سازمان فضایی ایران
پژوهشگاه هوافضا

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

مهندسی هوافضا- مهندسی فضایی

شناسایی عیوب سازه براساس تحلیل انتشار امواج الاستیک

نام دانشجو

مهیار قمری

استاد راهنما

دکتر محمد طاهای ابدی

شهریور ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

سازمان فضایی ایران

پژوهشگاه هوافضا

نام و نام خانوادگی دانشجو: مهیار قمری

عنوان پایان‌نامه یا رساله: **شناسایی عیوب سازه براساس تحلیل انتشار امواج الاستیک**

تاریخ دفاع: ۱۳۹۰/۶/۳۰

رشته: مهندسی هوافضا

گرایش: مهندسی فضایی

هیئت داوران

۱- آقای دکتر محمد طاهای ابدی امضاء

۲- خانم دکتر فمیدا فلاح رجب‌زاده امضاء

۳- آقای دکتر سعید شکرالهی امضاء

مدیرتحصیلات تکمیلی پژوهشگاه هوافضا

دکتر فمیدا فلاح رجب‌زاده

تأییدیهٔ صحت و اصالت نتایج

اینجانب مهیار قمری به شمارهٔ دانشجویی ۸۷۲۱۱۰۶ دانشجوی رشتهٔ مهندسی فضایی مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیهٔ نتایج این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید پژوهشگاه هوافضاست و موارد نسخه‌برداری‌شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص پژوهشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض درخصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسئولیت هرگونه پاسخ‌گویی به اشخاص، اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی)، به عهدهٔ اینجانب خواهد بود و پژوهشگاه هیچ‌گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی دانشجو: مهیار قمری

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات پژوهشگاه هوافضا بلامانع است:

بهره‌برداری از این پایان‌نامه / رساله برای همکاران پژوهشگاه هوافضا بلامانع است.

بهره‌برداری از این پایان‌نامه / رساله برای سایرین با اخذ مجوز از معاون پژوهشی و استاد(ان) راهنما، بلامانع است.

نام دانشجو:	نام استاد راهنما:
مهیار قمری	دکتر محمد طاهای ابدی

سپاسگزاری

سپاس ویژه از استاد محترم و راهنمای ارجمندم، جناب آقای دکتر محمد طاهای ابدی که در کلیهٔ مراحل تدوین پایان‌نامه زحمات زیادی را متقبل شده‌اند و به جای *اندیشه‌ها، اندیشیدن را به من آموختند، همواره مدیون زحمات و خوبی‌هایشان خواهم بود.*

و از همه عزیزانی که در پژوهشگاه هوافضا مرا در تهیه و تکمیل پایان‌نامه کمک و یاری نمودند بویژه جناب آقای دکتر سید حامد هاشمی مهنه برای راهنمایی سودمند ایشان در استفاده از سیستم پردازش موازی و همچنین از جناب آقای دکتر سعید شکرالهی و سرکار خانم دکتر فمیدا فلاح رجب‌زاده برای داوری پایان‌نامه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

تقدیم

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید

به پاس عاطفهٔ سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران، بهترین پشتیبان است

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند.

این مجموعه را به پدر، مادر و خواهران عزیزم تقدیم می کنم.

چکیده

آشکارسازی سلامت سازه‌های هوافضایی در حین سرویس‌دهی آنها اهمیت زیادی دارد تا علاوه بر کاهش احتمال حوادث ناشی از شکست سازه و افزایش قابلیت اطمینان، زمان بازرسی تجهیزات کاهش یابد. ایجاد امواج الاستیک در سازه با استفاده از مبدل‌های پیزوالکتریک و بررسی نحوهٔ انتشار آنها در سازه یکی از روش‌هایی است که بدون نیاز به جداسازی قطعات از تجهیزات می‌تواند موقعیت عیوب احتمالی در آنها را شناسایی کند. در این تحقیق امواج الاستیک با استفاده از روش اجزای محدود در سازه‌ای ایجاد می‌شود که به سطوح خارجی آن مبدل‌های پیزوالکتریک متصل شده است و این روش برای شناسایی عیوب هندسی و ترک‌های سازه براساس نحوهٔ انتشار امواج الاستیک استفاده می‌شود. مبدل پیزوالکتریک به‌صورت مادهٔ ناهمسانگرد الاستیک خطی در نظر گرفته شده است که پاسخ آن براساس برهم کنش میدان تغییر شکل مکانیکی و میدان الکتریکی تعیین می‌شود. تحریک مبدل پیزوالکتریک دو دسته امواج لم متقارن و پادمتقارن ایجاد می‌کند که با سرعت مختلف در سازه منتشر می‌شود. ترک‌های سازه مطابق با شرایط واقعی به‌صورت ناپیوستگی‌هایی شبیه‌سازی می‌شود که سطوح ناپیوسته در اثر عبور امواج لم از یکدیگر می‌توانند جدا شوند یا بر روی یکدیگر می‌لغزد ولی از نفوذ سطوح ناپیوسته جلوگیری می‌شود. عملکرد این روش برای شناسایی عیوب هندسی مختلف با استفاده از مدل کرنش صفحه‌ای، مدل تک لایهٔ معادل و مدل سه‌بعدی بررسی می‌شود و ترک‌های عرضی سطحی و زیر سطحی و ترک‌های طولی با ابعاد مختلف برای شبیه‌سازی پدیدهٔ جدایش بین لایه‌ای بررسی می‌شود. آرایشی از مبدل‌های پیزوالکتریک برای تعیین موقعیت هندسی عیوب در ورق استفاده می‌شود. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد امواج لم ایجادشده نسبت به این عیوب بسیار حساس بوده و از انعکاس‌های آنها می‌توان با دقت مناسبی موقعیت عیوب سطحی و زیر سطحی سازه را تعیین کرد. کلیهٔ پارامترهای مؤثر بر عملکرد این روش آشکارسازی سلامت سازه تحلیل می‌شود و مقدار بهینهٔ آنها براساس هندسه و خواص سازه و مبدل‌های پیزوالکتریک تعیین می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تحلیل سلامت سازه، امواج الاستیک، امواج لم، پیزوالکتریک، تحلیل اجزای محدود

فهرست مطالب

۱- مقدمه ۱

۱-۱- روش‌های آشکارسازی سلامت سازه ۱

۱-۲- موج ۶

۱-۲-۱- امواج الاستیک ۷

۱-۲-۲- امواج لم ۹

۱-۳- روش‌های تولید امواج الاستیک ۱۱

۱-۳-۱- روش‌های آزمایش قطعات با امواج الاستیک ۱۴

۱-۴- مروری بر تحقیقات پیشین ۱۵

۱-۵- اهداف پایان‌نامه ۲۲

۱-۶- روند کلی پایان‌نامه ۲۳

۲- معادلات حاکم بر انتشار امواج لم ۲۵

۲-۱- مواد پیزوالکتریک ۲۵

۲-۱-۱- روابط حاکم بر مواد پیزوالکتریک ۲۸

۲-۲- معادلات حاکم بر انتشار امواج لم ۳۲

۲-۲-۱- حالت پتانسیلی معادله موج ۳۵

۲-۲-۲- امواج سه بعدی z ثابت ۳۶

۲-۲-۳- امواج لم ۳۹

۲-۲-۴- استخراج منحنی‌های پراکندگی ۴۶

۲-۳- نتیجه‌گیری ۴۷

۳- شبیه‌سازی امواج الاستیک ۴۸

۳-۱- نحوهٔ ایجاد امواج الاستیک در سازه ۴۸

۳-۲- روش شبیه‌سازی امواج لم ۴۹

۳-۳- شبیه‌سازی انتشار امواج لم در سازه سالم ۵۰

۳-۳-۱- شبیه‌سازی انتشار امواج لم در تیر ۵۱

۳-۴- شبیه‌سازی انتشار امواج لم در ورق ۵۸

۳-۴-۱- شبیه‌سازی انتشار امواج لم با تئوری تک لایه معادل در ورق مسطح ۵۸

۳-۴-۲- شبیه‌سازی انتشار امواج لم با مدل سه‌بعدی ۶۳

۳-۵- نتیجه‌گیری ۶۸

۴- شناسایی عیوب سازه بر اساس انتشار امواج لم ۶۹
۴-۱- شبیه‌سازی انتشار امواج لم در تیر معیوب ۷۰
۴-۱-۱- تحلیل انتشار امواج لم با وجود یک شیار عرضی در تیر ۷۱
۴-۱-۲- تحلیل انتشار امواج لم با وجود دو شیار عرضی در تیر ۷۶
۴-۱-۳- آشکارسازی ترک‌های تیر ۷۸
۴-۲- شبیه‌سازی انتشار امواج لم در ورق مسطح معیوب براساس تئوری تک‌لایه معادل ۸۶
۴-۲-۱- انتشار امواج لم در ورق با عیب مستطیلی شکل ۸۷
۴-۲-۲- انتشار امواج لم در ورق با عیب دایره‌ای شکل ۹۰
۴-۳- شبیه‌سازی انتشار امواج لم در ورق معیوب ۹۳
۴-۳-۱- آشکارسازی عیب دایره‌ای با استفاده از آرایشی از حسگرهای پیزوالکتریک ۹۸
۴-۳-۲- شناسایی ترک در ورق با استفاده از آرایشی از حسگرها ۱۰۵
۴-۴- مقایسهٔ نتایج مدل تک‌لایه معادل و مدل سه‌بعدی ۱۰۹
۴-۵- نتیجه‌گیری ۱۰۹
۵- بحث و بررسی ۱۱۱
۵-۱- عوامل موثر بر انتشار امواج لم ۱۱۱
۵-۲- انتخاب مادهٔ پیزوالکتریک ۱۱۲
۵-۲-۱- انتخاب مادهٔ محرک پیزوالکتریک ۱۱۲
۵-۲-۲- انتخاب مادهٔ حسگر پیزوالکتریک ۱۱۳
۵-۳- ابعاد مبدل پیزوالکتریک ۱۱۵
۵-۳-۱- ابعاد محرک پیزوالکتریک ۱۱۵
۵-۳-۲- ابعاد حسگر ۱۱۷
۵-۴- نوع پالس تحریک مبدل پیزوالکتریک ۱۱۸
۵-۵- تعداد سیکل‌های سیگنال تحریک مبدل پیزوالکتریک ۱۱۹
۵-۶- فرکانس تحریک مبدل پیزوالکتریک ۱۲۲
۵-۷- ولتاژ مبدل پیزوالکتریک ۱۲۵
۵-۸- نوع المان‌های سازه ۱۲۵
۵-۹- اندازهٔ المان‌های سازه ۱۲۷
۵-۹-۱- تأثیر اندازهٔ المان‌بندی در دقت تعیین محل ترک عرضی واقعی در سطح فوقانی ۱۲۹
۵-۱۰- نمو زمانی ۱۲۹

۵-۱۱- هندسهٔ عیب ۱۳۱
۵-۱۱-۱- شیار مثلثی ۱۳۱
۵-۱۱-۲- شیار مستطیلی ۱۳۲
۵-۱۱-۳- شیار دایره‌ای ۱۳۲
۵-۱۲- موقعیت عیب در ضخامت ۱۳۳
۵-۱۳- تأثیر محل عیوب بر انتشار امواج ۱۳۵
۵-۱۴- اندازهٔ عیب ۱۳۶
۵-۱۴-۱- کوچکترین اندازهٔ عیب قابل شناسایی ۱۳۶
۵-۱۴-۲- تغییر اندازهٔ پهنای شیار عرضی ۱۳۸
۵-۱۴-۳- تغییر اندازهٔ عمق شیار عرضی ۱۳۹
۵-۱۴-۴- کوچکترین اندازهٔ عمق ترک عرضی واقعی سطحی ۱۴۱
۵-۱۴-۵- کوچکترین اندازهٔ عمق ترک عرضی داخل سازه ۱۴۱
۵-۱۴-۶- کوچکترین اندازهٔ ترک طولی در داخل سازه ۱۴۲
۵-۱۵- اصطکاک سطح ناحیهٔ معیوب ۱۴۳
۵-۱۶- نتیجه‌گیری ۱۴۴
۶- نتیجه‌گیری ۱۴۶
۷- پیشنهادات ۱۵۰
۸- مراجع ۱۵۱
واژه‌نامه انگلیسی به فارسی ۱۵۶
واژه‌نامه فارسی به انگلیسی ۱۵۹

فهرست شکل‌ها

شکل (۱–۱) مقایسهٔ سیستم آشکارسازی سلامت سازه با بدن انسان [2] ۲

شکل (۱–۲) حادثه هواپیمای پرواز شمارهٔ ۲۴۳ خطوط هواپیمایی آلوها[4] ۲

شکل (۱–۳) تصویری از انفجار راکت دلتا ۲ [5] ۳

شکل (۱–۴) روش‌های آشکارسازی سلامت سازه الف) غیر فعال ب) فعال [5] ۴

شکل (۱–۵) قابلیت سیستم آشکارسازی سلامت سازه از راه دور ۶

شکل (۱–۶) انواع امواج الاستیک الف) امواج طولی ب) امواج برشی پ) امواج ریلی ج) امواج لاو [2] ۸

شکل(۱–۷) انواع امواج لم الف) موج متقارن ب) موج پادمتقارن ۹

شکل (۱–۸) فرآیند بررسی سلامت سازه براساس انتشار امواج الاستیک ۱۰

شکل (۱–۹) وابستگی امواج محوری، لم و خمشی به فرکانس[1] ۱۱

شکل (۱–۱۰) پروب معمولی ۱۲

شکل (۱–۱۱) پروب زاویه‌ای ۱۲

شکل (۱–۱۲) پروب دو کریستالی ۱۳

شکل (۱–۱۳) مقایسهٔ بین کاربرد اصلی‌ترین حسگرهای مورد استفاده در آشکارسازی سلامت سازه در الف) مهندسی عمران ب) مهندسی هوافضا [5] ۱۴

شکل (۲–۱) مادهٔ پیزوالکتریک الف) اثر معکوس ب) اثر مستقیم ۲۶

شکل (۲–۲) اشکال مختلف مبدل‌های پیزوالکتریک [8] ۲۷

شکل (۲–۳) الف) دوقطبی الکتریکی نامنظم کریستال پیزوالکتریک قبل از اعمال میدان الکتریکی ب) پلاریزاسیون دوقطبی‌های مواد پیزوالکتریک در اثر میدان الکتریکی شدید ۲۷

شکل (۲–۴) محورهای پلاریزاسیون و جهت حرکت محرک پیزوالکتریک [6] ۲۸

شکل (۲–۵) کرنش‌های مبدل پیزوالکتریک[52] ۳۲

شکل (۲–۶) شماتیک z ثابت[17] ۳۷

شکل (۲–۷) امواج صفحه‌ای z ثابت[1] ۳۸

شکل (۲–۸) شماتیک تولید امواج لم[42] ۳۹

شکل (۲–۹) ورق با ضخامت ۲d و مجهز شده به محرک پیزوالکتریک به طول ۲a تحت تحریک هارمونیک [1]. ۴۰

شکل (۲–۱۰) حرکت ذرات نسبت به صفحه میانی الف) حرکت متقارن ب) حرکت پادمتقارن [1] ۴۱

شکل (۲–۱۱) منحنی پراکندگی امواج لم متقارن در ورق آلومینیم با ضخامت ۲d [1] ۴۳

شکل (۲–۱۲) منحنی پراکندگی امواج لم پادمتقارن در ورق آلومینیم با ضخامت ۲d [1] ۴۴
شکل (۲–۱۳) سرعت گروه و سرعت فاز ۴۵
شکل (۲–۱۴) منحنی‌های پراکندگی سرعت گروه الف) متقارن ب) پادمتقارن[1] ۴۵
شکل (۲–۱۵) منحنی سرعت دسته‌ای از امواج لم متقارن و پادمتقارن مادهٔ آلومینیم نسبت به فرکانس تحریک. ۴۶
شکل (۳–۱) هندسه ورق و محرک پیزوالکتریک ۵۱
شکل (۳–۲) منحنی سرعت دسته‌ای از امواج لم متقارن و پادمتقارن مادهٔ آلومینیم نسبت به فرکانس تحریک.... ۵۳
شکل (۳–۳) الف) هندسهٔ اولیه المان بندی تیر ب) تغییر شکل تیر در اثر عبور امواج لم متقارن ج) تغییر شکل تیر در اثر عبور امواج لم پادمتقارن ۵۴
شکل (۳–۴) نحوهٔ انتشار امواج لم در تیر سالم ۵۵
شکل (۳–۵) ولتاژ حسگر پیزوالکتریک متصل به تیر سالم در زمان‌های مختلف ۵۶
شکل (۳–۶) مقایسهٔ جابه‌جایی عرضی سطح فوقانی تیر در زمان ۵۳ میکروثانیه با تحقیقات پیشین[14] و [28] ۵۸
شکل (۳–۷) هندسه و ابعاد ورق و موقعیت مبدل‌های پیزوالکتریک ۵۹
شکل (۳–۸) صحه‌گذاری انتشار امواج لم در ورق با تحریک مبدل پیزوالکتریک برای زمان‌های مختلف، ستون سمت راست نتایج تحلیل در تحقیق پیشین [26]، ستون سمت چپ نتایج شبیه‌سازی در این تحقیق ۶۲
شکل (۳–۹) ولتاژ حسگر پیزوالکتریک متصل به ورق سالم ۶۳
شکل (۳–۱۰) هندسه و ابعاد ورق و موقعیت اتصال محرک پیزوالکتریک ۶۴
شکل (۳–۱۱) منحنی سرعت دسته ای از امواج لم متقارن و پادمتقارن در مادهٔ آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر برحسب فرکانس تحریک ۶۵
شکل (۳–۱۲) انتشار امواج لم در ورق در اثر تحریک لایهٔ پیزوالکتریک در زمان‌های الف) قبل از تحریک ب) ۲۴ ج) ۶۰ و د) ۸۸ میکروثانیه پس از تحریک ۶۶
شکل (۳–۱۳) تغییر شکل المان‌بندی ورق سالم در اثر انتشار امواج لم متقارن و پادمتقارن ۶۷
شکل (۳–۱۴) ولتاژ حسگر پیزوالکتریک متصل به ورق سالم ۶۸
شکل (۴–۱) محل و اندازهٔ عیب در سازهٔ دارای یک شیار عرضی ۷۱
شکل (۴–۲) الف) المان‌بندی تیر قبل از انتشار امواج لم، ب) المان‌بندی محل شیار در زمان انتشار موج متقارن، ج) المان‌بندی محل شیار در زمان انتشار موج پادمتقارن ۷۲
شکل (۴–۳) نحوهٔ انتشار امواج لم در سطح فوقانی تیر دارای یک شیار عرضی در مرکز آن در زمان‌های مختلف. ۷۳
شکل (۴–۴) ولتاژ حسگر پیزوالکتریک برای تیر دارای یک شیار عرضی ۷۴
شکل (۴–۵) مقایسهٔ سیگنال حسگر در تیر سالم و تیر معیوب با یک شیار عرضی ۷۵
شکل (۴–۶) محل و اندازهٔ عیب در سازهٔ دارای دو شیار عرضی ۷۶

شکل (۴–۷) نحوهٔ انتشار امواج لم با وجود دو شیار در فاصلهٔ ۱۵۰ و ۲۵۰ میلی‌متر ۷۷
شکل (۴–۸) مقایسهٔ سیگنال دریافتی توسط حسگر در تیر سالم و تیر معیوب با دو شیار عرضی ۷۷
شکل (۴–۹) محل و اندازهٔ ترک عرضی در سازه ۷۹
شکل (۴–۱۰) ولتاژ حسگر پیزوالکتریک برای تیر دارای ترک با المان خطی ۸۰
شکل (۴–۱۱) ولتاژ حسگر پیزوالکتریک تیر سالم ۸۱
شکل (۴–۱۲) هندسهٔ المان‌بندی الف) مبدل‌های پیزوالکتریک و تیر در محل اتصال آن ب) تیر در محل ترک ... ۸۱
شکل (۴–۱۳) الف) المان‌بندی تیر دارای ترک عرضی قبل از انتشار امواج لم ب) تغییر شکل المان‌ها تحت اثر موج لم متقارن و ج) تغییر شکل المان‌ها تحت اثر موج لم پادمتقارن ۸۲
شکل (۴–۱۴) ولتاژ مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح تحتانی تیر دارای یک ترک عرضی در زمان‌های مختلف ۸۲
شکل (۴–۱۵) محل و اندازهٔ ترک عرضی در داخل تیر ۸۳
شکل (۴–۱۶) الف)تغییر شکل و باز شدن المان ها در ناحیهٔ ترک عرضی داخل سازه الف) در اثر عبور موج لم متقارن ب) در اثر عبور موج لم پادمتقارن ۸۴
شکل (۴–۱۷) ولتاژ لایهٔ پیزوالکتریک متصل به تیر دارای یک ترک عرضی به عمق نصف ضخامت تیر در داخل آن ۸۴
شکل (۴–۱۸) محل و اندازهٔ ترک طولی در داخل تیر ۸۵
شکل (۴–۱۹) تغییر شکل و باز شدن المان‌ها در ناحیهٔ ترک طولی در اثر عبور موج لم پادمتقارن ۸۵
شکل (۴–۲۰) ولتاژ لایهٔ پیزوالکتریک متصل به تیر دارای یک ترک طولی به طول ۱ میلی‌متر ۸۶
شکل (۴–۲۱) هندسه و ابعاد پوستهٔ معیوب، موقعیت عیب و محل اتصال مبدل‌های پیزوالکتریک ۸۷
شکل (۴–۲۲) نحوهٔ انتشار امواج لم در ورق معیوب با تحریک مبدل پیزوالکتریک در زمان های الف) ۳۰ ب) ۶۵ و ج) ۱۴۰ میکروثانیه، ستون سمت راست نتایج تحقیق پیشین [26]، ستون سمت چپ نتایج مدل ارائه‌شده ۸۹
شکل (۴–۲۳) مقایسهٔ ولتاژ حسگر پیزوالکتریک در ورق سالم و معیوب ۹۰
شکل (۴–۲۴) هندسه و ابعاد ورق و موقعیت عیب و محل اتصال مبدل پیزوالکتریک ۹۰
شکل (۴–۲۵) صحه‌گذاری انتشار امواج لم در ورق با تحریک مبدل پیزوالکتریک برای زمان‌های مختلف، ستون سمت راست نتایج تحقیق پیشین [22]، ستون سمت چپ نتایج شبیه‌سازی مدل ارائه‌شده ۹۲
شکل (۴–۲۶) هندسه و ابعاد ورق و موقعیت اتصال مبدل پیزوالکتریک ۹۳
شکل (۴–۲۷) انتشار امواج لم در ورق در اثر تحریک مبدل پیزوالکتریک در زمان‌های الف) ۳۰ ب) ۵۰ ج) ۷۵ د) ۸۰ ه) ۱۱۰ و) ۱۴۰ میکروثانیه ۹۵
شکل (۴–۲۸) تغییر شکل المان‌بندی ورق دارای عیب هندسی در اثر انتشار امواج لم الف) متقارن و ب) پادمتقارن ۹۶
شکل (۴–۲۹) جابه‌جایی عرضی حسگر پیزوالکتریک در دو حالت سالم و معیوب ورق ۹۷
شکل (۴–۳۰) محاسبهٔ محل عیب با استفاده از دو حسگر ۹۸

شکل (۴–۳۱) هندسه و ابعاد ورق و موقعیت اتصال محرک پیزوالکتریک..... ۹۹
شکل (۴–۳۲) انتشار امواج لم در ورق در اثر تحریک لایهٔ پیزوالکتریک در زمان‌های الف) قبل از تحریک ب) ۲۵ ج) ۵۰ و د) ۷۵ میکروثانیه..... ۱۰۰
شکل (۴–۳۳) طراحی آرایش مبدل‌های پیزوالکتریک دارای یک محرک و سه حسگر..... ۱۰۱
شکل (۴–۳۴) ولتاژ حسگرهای پیزوالکتریک متصل به ورق دارای یک سوراخ دایره ای الف) حسگر A ب) حسگر B ج) حسگر C..... ۱۰۳
شکل (۴–۳۵) مقایسهٔ درصد خطای موج پادمتقارن و نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی [22] در تعیین محل عیب..... ۱۰۴
شکل (۴–۳۶) مقایسهٔ درصد خطای موج متقارن و نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی [22] در تعیین محل عیب ۱۰۴
شکل (۴–۳۷) هندسه و ابعاد ورق دارای ترک و موقعیت اتصال مبدل‌های پیزوالکتریک..... ۱۰۶
شکل (۴–۳۸) انتشار امواج لم در ورق دارای ترک واقعی در زمان های الف) قبل از تحریک ب) ۲۵ ج) ۵۰ و د) ۷۵ میکروثانیه..... ۱۰۷
شکل (۴–۳۹) ولتاژ حسگرهای پیزوالکتریک متصل به ورق دارای یک سوراخ دایره ای الف) حسگر A ب) حسگر B ج) حسگر C..... ۱۰۸
شکل (۵–۱) تأثیر ثابت پیزوالکتریک ($\boldsymbol{d31}$) بر ولتاژ تحریک محرک پیزوالکتریک..... ۱۱۲
شکل (۵–۲) تأثیر ثابت دی‌الکتریک ($\boldsymbol{\varepsilon}$) بر ولتاژ مبدل پیزوالکتریک..... ۱۱۳
شکل (۵–۳) تأثیر مدول الاستیک صفحه‌ای $\boldsymbol{Ya11}$ بر ولتاژ مبدل پیزوالکتریک..... ۱۱۳
شکل (۵–۴) تأثیر $\boldsymbol{d31}$ بر توانایی پاسخ حسگر پیزوالکتریک..... ۱۱۴
شکل (۵–۵) تأثیر ضخامت حسگر پیزوالکتریک..... ۱۱۴
شکل (۵–۶) تأثیر مدول الاستیک بر توانایی پاسخ حسگر پیزوالکتریک..... ۱۱۴
شکل (۵–۷) جابه‌جایی عرضی نقطه‌ای واقع بر خط تقارن تیر و در زیر سطح لایهٔ پیزوالکتریک متصل به تیر..... ۱۱۶
شکل (۵–۸) سازه و لایهٔ پیزوالکتریک متصل به آن [8]..... ۱۱۶
شکل (۵–۹) جابه‌جایی عرضی نقطه ابتدایی تیر و لایهٔ پیزوالکتریک متصل به آن برای لایهٔ پیزوالکتریک به طول‌های الف) ۱/۶ میلی‌متر ب) ۳/۲ میلی‌متر ج) ۶/۴ میلی‌متر..... ۱۱۷
شکل (۵–۱۰) تأثیر طول حسگر بر سیگنال..... ۱۱۸
شکل (۵–۱۱) نحوهٔ انتشار امواج الف) بدون پراکندگی ب) پراکنده‌شونده [1]..... ۱۱۹
شکل (۵–۱۲) الف) سیگنال تحریک ب) تبدیل فوریه سیگنال تحریک..... ۱۱۹
شکل (۵–۱۳) تعداد سیکل‌ها سیگنال تحریک الف) ۷ سیکل ب) ۱۰ سیکل، تبدیل فوریهٔ سیگنال تحریک برای تعداد سیکل‌های ج) ۷ سیکل د) ۱۰ سیکل..... ۱۲۰
شکل (۵–۱۴) نمایش پارامترهای سیگنال تحریک..... ۱۲۱

شکل (۵–۱۵) تأثیر تعداد سیکل‌های سیگنال تحریک بر دامنهٔسیگنال تحریک ۱۲۱
شکل (۵–۱۶) تأثیر تعداد سیکل‌های سیگنال تحریک بر پهنای فرکانسی سیگنال تحریک ۱۲۲
شکل (۵–۱۷) محدودهٔ مناسب فرکانس تحریک براساس منحنی سرعت دسته ای از امواج لم متقارن و پادمتقارن مادهٔ آلومینیم ۱۲۳
شکل (۵–۱۸) منحنی سرعت دسته‌ای از امواج لم متقارن و پادمتقارن مادهٔ آلومینیم نسبت به فرکانس تحریک ۱۲۴
شکل (۵–۱۹) جابه‌جایی عرضی نقطه ابتدایی تیر و لایهٔ پیزوالکتریک متصل به آن در فرکانس‌های الف) ۵۰۰ کیلوهرتز ب) ۱۰۰۰ کیلوهرتز ۱۲۴
شکل (۵–۲۰) تأثیر مقدار ولتاژ تحریک بر سیگنال دریافتی از حسگر ۱۲۵
شکل (۵–۲۱) هندسه المان در ناحیهٔ معیوب الف) المان مثلثی ب) المان چهارضلعی ۱۲۶
شکل (۵–۲۲) بررسی اثر نوع المان بر انتشار امواج لم در تیر با یک شیار عرضی ۱۲۶
شکل (۵–۲۳) بررسی اثر اندازهٔ المان بر انتشار امواج لم در تیر با یک ترک عرضی الف) برابر طول موج ب) ۰/۱ طول موج پ) ۰/۰۵ طول موج ج) ۰/۰۲۵ طول موج ۱۲۸
شکل (۵–۲۴) تأثیر اندازهٔ المان‌بندی در دقت تعیین محل ترک عرضی ۱۲۹
شکل (۵–۲۵) بررسی اثر افزایش زمان نمو بر انتشار امواج لم در تیر با یک ترک عرضی برای نمونه‌های الف) برابر دوره تناوب ب) ۰/۱ دوره تناوب پ) ۰/۰۵ دوره تناوب ج) ۰/۰۲۵ دوره تناوب چ) ۰/۰۱۶ دوره تناوب ۱۳۰
شکل (۵–۲۶) جابه‌جایی عرضی نقطه‌ای واقع بر خط تقارن تیر و در زیر سطح لایهٔ پیزوالکتریک متصل به تیر دارای یک شیار مثلثی ۱۳۱
شکل (۵–۲۷) جابه‌جایی عرضی نقطه‌ای واقع بر خط تقارن تیر و در زیر سطح لایهٔ پیزوالکتریک متصل به تیر دارای یک شیار تحتانی ۱۳۲
شکل (۵–۲۸) تعیین محل عیب با هندسه دایره‌ای در وسط ضخامت تیر ۱۳۳
شکل (۵–۲۹) جابه‌جایی عرضی نقطه‌ای واقع بر خط تقارن تیر و در زیر سطح لایهٔ پیزوالکتریک متصل به تیر با یک شیار مستطیلی در الف) سطح فوقانی ب) وسط تیر ج) سطح تحتانی ۱۳۴
شکل (۵–۳۰) هندسهٔ تیر با دو شیار عرضی باریک ۱۳۵
شکل (۵–۳۱) مقایسهٔ سیگنال حسگر در تیر سالم و تیر معیوب با دو شیار عرضی ۱۳۵
شکل (۵–۳۲) هندسه مدل اجزای محدود برای عیوب با ابعاد مختلف ۱۳۷
شکل (۵–۳۳) جابه‌جایی عرضی نقطه ابتدایی تیر و لایهٔ پیزوالکتریک متصل به آن با وجود دو ترک عرضی الف) ترک اول برابر طول موج ب) ترک اول ۰/۱ طول موج ج) ترک اول ۰/۲۵ طول موج ۱۳۸
شکل (۵–۳۴) تأثیر تغییر پهنای شیار بر انتشار امواج لم ۱۳۹
شکل (۵–۳۵) تاثیر تغییر پهنای شیار بر انتشار امواج لم ۱۳۹

شکل (۵–۳۶) مقایسه سیگنال حسگر در تیرهای دارای شیارهای با عمق مختلف ۱۴۰
شکل (۵–۳۷) تاثیر تغییر عمق شیار بر انتشار امواج لم ۱۴۰
شکل (۵–۳۸) تأثیر تغییر عمق ترک عرضی در سطح فوقانی بر حداکثر دامنهٔ امواج لم انعکاسی ۱۴۱
شکل (۵–۳۹) تاثیر عمق ترک عرضی بر دامنهٔ موج لم متقارن و پادمتقارن انعکاسی ۱۴۲
شکل (۵–۴۰) تاثیر تغییر پهنای ترک طولی بر دامنهٔ موج لم پادمتقارن انعکاسی ۱۴۳
شکل (۵–۴۱) ولتاژ لایهٔ پیزوالکتریک متصل به تیر دارای یک ترک عرضی در سطح فوقانی به عمق ربـع ضـخامت تیر با درنظر گرفتن اثر اصطکاک ۱۴۴

فهرست جدول‌ها

جدول ۱–۱- روش‌های فعال سلامت سازه [6] ۵
جدول۳–۱- خصوصیات ماده PZT4 [70] ۵۲
جدول ۳–۲- مشخصات مادهٔ پیزوالکتریک نوع موتورولا 3203HD[14] ۵۷
جدول ۳–۳– مشخصات مادهٔ پیزوالکتریک نوع Sonox-P5[71] ۶۰
جدول ۴–۱- نتایج تحلیل انتشار امواج لم برای تعیین موقعیت عیب شبیه‌سازی‌شده با یک شیار عرضی ۷۵
جدول ۴–۲- نتایج تحلیل انتشار امواج لم برای تعیین موقعیت عیب شبیه‌سازی‌شده با دو شیار عرضی ۷۸
جدول ۴–۳- نتایج تحلیل انتشار امواج لم برای تعیین موقعیت سوراخ دایره‌ای در ورق ۱۰۲
جدول ۴–۴- نتایج تحلیل انتشار امواج لم برای تعیین موقعیت ترک واقعی در ورق ۱۰۹
جدول ۵–۱- نتایج تحلیل انتشار امواج لم برای تعیین موقعیت شیار مستطیلی ۱۳۴
جدول ۵–۲- نتایج تحلیل انتشار امواج لم برای تعیین موقعیت عیوب شبیه‌سازی‌شده با دو شیار عرضی ۱۳۶

فهرست علائم و اختصارات

موج لم پادمتقارن مرتبه اول	A_{o}
سرعت فاز	c
سرعت گروه	c_{g}
سرعت انتشار امواج طولی	C_l
سرعت انتشار امواج برشی	C_s
نصف ضخامت	d
مؤلفهٔ بردار جابه‌جایی‌الکتریکی	D_{i}
ثابت‌های کرنش پیزوالکتریک	d_{33} , d_{32} ، d_{31}
مدول کشسانی	E
مؤلفهٔ بردار میدان‌الکتریکی	E_{i}
فرکانس	f
مؤلفهٔ کرنش خطی	S_{ij}
نرمی‌مکانیکی پیزوالکتریک در میدان‌الکتریکی صفر	s_{ijkl}^{E}
موج لم متقارن مرتبه اول	S_{o}
ضخامت لایهٔ پیزوالکتریک	t
مؤلفهٔ تنش	T_{i}
عدد موج	ξ
نسبت پوآسون	ν
دانسیته	ρ
دانسیته بار الکتریکی	ρ_e
پتانسیل‌الکتریکی	φ
ثابت‌دی‌الکتریک اندازه‌گیری‌شده در تنش صفر	$\varepsilon_{jk}^{\mathrm{T}}$

ثابت انبساط‌حرارتی تحت میدان‌الکتریکی ثابت	α_i^E
دمای‌مطلق	θ
فرکانس‌زاویه‌ای	ω
طول موج	λ
بردار جابه‌جایی مکانیکی	u