‌های فلزی انجام دادند و مناطق آسیب را با استفاده از روش EMI تعیین کردند. این مطالعات آسیب ساختاری را بر اساس پذیرش الکترومکانیکی خام به‌دست‌آمده از حسگرهای PZT ارزیابی می‌کنند [59].

روش امپدانس الکترومکانیکی یک روش محلی است که مبتنی بر مواد هوشمند است؛ و در زمینه‌های مختلف مهندسی برای ارزیابی چندین پارامتر از مواد یا سازه‌ها استفاده می‌شود. علاوه بر این، از این روش برای اندازه‌گیری ترک در فولاد و همچنین در بتن، خوردگی آرماتور، شل شدن پیچ و پدیده جداسازی و غیره استفاده می‌شود [60].

1- C. Liang
2- Visalakshi et al.
3- Yang et al.
4- Park and Park

۴-۱ تئوری تماس

مکانیک تماس به دلیل اهمیت فوق‌العاده آن برای پرداختن به چندین کاربرد عملی در فیزیک و مهندسی، یک حوزه تحقیقاتی بسیار فعال است. درک تکامل دامنه تماس و متغیرهای تماس، مانند بار، سطح تماس واقعی، سختی تماس و بسیاری موارد دیگر، امروزه هنوز به‌عنوان یک مشکل چالش‌برانگیز در نظر گرفته می‌شود.

نظریه‌های تماس نیمه‌تحلیلی که قادر به ارائه پیش‌بینی‌های ترکیبی از پاسخ تماس هستند نیز یک موضوع چالش‌برانگیز است. مقایسه و اعتبارسنجی نتایج معیار برای درک محدودیت‌های روش‌های موجود و پیشنهاد برای بهبود بیشتر ضروری است. انجام تحقیقات تجربی دشوار است و شامل تقریب‌ها یا اندازه‌گیری سطح تماس واقعی در شرایط خاص می‌شود، برای مثال اغلب پارامترهای تماس را می‌توان تنها با اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم مقاومت حرارتی یا اتصالات الکتریکی ناهموار فشرده تخمین زد؛ بنابراین، روش‌های عددی برای به دست آوردن هرچه بیشتر اطلاعات در مورد مشکل تماس در دست و استنتاج نتایج کلی ضروری هستند [61].

در چند سال اخیر، پیشرفت‌های زیادی در شبیه‌سازی عددی تماس بین سطوح ناهموار صورت گرفته است. دو روش اصلی را می‌توان متمایز کرد: روش اجزای محدود و حل نیمه فاصله. در دسته اول روش‌ها، مشکل با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی حل می‌شود و زمان محاسباتی بالاست، زیرا گسسته‌سازی سطح باید به‌اندازه کافی خوب باشد تا تمام جزئیات را به تصویر بکشد. روش المان محدود^۱ عمدتاً در مکانیک برای حل مشکلات تماس که در آن رفتار سازنده توده الاستیک غیرخطی است، استفاده شده است. همچنین در بسیاری از کارها برای تعریف برخی از قوانین تماس میکرو مکانیکی که در مدل‌های ماکروسکوپی تعبیه شده‌اند، استفاده شد.

در این روش‌ها محاسبات زیادی برای به دست آوردن یک کمیت فیزیکی ماکروسکوپی که به زبری بستگی دارد، انجام می‌شود. در مقایسه با روش‌های اجزای محدود، دسته دوم روش‌های عددی به دلیل کاهش زمان محاسباتی جذاب‌تر هستند [62].

۵-۱ اهداف پایان‌نامه

در این پایان‌نامه موضوع تشخیص آسیب جزئی که یکی از عوامل مهم در حفظ و نگهداری سازه‌ها می‌باشد بررسی می‌شود. اکثر تحقیقات فعلی برای تشخیص آسیب در سازه، روش‌های خطی هستند که تنها آسیب‌های کوچک با این روش‌ها قابل شناسایی می‌باشند، بنابراین اولین هدف این تحقیق، توسعه یک رویکرد جدید برای تشخیص آسیب ساختاری بسیار کوچک است. به‌طور کلی، آسیب‌های ساختاری اولیه را می‌توان به‌سرعت ترمیم کرد؛ بنابراین، یک مسئله حیاتی در میان مطالعات بر روی SHM، توانایی تشخیص آسیب‌های بسیار کوچک سازه در مراحل اولیه برای جلوگیری از تخریب پیشرونده سازه و شکست بالقوه است. آسیب اولیه به‌راحتی قابل تشخیص نیست زیرا آسیب در مرحله اولیه یک پدیده در مقیاس جزئی است. روش‌های بالغ جهانی SHM مبتنی بر تجزیه و تحلیل اشکال حالت و چند فرکانس طبیعی اولیه ساختار میزبان نسبت به آسیب‌های موضعی جزئی حساس نیستند. برای بیشتر روش‌های کلی SHM، شاخص‌ها فقط نقص‌های کلی ساختار میزبان را منعکس می‌کنند. برای تشخیص آسیب‌های جزئی به ولتاژ تحریک بالا نیاز است به همین دلیل روش امیدانس الکترومکانیکی غیرخطی برای توصیف این آسیب پیشنهاد شده است و کاربرد نوآورانه‌ای برای بیان مسئله‌ی آسیب سازه از جمله شل‌شدگی پیچ نشان داده است.

این پایان‌نامه، در چهار فصل جمع‌آوری شده است. فصل دوم، مدل‌های تئوری بر اساس معادلات دو درجه آزادی جرم، فنر، دمپر را برای بیان درستی این روش در جهت تشخیص عیب تماسی در سازه ارائه داده است. فصل سوم، به توضیح و تفسیر فعالیت‌های آزمایشگاهی در جهت تشخیص عیب پرداخته است و نتایج

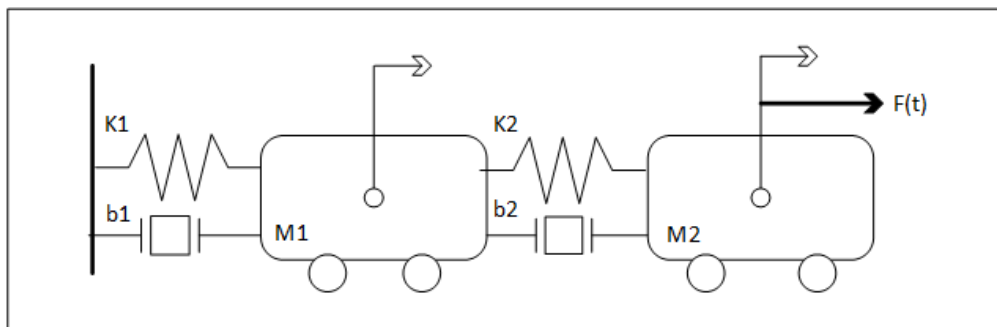
این روش برای اثبات درستی در این فصل آورده شده است. در فصل چهارم نتیجه گیری و پیشنهادات در رابطه با این روش ارائه شده است.

فصل ۲: نتیجہ توری

۲-۱ معادلات غیرخطی حاکم بر سیستم

در این تحقیق به کمک روش امپدانس الکترومکانیکی غیرخطی آسیب شل شدن پیچ در سازه مورد بررسی قرار گرفته است که این آسیب در دسته عیب‌های تماسی قرار دارد. به منظور بررسی عیب تماسی به صورت تجربی از یک سیستم جرم فنر دمپر دو درجه آزادی استفاده شده است که در شکل ۲-۱ قابل مشاهده می‌باشد. آسیب ایجاد شده در این سیستم نیز یک عیب تماسی است که متناظر با آسیب شل شدن پیچ در نظر گرفته شده است و فقط در جهت امکان‌سنجی عیب تماسی در تشخیص این نوع آسیب در سازه مورد بررسی قرار گرفته است.

این سیستم نیروی متغیر $F(t)$ که به جرم m_2 وارد شده نقش ولتاژ اعمالی در روش عملی را دارد. یک جسم صلب به عنوان مرز و تعیین محدوده حرکت در میزان جابجایی جرم m_1 تعیین شده است. تماس جرم m_1 با مرز تعیین شده به عنوان آسیب در نظر گرفته شده است. هنگامی که نیروی $F(t)$ به جرم m_2 اعمال شود، باعث جابجایی جرم m_1 و m_2 می‌شود. این نیرو باید در حدی باشد که تماسی بین جرم m_1 و مرز ایجاد نشود. در حالت خطی که نیروی اعمالی کم است جرم m_1 در حد زیادی جابجا نمی‌شود بنابراین تماسی برقرار نشده و تغییری در پاسخ فرکانسی ایجاد نمی‌شود.



شکل ۲-۱ سیستم جرم، فنر، دمپر دو درجه آزادی

همان‌طور که در بالا اشاره شد، در روش غیرخطی برای تعیین محدوده حرکت جرم m_1 یک جسم صلب به عنوان مرز ایجاد می‌شود. با افزایش نیروی اعمالی، تماس بین جرم m_1 و مرز ایجاد می‌شود. این تماس باعث به وجود آمدن عامل غیرخطی و ظاهر شدن پیک‌های فرکانسی اطراف فرکانس طبیعی می‌شود که

بیانگر وجود آسیب در سیستم می‌باشد.

در ادامه توضیحاتی در رابطه با حل معادلات تماس از مقاله [63] آورده شده است.

نقاط C و A به ترتیب جرم m_1 و مرز هستند. X_C و X_A بردارهای موقعیت فعلی، U_A و U_C بردارهای جابجایی نقاط C و A می‌باشند. اگر C و A به‌عنوان یک جفت تماس گره در نظر گرفته شوند، تابع شکاف نرمال مربوطه را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$g_N = n^T (X_A - X_C) - r \quad (2-1)$$

که در آن g_N تابع شکاف نرمال، n بردار نرمال واحدی است که به A اشاره می‌کند و r فاصله جرم m_1 تا

مرز تعیین شده است. معادله (2-1) را می‌توان به‌صورت ماتریسی به‌صورت زیر نوشت:

$$g_N = [-n_x \ n_x] \begin{bmatrix} X_C \\ X_A \end{bmatrix} - r = [G_L]_{1 \times 4} \begin{bmatrix} X_C \\ X_A \end{bmatrix} - r \quad (2-2)$$

که در آن G_L ماتریس تماس محلی نامیده می‌شود و x و y به ترتیب اجزای بردار موقعیت x در جهات

افقی و عمودی هستند.

۲-۱-۱ شرایط تماس

شرایط تماس باید تضمین کند که موقعیت جرم m_1 به مرز جسم صلب تماس نخواهد داشت. نیروی تماس طبیعی در ناحیه تماس، صفر یا فشاری خواهد بود. هنگامی که شکاف مثبت باشد، نیروی تماس طبیعی صفر خواهد بود؛ و زمانی که نیروی نرمال منفی باشد، شکاف صفر خواهد بود. همه این شرایط که به‌عنوان شرایط هرتز-سیگنورینی-مورو^۱ نیز شناخته می‌شوند [64]، به شرح زیر هستند:

$$\begin{cases} g_N^i \geq 0 \\ P_N^i \leq 0 \\ P_N^i g_N^i = 0 \end{cases} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, q \quad (2-3)$$

که در آن P_N^i فشار تماس معمولی مرتبط با جرم دوم است.

در عمل، اصطکاک همیشه وجود دارد؛ بنابراین، یک مدل با در نظر گرفتن اثرات اصطکاکی باید به معادله محدود حرکت معرفی شود. یک مدل مناسب، قانون کولمب^۱ است که کشش سطح مماسی را به فشار عادی به صورت زیر مرتبط می‌کند:

$$\left| |t_T^i| \right| \leq \mu |P_N^i| \quad (2-4)$$

که در آن کشش سطح مماسی در ناحیه تماس است و μ ضریب اصطکاک است.

در این کار فرض بر این است که جرم m_1 ثابت است و اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک با جرم m_2 جبران می‌شود؛ بنابراین، مرز جرم m_2 به طور پیوسته بر روی مرز می‌لغزد و کشش سطح مماسی متناسب با فشار عادی خواهد بود که توسط معادله زیر نشان داده می‌شود:

$$t_T^i = -\mu |P_N^i| a \quad (2-5)$$

با توجه به اینکه فشار نرمال منفی یا صفر است، معادله بالا به صورت اسکالر به صورت زیر به دست می‌آید:

$$t_T^i = \mu P_N^i \quad (2-6)$$

اگر ناحیه تماس مربوط به جفت‌های تماس با A^i نشان داده شود، می‌توان تعریف کرد:

$$\begin{cases} \lambda_N^i = P_N^i A^i \\ \lambda_T^i = t_T^i A^i \end{cases} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, q \quad (2-7)$$

که در آن λ_N^i و λ_T^i به ترتیب نیروی تماس نرمال و مقدار اسکالر نیروی تماس مماسی مرتبط با جفت تماس گره i ام هستند؛ بنابراین، معادله (۲-۳) و (۲-۶) را می‌توان برحسب این نیروی تماس بازنویسی کرد:

$$\begin{cases} g_N^i \geq 0 \\ \lambda_N^i \leq 0 \\ \lambda_N^i g_N^i = 0 \end{cases} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, q \quad (2-8)$$

و:

$$\lambda_T^i = \mu \lambda_N^i \quad (2-9)$$

۲-۱-۲ معادله حرکت محدود

روش ضریب لاگرانژ برای اضافه کردن شرایط تماس به عنوان قید به شکل معادله حرکت استفاده می‌شود. همان‌طور که گفته شد، یک حرکت لغزش ثابت بین جرم m_1 و مرز ایجاد شده فرض می‌شود. تغییر انرژی مربوط به رابط تماس T_c که در آن حرکت لغزش انجام می‌شود به صورت زیر داده می‌شود:

$$\delta II_C^{LM} = \int_{T_c} (P_N \delta g_N + t_T \cdot \delta g_T) dA + \int_{T_c} \delta P_N g_N dA \quad (2-10)$$

و در آن انتگرال اول کار مجازی نیروی تماس در امتداد تغییرات توابع شکاف است و دومی قیدها را اعمال می‌کند [64]. در انتگرال دوم تابع شکاف مماسی ظاهر نمی‌شود زیرا در یک حرکت لغزشی نیازی به صفر بودن آن نیست. تأکید می‌شود که فشار تماس P_N صرفاً به عنوان ضریب لاگرانژ عمل می‌کند زیرا کشش سطح مماسی به فشار نرمال وابسته است.

از آنجایی که کشش سطح مماسی و شکاف مماسی مجازی در مسئله تماس دوبعدی موازی هستند، عبارت $t_T \cdot \delta g_T$ در معادله (۲-۱۰) به سادگی به ضرب مقادیر اسکالر کاهش می‌یابد، یعنی $t_T \cdot \delta g_T$ با استفاده از استراتژی تماس گره به گره در گسسته سازی معادلات، در معادله (۲-۱۰) برای جفت‌های تماس گره فعال q به صورت زیر ساده شده است [64]:

$$\int_{T_c} (P_N \delta g_N + t_T \cdot \delta g_T) dA + \int_{T_c} \delta P_N g_N dA = \sum_{i=1}^q (P_N^i A^i \delta g_N^i + t_T^i A^i \delta g_T^i) + \sum_{i=1}^q \delta P_N^i A^i g_N^i \quad (2-11)$$

با استفاده از معادلات (۲-۷) و (۲-۱۱)، معادله (۲-۱۰) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\delta II_C^{LM} = \sum_{i=1}^q (\lambda_N^i \delta g_N^i + \lambda_T^i \delta g_T^i) + \sum_{i=1}^q (\delta \lambda_N^i g_N^i) \quad (2-12)$$

از این پس λ_N^i به عنوان ضریب لاگرانژ مرتبط با جفت تماس گره i ام در نظر گرفته می‌شود. معادله (۲-۱۲) را می‌توان به صورت ماتریسی بازنویسی کرد:

$$\delta \Pi_C^{LM} = \delta g_N^T \lambda_N + \delta g_T^T \lambda_T + (\delta \lambda_N)^T g_N \quad (2-13)$$

جایی که $g_N = [g_N^1, g_N^2, \dots, g_N^q]^T$ و $\lambda_T = [\lambda_T^1, \lambda_T^2, \dots, \lambda_T^q]^T$ ، $\lambda_N = [\lambda_N^1, \lambda_N^2, \dots, \lambda_N^q]^T$

با اعمال روش گسسته سازی، انرژی پتانسیل ناشی از تغییر شکل استاتیکی به صورت زیر به دست می آید [64]:

$$\Pi = \frac{1}{2} u^T k u - u^T f \quad (2-14)$$

که در آن u بردار جابجایی، K ماتریس سفتی و f بردار نیرو است. با استفاده از شکل تفصیلی معادله (۲-۱۴) عبارت است از:

$$\Pi = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} u_r \\ u_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} k_r & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_r \\ u_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_r \\ u_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} f_r \\ f_s \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

در نظر گرفتن تغییر معادله (۲-۱۴) با توجه به جابجایی‌ها، شکل معادله تعادل محدود را به وجود می آورد:

$$\delta \Pi = \delta u^T K u - \delta u^T f \quad (2-16)$$

برای به دست آوردن معادله تعادل محدود، تغییر انرژی مربوط به رابط تماس باید به تغییر انرژی پتانسیل مربوط به تغییر شکل الاستیک اجسام اضافه شود. این بدان معنی است که:

$$\delta \Pi^{LM} = \delta \Pi + \delta \Pi_C^{LM} \quad (2-17)$$

که در آن $\delta \Pi^{LM}$ تغییر انرژی کل است. معادل سازی معادله (۲-۱۷) تا صفر معادله تعادل محدود را به دست می آورد. قبل از این، باید بر حسب جابجایی‌های مجازی بیان شود. معادله (۲-۱۳) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\delta \Pi_C^{LM} = \delta u^T G_N^T \lambda_N + \delta u^T G_T^T \lambda_T + (\delta \lambda_N)^T g_N = \delta u^T G^T \lambda + \delta \lambda_N^T g_N \quad (2-18)$$

جایی که $G^T = [G_N^T \ G_T^T]$ و $\lambda^T = [\lambda_N^T \ \lambda_T^T]$ است.

جایگذاری معادله‌های (۲-۱۶) و (۲-۱۸) در معادله (۲-۱۷) و سپس معادل سازی نتیجه با بازده صفر:

$$\delta \Pi^{LM} = \delta u^T K u - \delta u^T f + \delta u^T G^T \lambda + \delta \lambda_N^T g_N = 0 \quad (2-19)$$

با در نظر گرفتن شرایط تماس بیان شده در معادله (۲-۸) و همچنین با توجه به اینکه معادله (۲-۱۹) باید برای هر $\delta \lambda_N^T$ و δu^T دلخواه برقرار باشد، می توان معادله زیر را به دست آورد:

$$\begin{cases} Ku + G^T \lambda = f \\ g_N \geq 0; \lambda_N \leq 0; \lambda_N^i g_N^i = 0 \text{ for } i = 1, \dots, q \end{cases} \quad (2-20)$$

که تغییر شکل استاتیک جسم الاستیک در تماس را جبران می‌کند.

با در نظر گرفتن نیروی اینرسی برای مطالعه دینامیک تماس بین جرم m_1 و مرز، معادله (۲-۲۰) به صورت

زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{cases} M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + G^T \lambda = f \\ G_N(X^0 + u) - r \geq 0; \lambda_N \leq 0; \lambda_N^i g_N^i = 0 \text{ for } i = 1, \dots, q \end{cases} \quad (2-21)$$

که در آن \ddot{u} و \dot{u} به ترتیب بردارهای شتاب و سرعت هستند. علاوه بر این، M ماتریس جرم، C ماتریس میرایی و f نیروی خارجی اعمال شده بر جرم m_2 است. معادله (۲-۲۱) معادله حرکتی محدود است که باید با یکپارچه‌سازی عددی حل شود.

یادآوری معادله (۲-۹): مشهود است که $\lambda_T = \mu \lambda_N$ ؛ بنابراین، شکل ساده‌تر معادله (۲-۲۱) به صورت

زیر داده شده است:

$$\begin{cases} M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + G_{NT}^T \lambda_N = f \\ G_N(X^0 + u) - r \geq 0; \lambda_N \leq 0; \lambda_N^i g_N^i = 0 \text{ for } i = 1, \dots, q \end{cases} \quad (2-22)$$

که در آن G_{NT} ماتریس تماس نرمال-مماسی نامیده می‌شود و برابر با رابطه زیر است:

$$G_{NT} = G_N + \mu G_T \quad (2-23)$$

۲-۱-۳ حل عددی

روش حل عددی از «روش ضریب افزایشی لاگرانژ»^۱ فرموله شده در مقاله [63] اتخاذ شده است. معادله

حرکت محدود به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} M\ddot{u}^n + C\dot{u}^n + Ku^n + (G_{NT}^{n+1})^T \lambda_N^n = f^n \\ g_N(u^{n+1}) \geq 0 \end{cases} \quad (2-24)$$

در ابتدا فرض بر این است که تمام اطلاعات مرتبط با زمان t^n شناخته شده است و هیچ تماسی در مرحله زمانی فعلی، یعنی t^n تا t^{n+1} رخ نمی‌دهد. به عبارت دیگر λ_N صفر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، بر اساس

روش تفاضل محدود، «به‌روزرسانی جابجایی صریح معمول¹» در پایان مرحله زمانی فعلی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [63]:

$$u_*^{n+1} = \tilde{M}^{-1} \tilde{f}^n \quad (2 - 25)$$

جایی که:

$$\tilde{M} = \frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C, \quad \tilde{f}^n = f^n - \left(K - \frac{2}{\Delta t^2} M \right) u^n - \left(\frac{1}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2\Delta t} C \right) u^{n-1} \quad (2 - 26)$$

در معادله (۲-۲۶)، Δt اندازه گام زمانی است. حال، وقوع نفوذ باید با استفاده از u_*^{n+1} و موقعیت‌های اولیه مرزها بررسی شود. اگر تابع شکاف محاسبه‌شده مثبت باشد، هیچ تماسی رخ نداده است و جابجایی کل u^{n+1} همان به‌روزرسانی جابجایی u_*^{n+1} است. در غیر این صورت، بردار ضریب لاگرانژ λ_N^n باید تعیین و در محاسبات گنجانده شود تا شرایط تماس برقرار شود. درنهایت جابجایی کل باید به‌صورت زیر اصلاح شود:

$$u^{n+1} = u_*^{n+1} + u_C \quad (2 - 27)$$

که در آن u_C یک جابجایی افزایشی اصلاحی است که توسط بردار ضرب کننده لاگرانژ λ_N^n تولید می‌شود. برای یافتن λ_N^n مناسب از شرط نفوذناپذیری استفاده می‌شود. بنابراین، اگر بردار موقعیت اولیه X^0 به معادله اضافه شود. (۲-۲۷) چنین است که:

$$X^0 + u^{n+1} = X^0 + u_*^{n+1} + u_C \quad (2 - 28)$$

ضرب معادله (۲-۲۸) با ماتریس تماس G_N^{n+1} و سپس کم کردن r از هر دو طرف، برابر می‌شود با:

$$G_N^{n+1}(X^0 + u^{n+1}) - r = G_N^{n+1}(X^0 + u_*^{n+1}) - r + G_N^{n+1}u_C \quad (2 - 29)$$

با در نظر گرفتن شرایط نفوذناپذیری، تابع شکاف باید در زمان t^{n+1} صفر باشد:

$$G_N^{n+1}(X^0 + u^{n+1}) - r = g_N(u^{n+1}) = 0 \quad (2 - 30)$$

ترکیب معادله (۲-۲۹) و معادله (۲-۳۰) نتیجه می‌دهد:

$$-G_N^{n+1}u_C = G_N^{n+1}(X^0 + u_*^{n+1}) - r \quad (2 - 31)$$

مشابه معادله (۲-۲۵)، می‌توان برای بردار جابجایی اصلاحی نوشت:

$$\tilde{M}u_C = \tilde{f}_C^n \quad (2 - 32)$$

که در آن \tilde{f}_c بردار نیروهای تماس تعمیم یافته است؛ بنابراین، معادله (۲-۳۱) را می توان این گونه توصیف کرد:

$$-G_N^{n+1} \tilde{M}^{-1} \tilde{f}_c^n = g_N(u_*^{n+1}) \quad (2-33)$$

از طرف دیگر، بردار نیروهای تماس تعمیم یافته به صورت زیر به دست می آید:

$$\tilde{f}_c^n = -(G_N^{n+1})^T \lambda_N^n \quad (2-34)$$

جایگزینی معادله (۲-۳۴) به معادله (۲-۳۳) بازده:

$$G_N^{n+1} \tilde{M}^{-1} (G_{NT}^{n+1})^T \lambda_N^n = g_N(u_*^{n+1}) \quad (2-35)$$

بنابراین، ضریب لاگرانژ را می توان از معادله تعیین کرد. (۲-۳۵) به عنوان:

$$\lambda_N^n = (G_N^{n+1} \tilde{M}^{-1} (G_{NT}^{n+1})^T)^{-1} g_N(u_*^{n+1}) \quad (2-36)$$

جایابی کل در نهایت با استفاده از معادله (۲-۲۷) و ضریب لاگرانژ از معادله (۲-۳۶) به دست می آید.:

$$u^{n+1} = u_*^{n+1} - \tilde{M}^{-1} (G_{NT}^{n+1})^T \lambda_N^n \quad (2-37)$$

لازم به ذکر است که هر دو G_N^{n+1} و G_{NT}^{n+1} که با استفاده از به روزرسانی موقعیت صریح $X^0 + u_*^{n+1}$ محاسبه می شوند، در مرحله زمانی ثابت می مانند و برای مرحله زمانی بعدی به روز می شوند.

۲-۲ روش حل معادلات

در این قسمت در مورد سیستم جرم-فنر-دمپر دو درجه آزادی صحبت می شود که تحت نیروی هارمونیک $F(t)$ به ارتعاش درآمده است. برای توصیف یک سیستم دو درجه آزادی، در ابتدا بایستی مختصات توصیف کننده سیستم تعریف شود. در این سیستم از دو مختصات $x_1(t)$ و $x_2(t)$ به منظور توصیف مکان جرم های m_1 و m_2 استفاده شده؛ بنابراین تنها با نشان دادن مکان جرم m_1 و تشخیص تماس آن با مرز تعیین شده شناسایی عیب در سیستم مفروض قابل بیان خواهد بود.

برای نشان دادن حالت معیوب سیستم جرم فنر دمپر، محدودیت حرکت δ ، برای جرم m_1 در نظر گرفته می شود. جدول ۱-۲ مقادیر جرم فنر دمپر δ و فرکانس تشدید را نمایش می دهد.

جدول ۲-۱ مقادیر استفاده شده در معادله

m_1	0.1	m_2	1
b_1	0.2	b_2	0.5
k_1	39,900	k_2	100
F_0	100Hz	δ	1×10^{-11}

به منظور بررسی کلی سیستم، فرض می شود نیروی متغیر $F(t)$ به جرم m_2 وارد می شود. حال با

پیاده سازی قانون دوم نیوتن برای جرم های m_1 و m_2 می توان نوشت:

$$m_1 \ddot{x}_1 + (b_1 + b_2) \dot{x}_1 - b_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = 0 \quad (2-38)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - b_2 \dot{x}_1 + b_2 \dot{x}_2 - k_2 x_1 + k_2 x_2 = f \quad (2-39)$$

معادلات (۲-۳۸) و (۲-۳۹) برای حل در نرم افزار متلب، به صورت ماتریسی نوشته می شوند:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 + b_2 & -b_2 \\ -b_2 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} F \quad (2-40)$$

در معادله (۲-۴۰)، $[m]$ ، $[b]$ و $[k]$ به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سفتی هستند. $\vec{X}(t)$ و $\vec{F}(t)$ بردارهای

جابجایی و نیرو را نشان می دهند که به شکل زیر نوشته می شوند.

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-41)$$

$$[b] = \begin{bmatrix} b_1 + b_2 & -b_2 \\ -b_2 & b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7 & -0.5 \\ -0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

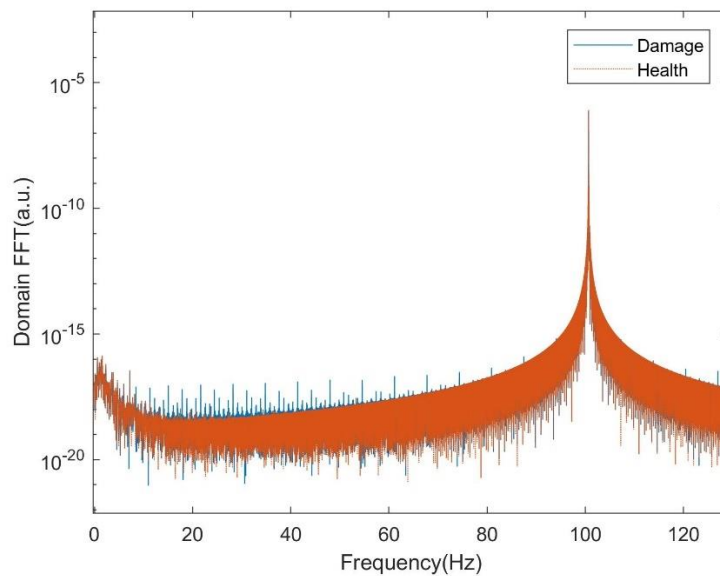
$$[k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 40000 & -100 \\ -100 & 100 \end{bmatrix} \quad (2-43)$$

$$\vec{X}(t) = \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{Bmatrix} \quad (2-44)$$

$$\vec{F}(t) = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_2(t) \end{Bmatrix} \quad (2-45)$$

۲-۳ نتایج تئوری

برای رسم حالت سالم ابتدا سیگنال $\sin wt$ بدون قید به جرم m_2 اعمال شده است. هنگامی که موقعیت جرم m_1 از محدوده تعیین شده عبور کند، تماس با مرز ایجاد شده که باعث به وجود آمدن عامل غیرخطی و ظهور پیک‌های فرکانسی اطراف فرکانس تشدید می‌شود. شکل ۲-۲ حالت سالم و معیوب سیستم را نشان می‌دهد که هارمونیک‌های ایجاد شده در حالت معیوب بیانگر وجود آسیب در سیستم می‌باشد.



شکل ۲-۲ پاسخ فرکانسی حالت سالم و معیوب در فرکانس ۱۰۰ Hz

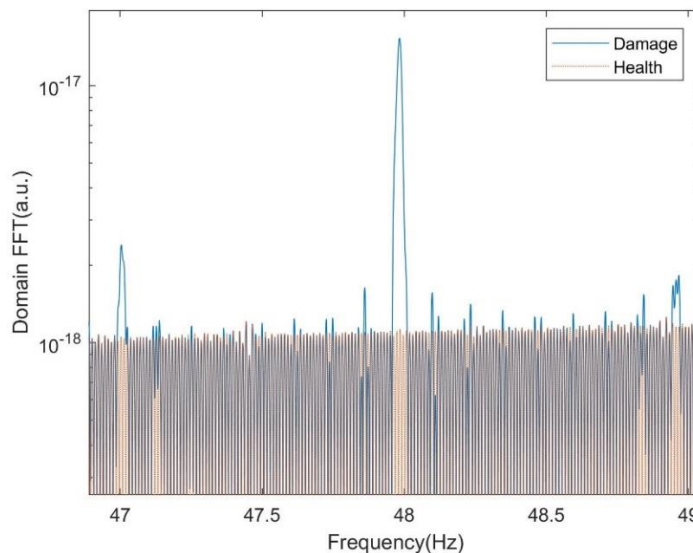
به هارمونیک‌های ایجاد شده که قبل از فرکانس تشدید ظاهر می‌شوند زیرهارمونیک^۱ می‌گویند. تعداد هارمونیک‌های ایجاد شده به سه عامل مهم بستگی دارد:

- مدل سیستم
- مدل عیب
- نویز

دلیل تفاوت تعداد هارمونیک‌ها در حالت عملی و تجربی، سه عاملی است که در بالا به آن‌ها اشاره شد؛

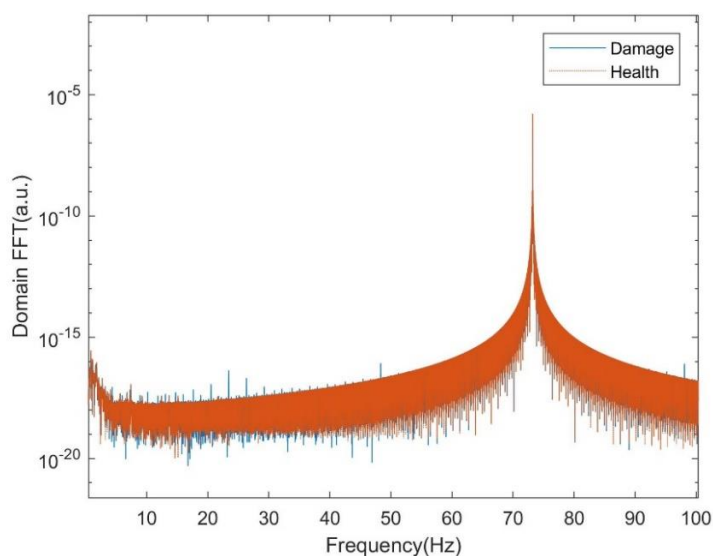
بنابراین موقعیت هارمونیک‌ها در این سیستم با توجه به شرایط فعلی در $\frac{f_0}{n}$ ایجاد شده که f_0 فرکانس تشدید و n موقعیت هارمونیک ایجاد شده است که می‌تواند عدد مثبت غیر صحیح باشد.

به منظور درک بهتر نتایج به دست آمده یکی از هارمونیک‌های ایجاد شده بزرگ‌نمایی شده است که در شکل ۲-۳ به تصویر کشیده شده است. این هارمونیک در فرکانس ۴۸ هرتز ظاهر شده که مقدار n با توجه به فرکانس تشدید ۱۰۰ هرتز، برابر با $n = \frac{100}{48} = 2.083$ می‌باشد. همچنین هارمونیک‌های دیگر با دامنه کم‌تر در فرکانس‌های ۴۷ و ۴۹ هرتز نیز ایجاد شده است که همگی بیانگر وجود آسیب در سیستم می‌باشند.



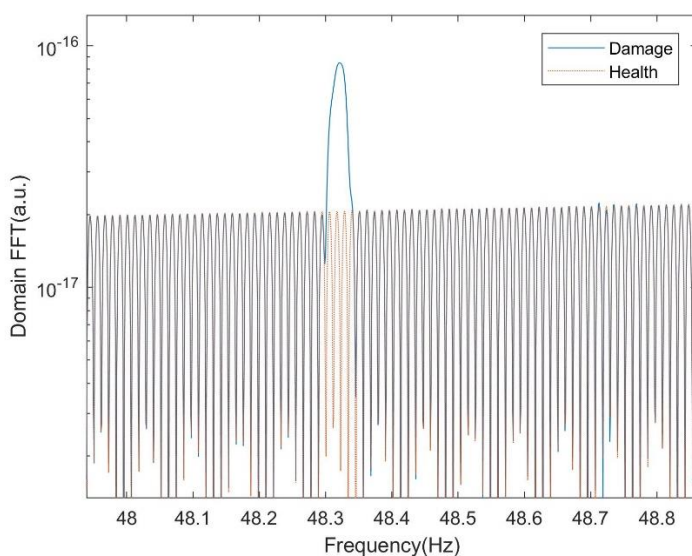
شکل ۲-۳ بزرگ‌نمایی حالت سالم و معیوب در فرکانس 100Hz

مراحل بالا در فرکانس ۷۳.۲ هرتز نیز انجام شد و نتایج در شکل ۲-۴ نمایش داده شده است. به منظور درک بهتر نتایج، یکی از پیک‌های ظاهر شده، در شکل ۲-۵ بزرگ‌نمایی شده است. با توجه به تصاویر زیر مشاهده می‌شود که تعداد زیر هارمونیک‌ها در فرکانس تشدید ۱۰۰ هرتز بیشتر است.



شکل ۲-۴ پاسخ فرکانسی حالت سالم و معیوب در فرکانس 73.2Hz

در فرکانس ۷۳.۲ هرتز، $n = \frac{73.2}{48.3} = 1.51$ است. همان‌طور که در شکل ۲-۵ مشاهده می‌شود دامنه زیر هارمونیک ظاهر شده کمتر از مرحله فرکانس تشدید می‌باشد. هم‌چنین هارمونیک دیگری در اطراف آن مشاهده نمی‌شود. اگرچه در این فرکانس هم شناسایی آسیب مقدور می‌باشد اما با توجه به موارد ذکر شده تشخیص آسیب در فرکانس تشدید آسان‌تر صورت می‌گیرد.



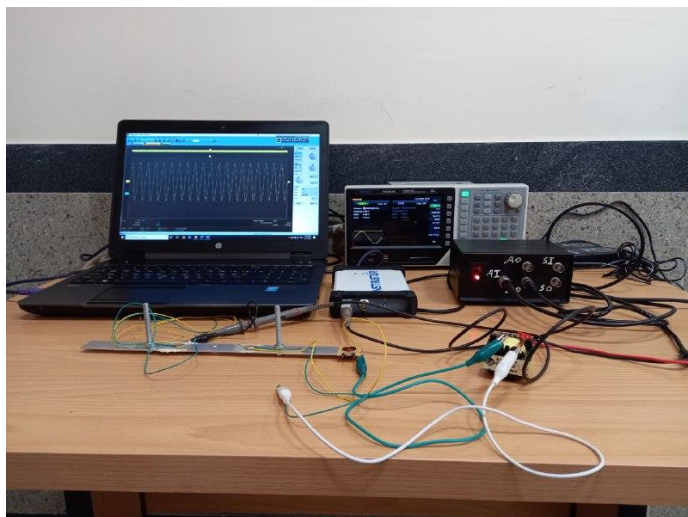
شکل ۲-۵ بزرگ‌نمایی حالت سالم و معیوب در فرکانس 73.2Hz

فصل ۳ : نتیجہ تجربی

برای تشخیص آسیب شل‌شدگی پیچ در سازه از یک صفحه آلومینیومی با یک پیچ و مهره استفاده شده است و در کنار پیچ یک محرک پیزوالکتریک برای تشخیص تغییرات ایجاد شده در سازه تعبیه شده است. در صورت شل‌بودن پیچ، اعمال ولتاژ تحریک به سازه باعث ایجاد ارتعاش شده و ارتعاش ناحیه به مبدل PZT منتقل می‌شود و تغییری در پاسخ امپدانس الکتریکی ایجاد می‌کند. پاسخ‌های امپدانس اندازه‌گیری شده از این مبدل PZT برای تشخیص آسیب پیچ شل شده در صفحه آلومینیوم استفاده می‌شود که تمرکز اصلی این مطالعه است.

۱-۳ بستر آزمایشگاهی مورد استفاده

با توجه به مطالب بیان شده در فصل اول، دامنه‌ی تحریک ورودی در روش خطی در حد ۱۰ ولت می‌باشد که برای تشخیص عیوب خیلی ریز کاربردی ندارد و فقط قادر به شناسایی عیوب نسبتاً ریز می‌باشد. به همین دلیل از روش غیرخطی با دامنه بالاتر برای تشخیص آسیب‌های خیلی ریز به سازه استفاده می‌شود. در ابتدا سیگنال ورودی توسط فانکشن ژنراتور تولید شده و برای تقویت جریان به آمپلی‌فایر اعمال می‌شود. پس از آن برای تقویت دامنه ولتاژ از یک ترانسفورماتور افزایشدهنده استفاده می‌شود. ولتاژ تقویت شده از دوسر ثانویه سیم‌پیچ ترانسفورماتور برای تحریک به پیزوالکتریک اعمال می‌شود؛ و نتایج خروجی با کارت اسیلسکوپ Instrustar ISDS210B از طریق کابل به لپ‌تاپ منتقل می‌شود و با برنامه Multi Vir Analyzer تحلیل و بررسی می‌شود. شکل ۱-۳ تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده را نمایش می‌دهد. در ادامه به شرح دقیق‌تر تجهیزات استفاده شده پرداخته شده است.



شکل ۱-۳ تجهیزات آزمایشگاهی تشخیص عیب با روش امپدانس الکتریکی غیرخطی

۳-۲ آمپلی فایر

برای پایش سلامت سازه مبتنی بر امپدانس به یک مولد موج سینوسی برای تولید سیگنال موردنظر نیاز است. اکثر مولدهای سیگنال سینوسی دارای امپدانس خروجی استاندارد 50Ω هستند که با توجه به حداکثر دامنه استاندارد ۱۰ ولت قادر به ارائه حداکثر جریان خروجی ۲۰۰ میلی آمپر هستند. علاوه بر این، مبدل‌های پیزوالکتریک به‌عنوان یک خازن در یک مدل ساده عمل می‌کنند. هنگامی که مولد سیگنال به یک محرک پیزوالکتریک متصل می‌شود، یک فیلتر پایین گذر بین امپدانس سری خروجی مولد و ظرفیت مبدل پیزوالکتریک ایجاد می‌شود. این فیلتر با توجه به مقدار خازن، فرکانس قطع مشخصی دارد. هرچه فرکانس سیگنال تحریک بیشتر باشد، ولتاژ پایین‌تری در محرک پیزوالکتریک به دلیل تضعیف در فیلتر پایین گذر ایجاد می‌شود. در برخی موارد، حتی با اعمال چندین سیگنال قوی ۱۰ ولت، فقط بخش کوچکی به محرک تحویل داده می‌شود.

در یک وضعیت ایده‌آل، اعمال سیگنال با هر دامنه به محرک، می‌تواند آسیب را براساس موج برگشتی از آن تشخیص دهد؛ اما در عمل، اگر سیگنال تحریک دامنه کمی داشته باشد، این روش امکان‌پذیر نیست زیرا موج برگشتی از آسیب معمولاً انرژی کمی دارد و قدرت سیگنال برگشتی برابر با توان نویز یا حتی

کمتر از آن است. در این حالت، هیچ تمایزی بین نویز و موج منعکس شده از آسیب وجود ندارد. در چنین شرایطی، حتی تقویت ولتاژ در سمت سنسور نمی‌تواند موج منعکس شده را از نویز جدا کند زیرا هر دو آن‌ها تقویت می‌شوند. از این رو، تنها تقویت در سمت محرک باعث بهبود نسبت سیگنال به نویز^۱ می‌شود. امپدانس یک‌بار خازنی با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد به همین دلیل برای هدایت یک‌بار خازنی در فرکانس‌های بالاتر به جریان یا توان زیادی نیاز است که باید از تقویت‌کننده جریان^۲ استفاده شود.

تقویت‌کننده استفاده شده در این تحقیق، برای شرایط زیر طراحی شده است:

- سیستم خطی و تغییرناپذیر با زمان است
- سیگنال‌ها ثابت هستند
- حداکثر توان خروجی تقریباً ۷۰ وات است
- پهنای باند حدود ۷۰۰ کیلوهرتز است
- حداکثر اعوجاج هارمونیک کل^۳ باید کمتر از ۱٪ باشد

هر تقویت‌کننده معمولاً چندین مرحله دارد. در هر مرحله باید امپدانس ورودی به اندازه‌ای بزرگ باشد که مرحله قبلی روی مرحله بعدی تأثیری نداشته باشد و درعین حال امپدانس خروجی در حدی کوچک باشد که اثرات کمی در آن مرحله داشته باشد یا بتواند توان کافی را به بار انتقال دهد.

در این آمپلی‌فایر استفاده شده دو مرحله در نظر گرفته شده است. مرحله اول برای تقویت ولتاژ و داشتن امپدانس ورودی زیاد استفاده می‌شود که یک تقویت‌کننده عملیاتی^۴ برای داشتن امپدانس ورودی بزرگ کمک می‌کند، بنابراین سیگنال خروجی مولد تحت تأثیر اپ امپ قرار نمی‌گیرد. با این حال، تقویت‌کننده‌های

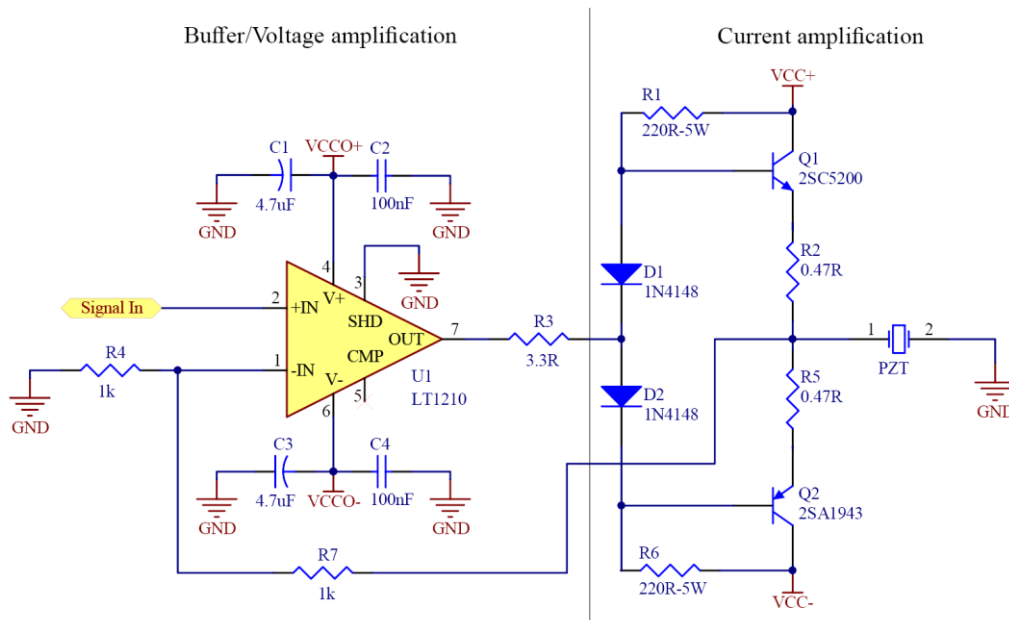
1- SNR
2- Amplifier
3- THD
4- Op Amp

عملیاتی معمولاً دارای امپدانس خروجی بالا و جریان خروجی کمی هستند و نمی‌توانند بارهای خازنی را به‌طور خاص در فرکانس‌های بالاتر هدایت کنند.

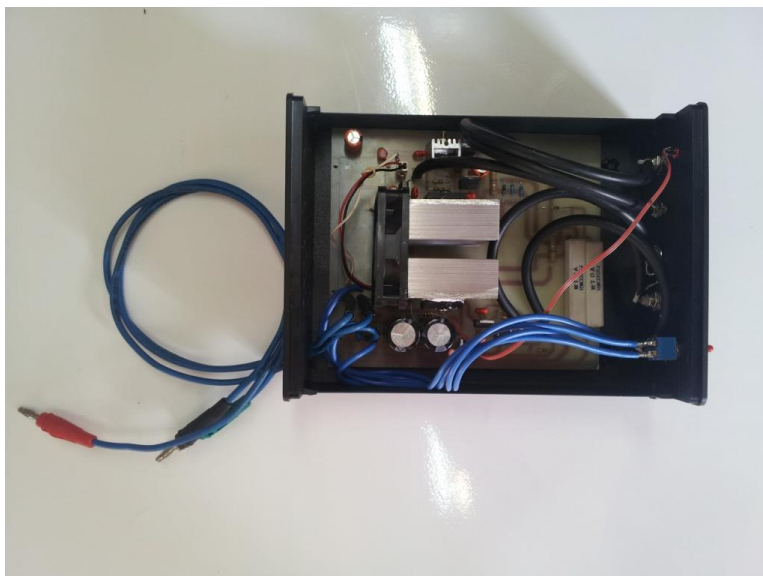
مرحله دوم برای تقویت جریان و هدایت بار از یک تقویت‌کننده پوش پول امیتر مشترک کلاس AB استفاده شده است. این مرحله دارای امپدانس خروجی کم، بهره جریان بالا، مشخصه فرکانس مناسب و اعوجاج کم است.

موضوع دیگری که باید در نظر گرفته شود، اتلاف توان اپ امپ و مرحله پوش پول است که با یک هیت سینک^۱ مناسب برای هر مرحله حل می‌شود. حداکثر توانی که ترانزیستور می‌تواند ارائه دهد به دمای محل اتصال ترانزیستور بستگی دارد؛ بنابراین، هنگامی که ترانزیستور به‌درستی خنک شود، از نظر مقدار توانی که می‌تواند انتقال دهد، قابل‌تحمل‌تر است و به آن اجازه می‌دهد تا در حداکثر ظرفیت توان خود کار کند. با توجه به بحث بالا، شماتیک مدار پیشنهادی در شکل ۲-۳ به همراه تقویت‌کننده استفاده شده در

شکل ۳-۳ ارائه شده است.



شکل ۲-۳ مدار تقویت‌کننده قدرت



شکل ۳-۳ تقویت کننده قدرت استفاده شده

در تقویت کننده جریان نشان داده شده در شکل ۲-۳، حداکثر ولتاژ تغذیه (VCCO) برای بخش بافر ۱۵ ولت است که توسط تقویت کننده فیدبک جریان LT1210، محدود شده است. Op Amp به صورت غیر معکوس با بهره ولتاژ برابر با ۲ تنظیم شده توسط R_4 و R_7 پیکربندی شده است. در بخش قدرت، دو دیود D_1 و D_2 یک بایاس کوچک برای ترانزیستورهای قدرت ارائه می کند که اعوجاج متقاطع را کاهش می دهد. با استفاده از مقادیر کمتر برای مقاومت های بایاس R_1 و R_6 ، جریان بیشتری را می توان به بار تحویل داد. با این حال، منجر به اتلاف توان بیشتر در ترانزیستور بایاس و ترانزیستور قدرت می شود. به دلیل اتلاف در ترانزیستورهای قدرت و مقاومت آمیتر، باید ولتاژ بیشتری برای مرحله نهایی تأمین شود. ولتاژ تغذیه (VCC) حدود ۱۷ ولت است.

با توجه به مطالب ذکر شده در بالا به طور خلاصه می توان گفت که آمپلی فایر، یک دستگاه الکترونیکی است که جریان الکتریکی را تقویت می کند. از آنجایی که جریان خروجی فانکشن ژنراتور^۱ استفاده شده در این تحقیق ۲۰۰ میلی آمپر است، اگر فاکشن ژنراتور مستقیماً به ترانسفورماتور^۲ متصل شود جریان زیادی می کشد و باعث آسیب دیدن دستگاه می شود. برای جلوگیری از این اتفاق از یک آمپلی فایر ۳۰ وات با ولتاژ

1- Generator function
2 - Transformers

خروجی ۱۰ ولت استفاده شده که بدون تغییر در دامنه ولتاژ، افت جریان ایجاد شده جبران شود و آسیبی در ادامه‌ی روند کار ایجاد نشود.

دامنه ولتاژ سیگنال خروجی از فانکشن ۱۰ ولت با جریان ۲۰۰ میلی‌آمپر می‌باشد که در این صورت توان سیگنال برابر است با:

$$p = V.I \quad p = 10 \times 200 \times 10^{-3} = 2w \quad (3-1)$$

خروجی آمپلی‌فایر ۱۰ ولت با توان ۳۰ وات می‌باشد که در این صورت جریان خروجی برابر است با:

$$I = \frac{p}{V} \quad I = \frac{30}{10} = 3A \quad (3-2)$$

که در این صورت افت جریان کاملاً جبران می‌شود.

۳-۳ ترانسفورماتور فرکانس بالا

ترانسفورماتور وسیله‌ای است که انرژی الکتریکی را از طریق میدان مغناطیسی بین دو یا چند سیم‌پیچ منتقل می‌کند. یک هسته مغناطیسی بین سیم‌پیچ اولیه و ثانویه قرار می‌گیرد که وظیفه انتقال انرژی در ابعاد کوچک‌تر و متمرکزتر را دارد. هسته ترانس شارهای مغناطیسی را به خوبی متمرکز کرده و باعث عبور شارهای مغناطیسی از هر دو سیم‌پیچ می‌شود. به همین دلیل، شارهای تولیدی توسط ترانس‌های بدون هسته، در هوا پراکنده شده و به صورت کامل از سیم‌پیچ ثانویه عبور نمی‌کند. در این صورت انتقال توان به درستی صورت نمی‌پذیرد و به ابعاد بزرگ‌تری از سیم‌پیچ برای انتقال دادن نیاز است.

هسته‌ها با توجه به فرکانس، ولتاژ و مقدار توان انتقالی، در انواع مختلفی از نظر جنس، شکل و ابعاد ساخته می‌شوند. هسته‌های فریت، یکی از انواع هسته‌های مغناطیسی می‌باشند که از جنس فریت^۱ هستند و در ساخت ترانسفورماتورها و سلف‌های فرکانس بالا استفاده می‌شوند.

1- Ferrite

فریت آلیاژی است که از ترکیبات اکسید آهن، روی و منگنز تشکیل شده است و در دسته مواد مغناطیسی نرم قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین ویژگی این هسته‌ها می‌توان به ضریب نفوذپذیری بالا و هدایت الکتریکی کم اشاره کرد.

نارسانایی الکتریکی فریت، منجر به تلفات جریان گردابی بسیار ناچیزی در این هسته‌ها می‌گردد؛ به همین دلیل از فریت‌ها می‌توان در فرکانس‌های بالا تا چند مگاهرتز هم استفاده کرد. هسته‌های فریت دارای اشکال متنوعی می‌باشد که هرکدام از این شکل‌ها جهت کاربرد خاصی طراحی شده است. انواع هسته فریت را می‌توان بر اساس شکل ظاهری دسته‌بندی کرد.

از برخی اشکال و کاربردهای هسته‌های فریت می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- منابع تغذیه: EE, EFD, EER, PQ

- سلف‌های توان بالا: UU, UI, EE, EI, PQ

- منابع تغذیه و ترانس سیگنال: EE, POT, RM

- ترانسفرمر Flyback: UR

ترانسفورماتورهای هسته فریت، از اهمیت بالایی برخوردارند که موجب شده این ترانسفورماتورها در کاربردهای الکتریکی ایده آل عمل کنند. از مزایای مهم این ترانسفورماتورها می‌توان به نفوذپذیری بالا، عدم وجود جریان‌های گردابی، وادارندگی مغناطیسی بالا، حساسیت به DC کم و اعوجاج سیگنال کم اشاره کرد.

با توجه به نکات ذکر شده، ترانسفورماتور انتخاب شده از نوع هسته فریت EER می‌باشد.

۱-۳-۳ محاسبه ترانس فرکانس بالا

فرمول استاندارد برای محاسبه تعداد دور سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور، با توجه به رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$N(\text{prim}) = \frac{V_{in(nom)} * 10^8}{4 * f * B_{max} * A_c} \quad (3 - 3)$$

که در آن:

N_{prim} : تعداد دور سیم‌پیچ اولیه

$V_{in(nom)}$: متوسط ولتاژ ورودی که ۱۰ ولت در نظر گرفته شد.

F : فرکانس سوئیچینگ که ۱۰۰ کیلوهرتز می‌باشد.

B_{max} : حداکثر چگالی شار برحسب گاوس^۱ که استانداردترین و متداول‌ترین مقدار برای هسته‌های فریت در حدود ۱۳۰۰ الی ۲۰۰۰ گاوس (هر گاوس برابر ۰.۰۰۰۱ تسلا^۲) است که در این تحقیق ۱۵۰۰ گاوس در نظر گرفته شد.

A_c : مساحت سطح مقطع هسته برحسب cm^2 است. این پارامتر را می‌توان از دیتاشیت هسته‌های فریت پیدا کرد. هسته‌ی انتخاب‌شده EER4215 با سطح مقطع $0.455cm^2$ می‌باشد.

در محاسبه مقدار عملی، تعداد دور سیم‌پیچ اولیه برابر است با:

$$N(\text{prim}) = \frac{10 * 10^8}{4 * 100 * 10^3 * 1500 * 0.455} = 3.66$$

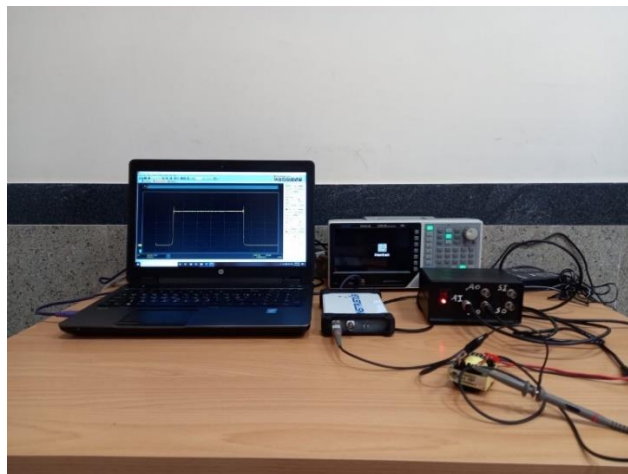
از آنجاکه عدد ۳.۶۶ عدد صحیح نمی‌باشد و پیاده‌سازی آن در عمل سخت است، تعداد دور اولیه برابر با ۴ در نظر گرفته شد. البته قبل از نهایی کردن این عدد، باید B_{max} در این تعداد دور مقدار مطلوبی داشته باشد؛ بنابراین لازم است مجدداً تعداد دور ۴ برای این پارامتر موردبررسی قرار گیرد.

$$V_{in(nom)} = 10, f = 100 * 10^3, N_{prim} = 4, A_c = 0.455$$

1- Gauss
2- Tesla

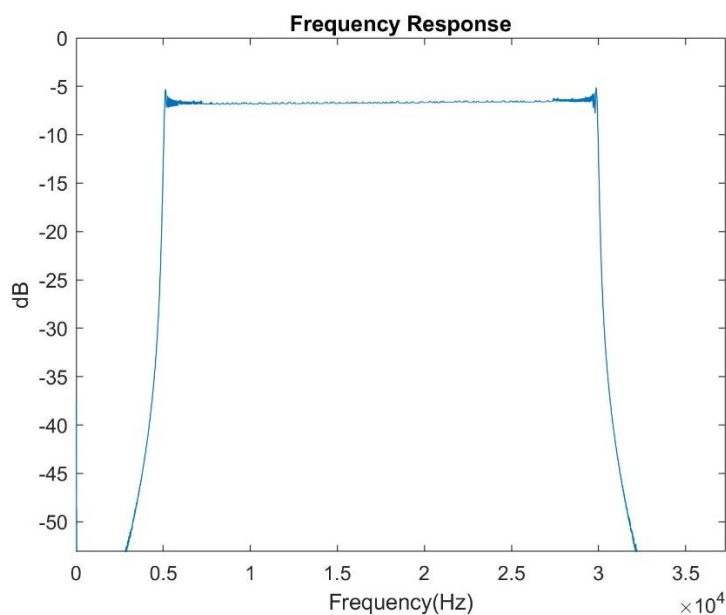
دامنه سیگنال تولیدشده توسط فانکشن ژنراتورها بین ۱۰ تا ۲۰ ولت است که برای افزایش دامنه‌ی ولتاژ تولیدی به یک تقویت کننده ولتاژ نیاز است. در این تحقیق از یک ترانس دوازده برابر کننده ولتاژ با هسته‌ی فریت برای تقویت دامنه سیگنال استفاده شده است. هم‌چنین فانکشن ژنراتور توانایی تولید سیگنال چیرپ^۱ را دارد. سیگنال چیرپ یک ولتاژ با دامنه ثابت است که فرکانس آن به‌طور مداوم در حال افزایش می‌باشد. جریان خروجی فانکشن ژنراتور ۲۰۰ میلی‌آمپر است، به همین دلیل نمی‌توان فانکشن را مستقیماً به ترانسفورماتور وصل کرد زیرا دستگاه جریان زیادی می‌کشد و آسیب جدی به آن وارد می‌شود، به همین دلیل برای تقویت جریان خروجی از یک آمپلی‌فایر ۳۰ وات با دامنه‌ی ۱۰ ولت سر راه ترانس استفاده شده است.

همان‌طور که در بالا اشاره شد، ولتاژ تحریک چیرپ توسط فانکشن تولیدشده و پس از تقویت جریان به کمک آمپلی‌فایر به انتهای یک سیم‌پیچ ترانسفورماتور متصل می‌شود و سیگنال بازگشتی از انتهای دیگر سیم‌پیچ توسط اسیلوسکوپ سنجیده می‌شود. شکل ۳-۵ تجهیزات استفاده شده برای این تست را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۵ تجهیزات تست ترانسفورماتور

باید اطمینان حاصل شود که دامنه این سیگنال در تمامی فرکانس‌ها یکسان باشد؛ زیرا برای فعالیت در حوزه فرکانس باید تمامی سیگنال‌های ورودی با دامنه‌ی یکسان باهم مقایسه شوند که در صورت وجود خطا قابل تشخیص باشد. حال اگر خروجی ترانسفورماتور دامنه مشابه نداشته باشد، دیگر نتایج مقایسه قابل قبول نمی‌باشد. این نتیجه‌گیری با رسم پاسخ فرکانسی ترانس امکان‌پذیر است که باید به صورت خط صاف باشد. هرگونه انحراف نشان‌دهنده تغییرات هندسی و یا الکتریکی درون ترانسفورماتور است.



شکل ۳-۶ پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور در بازه 5-30 kHz و ولتاژ 70 ولت

پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور با سیگنال چیرپ در بازه فرکانسی 5-30kHz و ولتاژ 70 ولت در شکل ۳-۶، بیانگر صحت درستی ترانسفورماتور استفاده‌شده در این تحقیق می‌باشد.

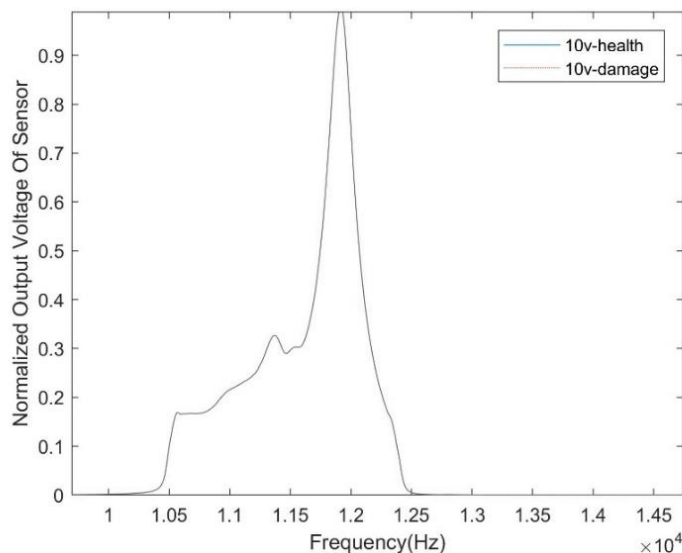
۳-۵ بررسی نتایج آزمایشگاهی روش خطی

در این تحقیق، آسیب واردشده به سازه شل شدگی پیچ در نظر گرفته‌شده که باعث برخورد پیچ با بستر سازه می‌شود. این برخورد، موجب ایجاد ارتعاش شده و تغییراتی در پاسخ فرکانسی سازه به وجود می‌آورد. با ارزیابی پاسخ فرکانسی می‌توان به وجود عیب پی برد؛ اما این تغییرات مستلزم وجود ولتاژ ورودی با دامنه بالا می‌باشد که در روش خطی به خاطر دامنه تحریک پایین، قدرتی برای تحریک پیچ و برخورد با سازه

وجود ندارد. در نتیجه شناسایی آسیب امکان پذیر نیست. در ادامه، برای بیان صحت مطالب گفته شده نتایج آزمایشگاهی انجام شده، آورده شده است.

در مرحله اول پیچ نصب شده بر روی صفحه آلومینیومی کاملاً بسته است که حالت سالم سازه می باشد. حداکثر ولتاژ اعمالی به پیزو در حالت خطی، به صورت سیگنال چیرپ با دامنه ۱۰ ولت می باشد. فرکانس طبیعی در بازه ۱۰.۵ تا ۱۲.۴ کیلوهرتز از طریق فانکشن ژنراتور به پیزو اعمال می شود. خروجی پیزو توسط اسیلوسکوپ با کابل به لپ تاپ منتقل شده و داده های خروجی با برنامه Multi Vir Analyzer به صورت فایل اکسل در نرم افزار متلب اجرا شده و پس از نرمالیزه کردن داده ها پاسخ فرکانسی حالت سالم رسم می شود. در مرحله دوم، پیچ به مقدار کمی باز شده که حالت عیب ریز سازه می باشد. سپس مراحل بالا با همان ولتاژ و فرکانس تکرار می شود.

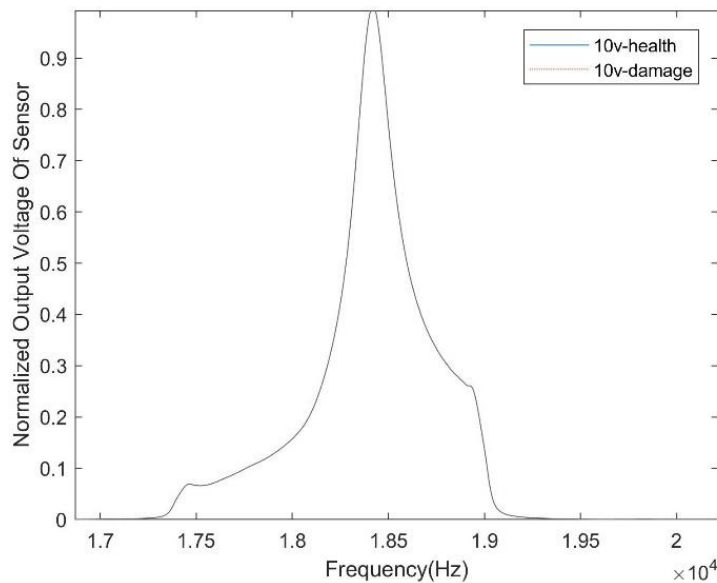
برای مقایسه حالت سالم و معیوب، پاسخ فرکانسی مرحله اول و دوم در یک صفحه و در شکل ۳-۷ رسم شده است. مشاهده می شود که پاسخ فرکانسی در هر دو حالت کاملاً روی هم قرار گرفته که در این صورت تشخیص عیب ممکن نمی باشد.



شکل ۳-۷ پاسخ فرکانسی سازه سالم و معیوب در بازه 10.5-12.4kHz

مراحل صفحه قبل، در بازه‌های فرکانسی دیگر هم تکرار شده و باز همان نتایج به دست آمده است. شکل ۸-

۳ نشان دهنده حالت سالم و معیوب سازه در بازه ۱۷ تا ۱۹ کیلوهرتز می‌باشد.



شکل ۸-۳ پاسخ فرکانسی سازه سالم و معیوب در بازه 17-19kHz

به دلیل تشابه پاسخ فرکانسی، حالت سالم و معیوب در ولتاژ ۱۰ ولت، در فصل‌های بعد برای جلوگیری از تکرار نتایج در تصاویر، یکی از حالت‌ها در نتایج گزارش شده است.

۳-۶ بررسی نتایج آزمایشگاهی روش غیرخطی

روش غیرخطی که روش پیشنهادی در این تحقیق می‌باشد به دلیل ولتاژ تحریک ورودی بالا، قادر به شناسایی آسیب‌های ریز می‌باشد.

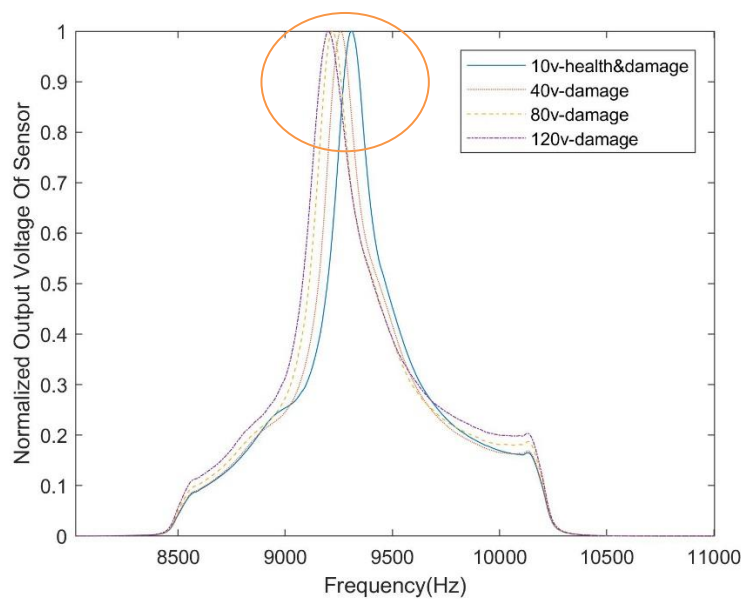
در این تحقیق شناسایی آسیب با دو روش که از طریق تحلیل پاسخ فرکانسی صورت گرفته است، انجام شده است. روش اول شیفت فرکانسی و روش دوم وجود هارمونیک‌های فرعی اطراف هارمونیک اصلی است.

۱-۶-۳ شیفت فرکانسی

در مرحله اول، پیچ کاملاً بسته است که حالت سالم سازه می‌باشد. در این مرحله، سیگنال چیرپ با دامنه‌ی ۱۰ ولت در طیف فرکانسی ۸.۵ تا ۱۰.۵ کیلوهرتز، به PZT اعمال شد و داده‌های جمع‌آوری شده همانند روش خطی به کمک برنامه متلب مورد بررسی قرار گرفت.

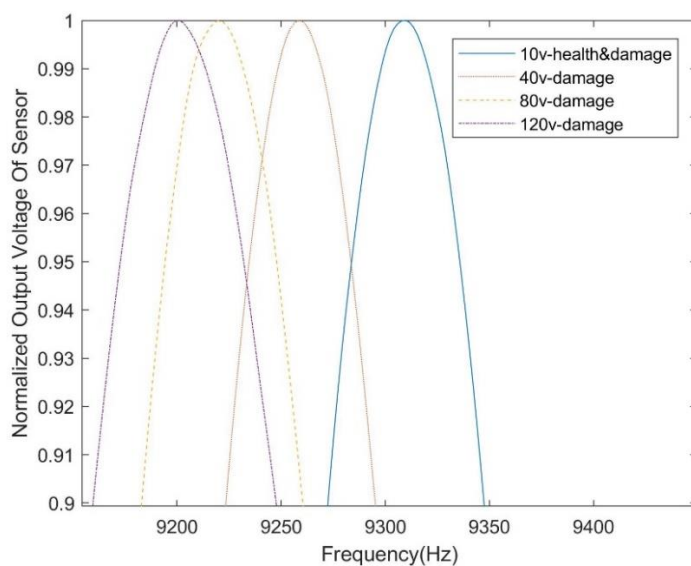
مرحله اول برای دامنه ۸۰،۴۰ و ۱۲۰ ولت تکرار شد. نتایج کاملاً مشابه با دامنه ۱۰ ولت به دست آمده آمد. برای جلوگیری از تکرار در نتایج فقط حالت سالم با ولتاژ ۱۰ ولت در گزارشات ثبت شده است. مرحله دوم، پیچ در حد بسیار کم شل شده و سیگنال چیرپ در بازه فرکانسی ۸.۵ تا ۱۰.۵ کیلوهرتز و دامنه ۴۰ ولت به پیزو اعمال می‌شود؛ و مراحل قبل تکرار می‌شود.

مرحله سوم و چهارم مشابه مرحله دوم می‌باشد، فقط دامنه سیگنال چیرپ یک‌بار ۸۰ ولت و بار دیگر ۱۲۰ ولت است. بعد از جمع‌آوری داده‌ها و رسم پاسخ فرکانسی در متلب، نتایج با پاسخ فرکانسی پیچ در حالت سالم مقایسه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۹-۳ مشاهده می‌شود در حالت سالم پاسخ فرکانسی کاملاً متقارن می‌باشد. در حالتی که ولتاژ اعمالی ۱۰ ولت است، به خاطر پایین بودن دامنه تحریک پاسخ فرکانسی با حالت سالم کاملاً مشابه است ولی با افزایش ولتاژ، تقارن کم‌تر شده که این تغییر نشان‌دهنده‌ی وجود عیب در سازه می‌باشد.



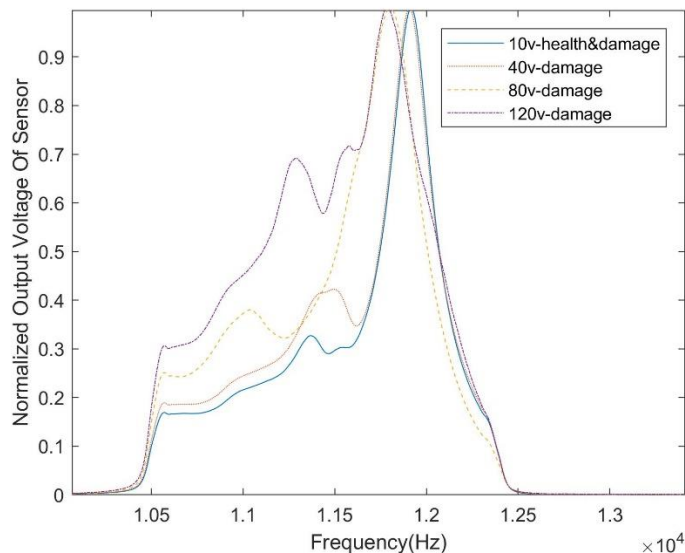
شکل ۹-۳ پاسخ فرکانسی سازه در بازه 8.5-10.5kHz

برای وضوح بالاتر در تشخیص تفاوت حالت سالم و معیوب، قسمتی که در شکل ۹-۳ دور آن خط کشیده شده بزرگ‌نمایی بیشتری انجام شده است که در شکل ۱۰-۳ قابل مشاهده است. تفاوت پاسخ فرکانسی‌های رسم شده کاملاً مشخص می‌باشد و مشاهده می‌شود هرچه ولتاژ افزایش می‌یابد شناسایی آسیب راحت‌تر است.

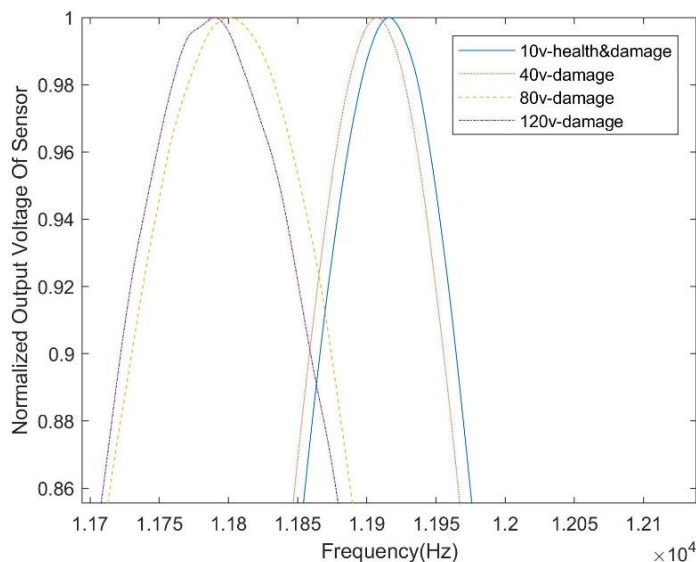


شکل ۱۰-۳ بزرگ‌نمایی پاسخ فرکانسی در بازه 8.5-10.5kHz

مراحل اول تا چهارم در بازه‌های فرکانسی مختلف تکرار شده است. شکل ۱۱-۳ و ۱۲-۳ در بازه فرکانسی ۱۰.۵ تا ۱۲.۴ کیلوهرتز می‌باشد و نشان می‌دهد که روش غیرخطی در فرکانس‌های بالاتر هم نتایج قابل-قبولی در شناسایی آسیب دارد.



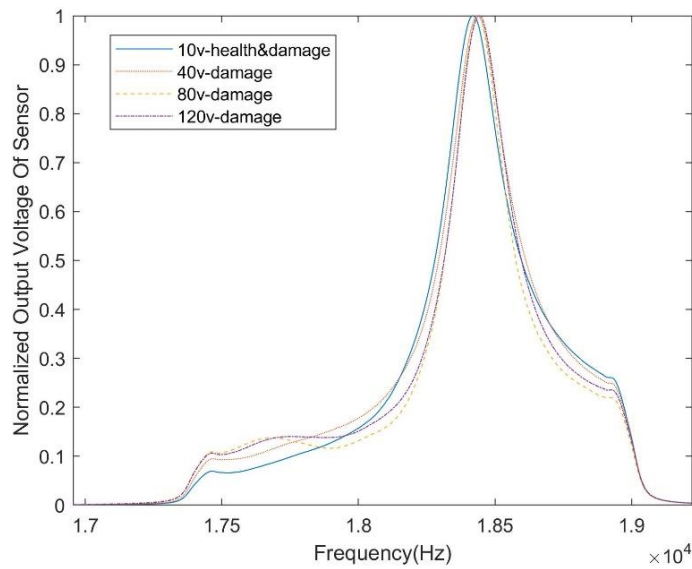
شکل ۱۱-۳ پاسخ فرکانسی سازه در بازه ۱۰.۵-۱۲.۴kHz



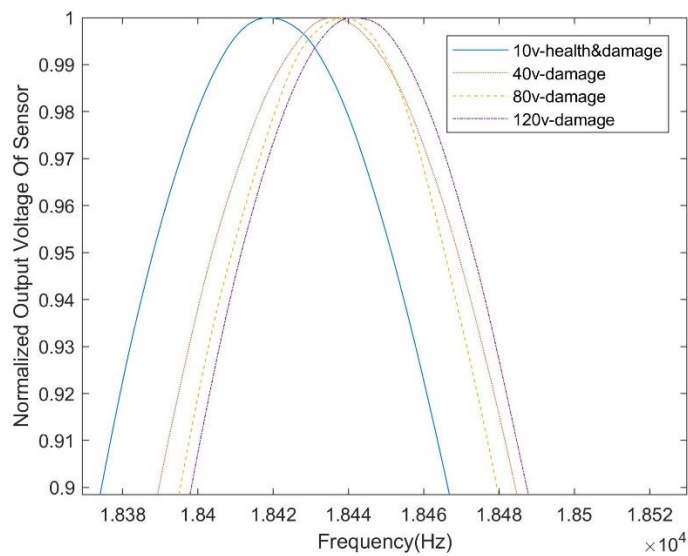
شکل ۱۲-۳ بزرگ‌نمایی پاسخ فرکانسی در بازه فرکانسی ۱۰.۵-۱۲.۴kHz

شکل ۱۳-۳ و ۱۴-۳ در بازه‌ی ۱۷.۴ تا ۱۹ کیلوهرتز رسم شده است. دلیل عدم افزایش ولتاژ ۱۲۰ ولت در حالت معیوب شکل ۱۴-۳، به خاطر نوع شاخص عیب می‌باشد. در صورتی که شاخص عوض شود مانند

مراحل قبل روند افزایشی ایجاد می شود.



شکل ۱۳-۳ پاسخ فرکانسی سازه در بازه 17.4-19kHz



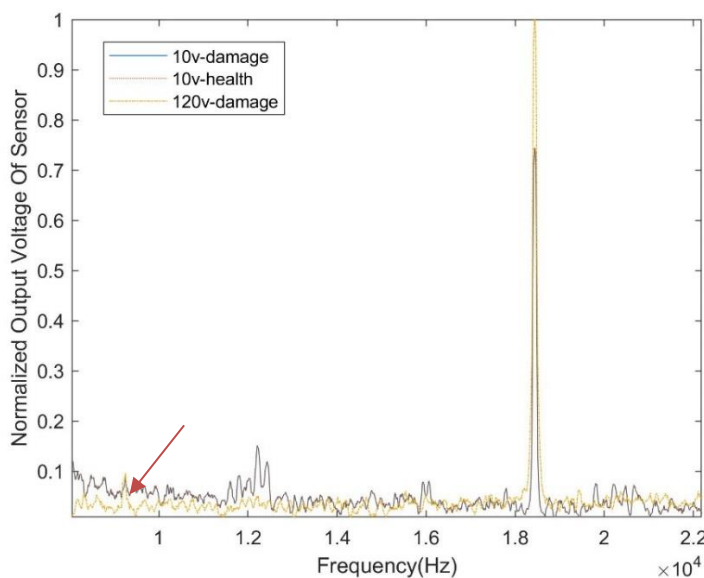
شکل ۱۴-۳ بزرگ‌نمایی پاسخ فرکانسی در بازه فرکانسی 17.4-19kHz

با توجه به نتایج به دست آمده با افزایش ولتاژ تغییرات فرکانسی در تمامی بازه‌های فرکانسی هم افزایش می‌یابد.

۲-۶-۳ ایجاد هارمونیک اطراف هارمونیک اصلی

برخلاف روش قبل که از بازه فرکانسی برای تحریک پیرو و تشخیص آسیب استفاده شد، در این روش تحریک در یک فرکانس مشخص ایجاد شده که باعث ظاهر شدن زیرهارمونیک در اطراف پیک اصلی می‌شود. فاصله این پیک‌ها با پیک اصلی به اندازه $\frac{F_0}{n}$ می‌باشد. F_0 فرکانس طبیعی تحریک و n عدد صحیح است که در آن پیک اصلی سیگنال ایجاد شده. ظهور این پیک‌ها بیانگر وجود عیب در سازه می‌باشد.

مراحل کار همانند روش ۱-۶-۳ است با این تفاوت که یک فرکانس مشخص برای تحریک به پیرو اعمال شده است. شکل ۱۳-۳ پاسخ فرکانسی در فرکانس 18kHz رسم شده است و مشاهده می‌شود که با اعمال ولتاژ ۱۲۰ ولت، یک پیک در فرکانس $\frac{F_0}{2} = 9kHz$ ظاهر شده است. این پیک اضافی در حالت سالم و حالت آسیب‌دیده با ولتاژ ۱۰ ولت وجود ندارد. همین تفاوت بیانگر وجود آسیب در سازه می‌باشد.



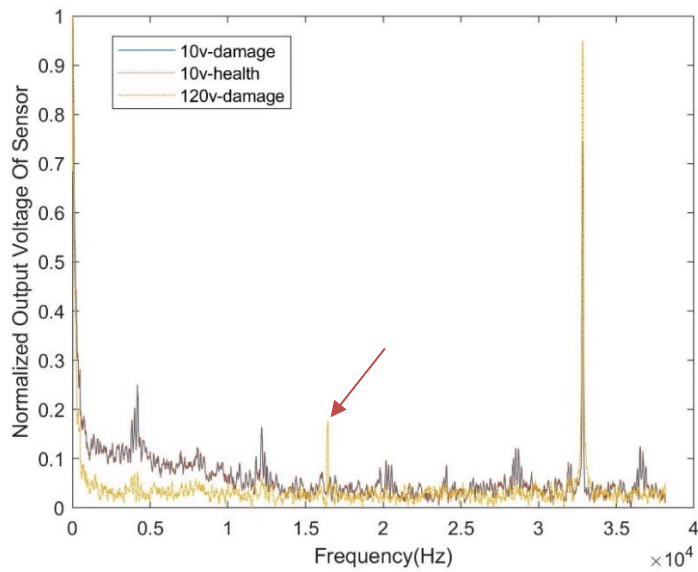
شکل ۱۵-۳ پاسخ فرکانسی سازه سالم و معیوب در فرکانس 18kHz

در مرحله بعدی، فرکانس تحریک افزایش داده شده و پاسخ فرکانسی آن در شکل ۱۶-۳ رسم شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیک ظاهر شده در فرکانس $\frac{F_0}{2} = 17 kHz$ ایجاد شده است. دامنه این

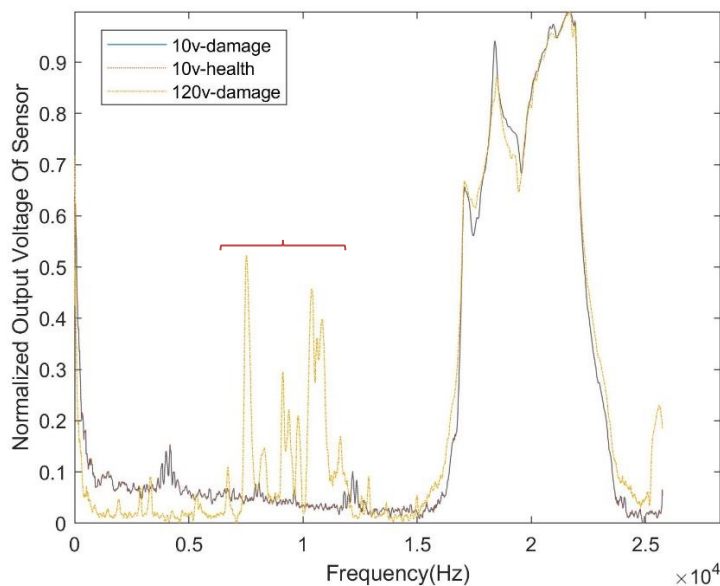
پیک نسبت به فرکانس 18kHz در مرحله قبل بیشتر است و تشخیص عیب را برای این نوع سازه و عیب

راحت‌تر می‌کند.



شکل ۱۶-۳ پاسخ فرکانسی سازه سالم و معیوب در فرکانس 32kHz

در مرحله‌ی بعدی همانند روش شیفت فرکانسی، فرکانس تحریک به صورت یک بازه از ۱۷ تا ۲۲ کیلوهرتز به سازه اعمال شده است و با توجه به نتایج شکل ۱۷-۳، مشاهده می‌شود هارمونیک‌های ایجاد شده در اطراف پیک اصلی هم به صورت یک بازه در فرکانس $\frac{F_0}{n}$ ظاهر شده است. بازه‌ی هارمونیک ایجاد شده در فرکانس ۸.۵ تا ۱۱ کیلوهرتز شناسایی عیب را آسان تر کرده است.



شکل ۱۷-۳ پاسخ فرکانسی سازه سالم و معیوب در بازه 17-22kHz

فصل ۲۴ : نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۴ نتیجه‌گیری

پایش سلامت سازه فرایند تشخیص آسیب برای زیرساخت‌های مهندسی، با استفاده از اندازه‌گیری پاسخ‌های یک ساختار در حین کار است. شناسایی آسیب در زمان مناسب، تأثیر مثبت و قابل توجهی بر ایمنی ساختار سازه دارد و ضمن کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، باعث افزایش طول عمر سازه نیز می‌شود. در پایش سلامت سازه مبتنی بر روش امپدانس الکترومکانیکی، از نتایج پاسخ فرکانسی پیزو برای عیب‌یابی استفاده می‌شود.

تشخیص آسیب‌های کوچک در سازه آسان است که با روش‌های خطی می‌توان از آن‌ها برای نشان دادن وقوع آسیب سازه استفاده کرد؛ اما موضوع اصلی و نگران‌کننده، برای تشخیص آسیب‌های جزئی، به‌ویژه در سازه‌های پیچیده و بزرگ است که به دلیل دامنه تحریک ورودی پایین روش‌های خطی در این زمینه معتبر نمی‌باشند. در این تحقیق با بهره‌گیری از روش غیرخطی آسیب‌های بسیار جزئی شناسایی شد. افزایش ولتاژ تحریک ورودی باعث ایجاد تغییرات قابل توجهی در اطراف و خود فرکانس طبیعی شد و رفتار غیرخطی در ناحیه تشدید ظاهر شد.

به همین دلیل فعالیت‌های انجام‌شده در این تحقیق برای تشخیص آسیب شل شدن جزئی پیچ بر اساس تجزیه و تحلیل پاسخ‌های امپدانس الکتریکی به کمک مبدل پیزوالکتریک تعبیه‌شده بر روی سازه صورت پذیرفت. پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده از مبدل پیزوالکتریک مستقیماً برای تجزیه و تحلیل و شناسایی آسیب استفاده شد. نتایج حساسیت در تقارن پاسخ فرکانس طبیعی و وجود هارمونیک در اطراف هارمونیک اصلی در پاسخ‌های امپدانس ارزیابی شد که گواهی برای وجود آسیب در سازه می‌باشد.

آزمایش‌های انجام‌شده نشان داد که مقادیر پیش‌بینی‌شده به‌خوبی با نتایج تست‌ها مطابقت دارد و در نهایت نتایج، بهبود مدل‌سازی غیرخطی در مقایسه با مدل‌های خطی رایج را ارائه داد. روش فوق، یک رویکرد جدید شناسایی آسیب با روش غیرخطی مبتنی بر امپدانس الکتریکی است که با ارائه نتایج در فصل‌های قبل صحت و درستی روش پیشنهادی نشان داده شد. همان‌طور که مشاهده شد، روش خطی

روش قابل قبول برای تشخیص عیوب ریز در سازه نمی باشد و روش غیرخطی مبتنی بر امپدانس الکتریکی، یک روش قابل اطمینان برای ارزیابی سلامت سازه است.

۲-۴ پیشنهادات

برای بررسی روش ارائه شده می توان نوع عیب را نیز تغییر داد و مراحل انجام شده را برای انواع عیب از جمله خستگی و عیوب دیگری که ممکن است در سازه ایجاد شود هم ارزیابی کرد؛ زیرا هنگامی که آسیبی در سازه ایجاد می شود سختی سازه تغییر می کند پس با توجه به آسیب وارد شده ممکن است نتایج مختلفی به دست آید.

برای بهبود نتایج حاصل، می توان مراحل کار را افزایش داد به طور مثال موقعیت آسیب وارد شده به سازه تحلیل و بررسی شود. مورد بعدی تعیین شدت آسیب است که در صورت تشخیص می توان کمک زیادی به طول عمر سازه داشت.

بررسی و جبران اثرات دمایی و اثرات ارتعاشات محیطی وارد شده بر سازه از جمله پیشنهادات دیگر برای بهبود نتایج می باشد.

منبع

- [1] L. Alonso, J. Barbarán, J. Chen, M. Díaz, L. Llopis, and B. Rubio, “Middleware and communication technologies for structural health monitoring of critical infrastructures: A survey,” *Comput. Stand. Interfaces*, vol. 56, no. March 2017, pp. 83–100, 2018, doi: 10.1016/j.csi.2017.09.007.
- [2] W. Prosser, M. Wu, S. Allison, and S. DeHaven, “Structural health monitoring sensor development at NASA Langley Research Center,” 2003, Accessed: Nov. 20, 2021. [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.871.8558&rep=rep1&type=pdf>.
- [3] X. P. Qing, H. L. Chan, S. J. Beard, T. K. Ooi, and S. A. Marotta, “Effect of adhesive on the performance of piezoelectric elements used to monitor structural health,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 26, no. 8, pp. 622–628, 2006, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2005.10.002.
- [4] P. Selva, O. Cherrier, V. Budinger, F. Lachaud, and J. Morlier, “Smart monitoring of aeronautical composites plates based on electromechanical impedance measurements and artificial neural networks,” *Eng. Struct.*, vol. 56, pp. 794–804, 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2013.05.025.
- [5] S. Liu, M. Tomizuka, ... G. U.-C. and H. M., and undefined 2006, “Strategic issues in sensors and smart structures,” *Wiley Online Libr.*, vol. 13, no. 6, pp. 946–957, Nov. 2006, doi: 10.1002/stc.88.
- [6] R. W. Ross, *Integrated vehicle health management in aerospace structures*. Elsevier, 2016.
- [7] C. Farrar, N. Lieven, M. B.-D. prognosis for, and undefined 2005, “An introduction to damage prognosis,” *books.google.com*, Accessed: Nov. 19, 2021. [Online]. Available: <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=hWsy-Lj-hmEC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Damage+Prognosis+Workshop&ots=AhZwGM6-Pw&sig=ShMg7BaEFiitaGraLCKtiOtyxxY>.
- [8] D. J. Inman, C. R. Farrar, V. Lopes, and V. Steffen, *Damage Prognosis: For Aerospace, Civil and Mechanical Systems*. 2005.
- [9] F. N. Catbas, *Structural health monitoring: Applications and data analysis*. Woodhead Publishing Limited, 2009.
- [10] S. Health, M. Principlesconcepts, and T. U. States, “Introduction 1.1,” doi:

- 10.1016/B978-0-12-088760-6.50002-7.
- [11] S. Doebling, C. Farrar, M. P.-S. and vibration digest, and undefined 1998, “A summary review of vibration-based damage identification methods,” *Citeseer*, Accessed: Nov. 19, 2021. [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.57.9721&rep=rep1&type=pdf>.
- [12] C. R. Farrar and K. Worden, “An introduction to structural health monitoring,” *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 365, no. 1851, pp. 303–315, Feb. 2007, doi: 10.1098/RSTA.2006.1928.
- [13] C. R. Farrar and N. A. J. Lieven, “Damage prognosis: The future of structural health monitoring,” *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 365, no. 1851, pp. 623–632, Feb. 2007, doi: 10.1098/RSTA.2006.1927.
- [14] H. Li, D. Ai, H. Zhu, and H. Luo, “An Orthogonal Matching Pursuit based signal compression and reconstruction approach for electromechanical admittance based structural health monitoring,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 133, p. 106276, 2019, doi: 10.1016/j.ymsp.2019.106276.
- [15] W. Roth and V. Giurgiutiu, “Structural health monitoring of an adhesive disbond through electromechanical impedance spectroscopy,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 73, pp. 109–117, 2017, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2016.11.008.
- [16] H. Rocha, C. Semprinoschnig, and J. P. Nunes, “Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites: A review,” *Eng. Struct.*, vol. 237, no. April, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112231.
- [17] G. Wang, C. Tan, F. L.-S. and A. A. Physical, and undefined 2017, “A contact resonance viscometer based on the electromechanical impedance of a piezoelectric cantilever,” *Elsevier*, Accessed: Nov. 20, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424717305939>.
- [18] N. Chattaraj, R. G.-M. of A. M. and, and undefined 2016, “Electromechanical analysis of piezoelectric bimorph actuator in static state considering the nonlinearity at high electric field,” *Taylor Fr.*, vol. 23, no. 7, pp. 802–810, Jul. 2015, doi: 10.1080/15376494.2015.1029168.
- [19] D. Mazeika, P. Vasiljev, S. Borodinas, ... R. B.-S. and A. A., and undefined 2018, “Small size piezoelectric impact drive actuator with rectangular bimorphs,”

- Elsevier*, Accessed: Nov. 20, 2021. [Online]. Available:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424717319404>.
- [20] H. Ghafarirad, S. M. Rezaei, A. A. D. Sarhan, and M. Zareinejad, “Continuous dynamic modelling of bimorph piezoelectric cantilevered actuators considering hysteresis effect and dynamic behaviour analysis,” *Math. Comput. Model. Dyn. Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 130–152, Mar. 2015, doi: 10.1080/13873954.2014.906472.
- [21] N. Jalili, *Piezoelectric-based vibration control: from macro to micro/nano scale systems*. 2009.
- [22] A. Erturk, D. I.-J. of vibration and, and undefined 2008, “A distributed parameter electromechanical model for cantilevered piezoelectric energy harvesters,” *asmedigitalcollection.asme.org*, Accessed: Nov. 20, 2021. [Online]. Available:
<https://asmedigitalcollection.asme.org/vibrationacoustics/article-abstract/130/4/041002/439241>.
- [23] A. Erturk and D. J. Inman, “An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 18, no. 2, 2009, doi: 10.1088/0964-1726/18/2/025009.
- [24] P. Chao, P. Liao, M. Tsai, C. L.-M. technologies, and undefined 2011, “Robust control design for precision positioning of a generic piezoelectric system with consideration of microscopic hysteresis effects,” *Springer*, Accessed: Nov. 20, 2021. [Online]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00542-011-1250-x.pdf>.
- [25] H. Ghafarirad, S. Rezaei, ... M. Z.-C. R., and undefined 2012, “Robust control with unknown dynamic estimation for multi-axial piezoelectric actuators with coupled dynamics,” *Elsevier*, Accessed: Nov. 20, 2021. [Online]. Available:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631072112001490>.
- [26] P. Shahabi, H. Ghafarirad, and A. Taghvaeipour, “Nonlinear vibration analysis of piezoelectric bending actuators: Theoretical and experimental studies,” *Comptes Rendus - Mec.*, vol. 347, no. 12, pp. 953–966, 2019, doi: 10.1016/j.crme.2019.10.007.
- [27] H. Ghafarirad, S. Rezaei, ... A. S.-... C. M. of, and undefined 2015, “Continuous dynamic modelling of bimorph piezoelectric cantilevered actuators considering hysteresis effect and dynamic behaviour analysis,” *Taylor Fr.*, vol. 21, no. 2, pp.

- 130–152, Mar. 2014, doi: 10.1080/13873954.2014.906472.
- [28] S. C. Stanton, A. Erturk, B. P. Mann, E. H. Dowell, and D. J. Inman, “Nonlinear nonconservative behavior and modeling of piezoelectric energy harvesters including proof mass effects,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 23, no. 2, pp. 183–199, Jan. 2012, doi: 10.1177/1045389X11432656.
- [29] A. Chattopadhyay, C. S.-C. P. B. Engineering, and undefined 1997, “A higher order theory for modeling composite laminates with induced strain actuators,” *Elsevier*, vol. 28, pp. 243–252, 1997, Accessed: Nov. 20, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836896000431>.
- [30] V. Hassani, T. T.-M. of A. M. and, and undefined 2017, “A hysteresis model for a stacked-type piezoelectric actuator,” *Taylor Fr.*, vol. 24, no. 1, pp. 73–87, Jan. 2015, doi: 10.1080/15376494.2015.1107668.
- [31] S. Leadenham and A. Erturk, “Unified nonlinear electroelastic dynamics of a bimorph piezoelectric cantilever for energy harvesting, sensing, and actuation,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 79, no. 3, pp. 1727–1743, Feb. 2015, doi: 10.1007/S11071-014-1770-X.
- [32] P. Shahabi, H. Ghafarirad, and A. Taghvaeipour, “High-frequency robust position control of a nonlinear piezoelectric bending actuator,” *JVC/Journal Vib. Control*, vol. 26, no. 17–18, pp. 1560–1573, 2020, doi: 10.1177/1077546319900851.
- [33] V. Esslinger, R. Kieselbach, ... R. K.-E. failure, and undefined 2004, “The railway accident of Eschede—technical background,” *Elsevier*, 2004, doi: 10.1016/j.engfailanal.2003.11.001.
- [34] H. J. Lim, H. Sohn, M. P. Desimio, and K. Brown, “Reference-free fatigue crack detection using nonlinear ultrasonic modulation under various temperature and loading conditions,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 45, no. 2, pp. 468–478, 2014, doi: 10.1016/j.ymsp.2013.12.001.
- [35] “The astonishing case of mesoscopic elastic nonlinearity - Google Scholar.” https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=The+astonishing+case+of+mesoscopic+elastic+nonlinearity&btnG= (accessed Nov. 20, 2021).
- [36] K. Y. Jhang, “Nonlinear ultrasonic techniques for non-destructive assessment of micro damage in material: A Review,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 10, no. 1, pp. 123–135, 2009, doi: 10.1007/S12541-009-0019-Y.

- [37] S. Stanton, A. Erturk, ... B. M.-J. of A., and undefined 2010, "Nonlinear piezoelectricity in electroelastic energy harvesters: modeling and experimental identification," *aip.scitation.org*, vol. 108, no. 7, p. 203901, Oct. 2010, doi: 10.1063/1.3486519.
- [38] "Meitzler A, Tiersten H, Warner A, Berlincourt D,... - Google Scholar." https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=Meitzler+A%2C+Tiersten+H%2C+Warner+A%2C+Berlincourt+D%2C+Couqin+G+and+Welsh+III+F+%281988%29.+IEEE+standard+on+piezoelectricity%2C+Society.&btnG= (accessed Dec. 02, 2021).
- [39] S. Kumar, *Smart materials for acoustic or vibration control*. 1991.
- [40] X. Fan, "Electromechanical Impedance-based Techniques for Structural Health Monitoring," no. June, 2018.
- [41] S. Kessler, S. Spearing, ... M. A. the first E. workshop on, and undefined 2002, "In-situ damage detection of composites structures using Lamb wave methods," *Citeseer*, Accessed: Dec. 02, 2021. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.451.9464&rep=rep1&type=pdf>.
- [42] V. Giurgiutiu and A. N. Zagrai, "Characterization of piezoelectric wafer active sensors," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 11, no. 12, pp. 959–976, Dec. 2001, doi: 10.1106/A1HU-23JD-M5AU-ENGW.
- [43] S.-W. Zhou, C. Liang, R. Associates, M. Asme, and C. A. Rogers, "An impedance-based system modeling approach for induced strain actuator-driven structures," 1996, Accessed: Dec. 02, 2021. [Online]. Available: <https://asmedigitalcollection.asme.org/vibrationacoustics/article/118/3/323/422136>.
- [44] C. Zhou, Z. Su, L. C.-S. materials and structures, and undefined 2011, "Probability-based diagnostic imaging using hybrid features extracted from ultrasonic Lamb wave signals," *iopscience.iop.org*, Accessed: Nov. 20, 2021. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/20/12/125005/meta>.
- [45] X. Qing, S. Beard, A. Kumar, ... K. S.-S. M. and, and undefined 2008, "The performance of a piezoelectric-sensor-based SHM system under a combined cryogenic temperature and vibration environment," *iopscience.iop.org*, Accessed: Nov. 20, 2021. [Online]. Available: [٤٢](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-</p>
</div>
<div data-bbox=)

1726/17/5/055010/meta.

- [46] N. Hu *et al.*, “Characterization of damage size in metallic plates using Lamb waves,” *Struct. Heal. Monit.*, vol. 11, no. 2, pp. 125–137, Mar. 2012, doi: 10.1177/1475921711414230.
- [47] X. Wang, G. Foliente, Z. Su, and L. Ye, “Multilevel decision fusion in a distributed active sensor network for structural damage detection,” *Struct. Heal. Monit.*, vol. 5, no. 1, pp. 45–58, Mar. 2006, doi: 10.1177/1475921706057981.
- [48] Z. Su, C. Yang, N. Pan, L. Ye, L. Z.-C. science and technology, and undefined 2007, “Assessment of delamination in composite beams using shear horizontal (SH) wave mode,” *Elsevier*, Accessed: Nov. 20, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353806002892>.
- [49] D. Y. Chowdary and M. Alapati, “Materials Today : Proceedings Effect of external vibrations on Electro-Mechanical impedance signatures in damage detection,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.794.
- [50] C. Liang, F. P. Sun, and C. A. Rogers, “Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems - determination of the actuator power consumption and system energy transfer,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 8, no. 4, pp. 335–343, 1997, doi: 10.1177/1045389X9700800406.
- [51] F. P. Sun, Z. Chaudhry, C. Liang, and C. A. Rogers, “Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 6, no. 1, pp. 134–139, 1995, doi: 10.1177/1045389X9500600117.
- [52] V. G. M. Annamdas and C. K. Soh, “Application of electromechanical impedance technique for engineering structures: Review and future issues,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 21, no. 1, pp. 41–59, Jan. 2010, doi: 10.1177/1045389X09352816.
- [53] G. Park, H. Sohn, C. Farrar, D. I.-S. and vibration digest, and undefined 2003, “Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward,” *Citeseer*, Accessed: Dec. 02, 2021. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.473.6535&rep=rep1&type=pdf>.
- [54] D. M. Peairs, G. Park, and D. J. Inman, “Improving accessibility of the impedance-based structural health monitoring method,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 15, no. 2, pp. 129–140, 2004, doi: 10.1177/1045389X04039914.

- [55] T. Huynh, N. Dang, J. K.-S. M. Maint, and undefined 2017, “Advances and challenges in impedance-based structural health monitoring,” *researchgate.net*, vol. 4, no. 4, pp. 301–329, 2017, doi: 10.12989/smm.2017.4.4.301.
- [56] Y. Yang, H. Liu, ... V. A.-S. M. and, and undefined 2009, “Monitoring damage propagation using PZT impedance transducers,” *iopscience.iop.org*, Accessed: Nov. 20, 2021. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/18/4/045003/meta>.
- [57] V. Giurgiutiu and A. Zagrai, “Damage detection in thin plates and aerospace structures with the electro-mechanical impedance method,” *Struct. Heal. Monit.*, vol. 4, no. 2, pp. 99–118, Jun. 2005, doi: 10.1177/1475921705049752.
- [58] Y. Zheng *et al.*, “Lamb waves and electro-mechanical impedance based damage detection using a mobile PZT transducer set,” *Ultrasonics*, vol. 92, pp. 13–20, 2019, doi: 10.1016/j.ultras.2018.06.008.
- [59] W. Na, J. B.- Sensors, and undefined 2018, “A review of the piezoelectric electromechanical impedance based structural health monitoring technique for engineering structures,” *mdpi.com*, doi: 10.3390/s18051307.
- [60] C. Liang, F. Sun, C. R.-S. M. and Structures, and undefined 1996, “Electro-mechanical impedance modeling of active material systems,” *iopscience.iop.org*, Accessed: Nov. 20, 2021. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/5/2/006/meta>.
- [61] D. Ai, H. Zhu, H. Luo, and J. Yang, “An effective electromechanical impedance technique for steel structural health monitoring,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 97–104, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.029.
- [62] K. K. Maurya, A. Rawat, and G. Jha, “Smart materials and electro-mechanical impedance technique: A review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 33, no. xxxx, pp. 4993–5000, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.831.
- [63] “bemporad2015.pdf.” .
- [64] “waddad2016.pdf.” .
- [65] P. Wriggers and T. Laursen, *Computational contact mechanics*. 2006.
- [66] M. Behzad, M. Alvandi, D. Mba, and J. Jamali, “A finite element-based algorithm for rubbing induced vibration prediction in rotors,” *J. Sound Vib.*, vol. 332, no. 21, pp. 5523–5542, 2013, doi: 10.1016/j.jsv.2013.05.016.

Abstract

Structural health monitoring is an area that has been widely considered by many aerospace, civil and mechanical engineers due to its importance and significant impact on increasing life safety and economic benefits. Among the various methods proposed in the field of structural health, the method based on electromechanical impedance, while being simple in the implementation stage, has provided acceptable results in identifying structural damage.

This method makes it possible to detect structural damage by examining the frequency response using piezoelectric transducers installed on the structure. In which the transducer acts simultaneously as an actuator and sensor, and by reducing the electrical wiring and the number of transducers, facilitates damage detection with ease of execution.

Despite the promising benefits, there are significant limitations in identifying small defects in the structure because the methods proposed so far were linear methods that could only detect large defects in the structure. To address the limitations, this dissertation has presented a new method in which the use of structural health monitoring based on nonlinear electromechanical method has reliably identified small damages caused in the structure. This is achieved by installing a piezoelectric converter on aluminum foil. And loosening the screw is considered damage. In order to detect the screw loosening damage, a voltage of 10 to 120 V at high frequencies up to about 32 kHz is applied to the structure and the piezoelectric frequency response is analyzed by two methods of frequency change and harmonic formation around the resonant frequency.

In order to detect screw looseness, the piezoelectric frequency response in the healthy and damaged state is compared. To do this, voltages of 10, 40, 80 and 120 volts with high frequencies in different ranges from about 8.5 to 32 kHz are applied to the structure. Comparing the obtained results, it is observed that in the linear method and voltage of 10 volts, there is no change in the frequency response of the healthy and damaged state, but by increasing the voltage and applying the nonlinear method, a significant change in the frequency response of the healthy state and damage occurs. These changes indicate damage to the structure. And the higher the applied voltage, the easier it is to detect damage.

Keywords:

Structural health monitoring, Nonlinear method, electrical impedance method, piezoelectric converter



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Mechatronics Engineering

**Design and implementation of structural health monitoring system by
nonlinear electromechanical impedance method**

By: Farzaneh Najafi Raad

Supervisor:
Dr. Naserodin Sepehry

Advisor:
Dr. Hamid Reza Amin Davar

February 2022