

سازمان فضایی ایران



پروژه نگاه هوافضا

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی هوافضا - مهندسی فضایی

تحلیل سلامت سازه بر اساس امپدانس الکترومکانیک مواد پیزوالکتریک

یدالله رضازاده

استاد راهنما

دکتر محمد طاهای ابدی

خرداد ۱۳۹۰



سازمان فضایی ایران



پژوهشگاه هوافضا

نام و نام خانوادگی دانشجو: یدالله رضازاده

عنوان پایان نامه یا رساله: تحلیل سلامت سازه بر اساس امیدانس الکترومکانیک مواد

پیزوالکتریک

تاریخ دفاع:

رشته: مهندس فضایی

گرایش: هوافضا

هیئت داوران

امضاء	محمد طاهای ابدی	۱- آقای دکتر
امضاء	فمیدا فلاح رجبزاده	۲- دکتر
امضاء	سعید شکرالهی	۳- آقای دکتر

مدیر تحصیلات تکمیلی پژوهشگاه هوافضا

دکتر فمیدا فلاح رجبزاده

تأییدیه صحت و اصالت نتایج

اینجانب یدالله رضازاده به شماره دانشجویی ۸۷۲۱۱۰۲ دانشجوی رشته مهندسی فضایی مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه نتایج این پایان‌نامه / رساله حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید پژوهشگاه هوافضاست و موارد نسخه‌برداری شده 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 در خصوص 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 عهده اینجانب خواهد بود و پژوهشگاه هیچ‌گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی: یدالله رضازاده

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

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

بهره‌برداری از این پایان‌نامه برای همکاران پژوهشگاه هوافضا بلامانع است.

بهره‌برداری از این پایان‌نامه برای سایرین با اخذ مجوز از معاون پژوهشی و استاد(ان) راهنما،

بلامانع است.

استادراهنما:

یدالله رضازاده:

آقای دکتر محمد طاهای ابدی

خداوند را سپاس می‌گوییم به من فرصت داد تا عمر خود را در راه تحصیل علم و دانش سپری کنم و همواره استادانی دلسوز و فرزانه بر سر راهم قرار داد تا در این راه دراز و بی پایان علم جوئی، راهنمای راهم و تسکین آتش سیری ناپذیرم باشند. به امید آنکه به یاد خورشید تابان راهم، شمع کوچکی بر سر راه تشنگان دیگر باشم.

با تشکر از

راهنمای دلسوز و فرزانه، مشوق راه علم

استاد ارجمند

دکتر محمد طاهای ابدی

خورشید تابان زندگیم

مادرم

مایه پرفروغ زندگیم

پدرم

و همه کسانی که از گذشته تاکنون، مرا در راه رسیدن به اهدافم یاری نموده‌اند.

تقدیم به:

خانواده‌ام و آنانکه آفتاب مهرشان در آستانهٔ قلبم همچنان

پابرجاست و هرگز غروب نخواهد کرد.

چکیده

آشکارسازی سلامت سازه در حین سرویس‌دهی باعث کاهش هزینه تعمیر و نگهداری، افزایش زمان بهره‌وری و قابلیت اطمینان می‌شود. شناسایی عیوب براساس امپدانس سازه یکی از روش‌های آشکارسازی سلامت سازه است که مقدار آن در هر نقطه به هندسه و خواص مواد وابسته است. با توجه به مشکلات اندازه‌گیری مستقیم امپدانس مکانیکی سازه در حین سرویس‌دهی، لایه‌های پیزوالکتریکی به سازه متصل می‌شود و امپدانس الکترومکانیکی آنها اندازه‌گیری می‌شود. این تحقیق روشی برای شناسایی عیوب براساس امپدانس الکترومکانیکی سازه ارائه می‌دهد. ابتدا روش اجزای محدودی برای محاسبه امپدانس الکترومکانیکی مبدل‌های پیزوالکتریکی متصل به سازه ارائه می‌شود و امپدانس الکترومکانیک برحسب هندسه و خواص مواد تشکیل‌دهنده مبدل پیزوالکتریک و سازه تعیین می‌شود. پاسخ الکترومکانیک لایه‌های پیزوالکتریک براساس رفتار ناهمسانگرد خطی آنها تعیین می‌شود و اثر کوپل میدان تغییر شکل و میدان اختلاف پتانسیل در تحلیل آنها در نظر گرفته می‌شود. پس از صحنه‌گذاری این روش با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل‌های تحلیلی پژوهشگران پیشین، این روش برای تعیین امپدانس مبدل‌های پیزوالکتریک متصل به سازه سالم و معیوب استفاده می‌شود و شاخصی برای ارزیابی سلامت سازه محاسبه می‌شود. نتایج تحلیل نشان می‌دهد مقدار این شاخص نسبت به عیوب هندسی بسیار کوچک در مقایسه با ابعاد سازه حساس است. فرکانس‌های تشدید الکترومکانیک نیز با این روش تعیین می‌شود که مقایسه آنها در سازه سالم و معیوب نشان می‌دهد مقدار فرکانس‌های تشدید نسبت به خواص سازه بسیار حساس است. آرایشی از مبدل‌های پیزوالکتریک برای تعیین موقعیت هندسی عیوب در سازه استفاده می‌شود و با شبیه‌سازی امپدانس هر یک از مبدل‌ها و محاسبه شاخص نشان داده می‌شود فاصله عیوب نسبت به مبدل تأثیر قابل توجهی بر تغییر امپدانس الکترومکانیک دارد که به‌عنوان معیاری برای تعیین موقعیت عیوب سازه استفاده می‌شود. کلیه پارامترهای مؤثر بر عملکرد این روش آشکارسازی سلامت سازه تحلیل می‌شود و مقدار بهینه آنها براساس هندسه و خواص سازه و لایه‌های پیزوالکتریک تعیین می‌شود.

کلمات کلیدی: آشکارسازی سلامت سازه، شناسایی عیب، امپدانس، پیزوالکتریک، تشدید الکترومکانیک.

فهرست مطالب

چکیده.....	أ
۱- مقدمه.....	۱
۱-۱- روش‌های آشکارسازی سلامت سازه.....	۱
۲-۱- تعریف امپدانس الکترومکانیک.....	۸
۳-۱- مروری بر تحقیقات پیشین.....	۱۲
۴-۱- اهداف پایان‌نامه.....	۱۶
۵-۱- روند کلی پایان‌نامه.....	۱۷
۲- پاسخ الکترومکانیک مبدل‌های پیزوالکتریک.....	۱۸
۱-۲- مقدمه.....	۱۸
۲-۲- مواد پیزوالکتریک.....	۱۸
۳-۲- معادلات حاکم بر مواد پیزوالکتریک.....	۲۱
۱-۳-۲- معادله مشخصه مواد پیزوالکتریک.....	۲۴
۲-۳-۲- معادلات ارتعاشات مواد پیزوالکتریک.....	۲۸
۳-۳-۲- معرفی روش اجزای محدود.....	۳۱
۴-۲- امپدانس مبدل پیزوالکتریک در ارتعاشات تک محوری.....	۳۳
۵-۲- امپدانس مبدل پیزوالکتریک در ارتعاشات سه‌بعدی.....	۴۰
۱-۵-۲- مبدل پیزوالکتریک مربع شکل.....	۴۱
۲-۵-۲- مبدل پیزوالکتریک دایره‌ای شکل.....	۴۹
۶-۲- نتیجه‌گیری.....	۵۳
۳- پاسخ الکترومکانیک مبدل‌های پیزوالکتریک متصل به سازه.....	۵۴
۱-۳- مقدمه.....	۵۴
۲-۳- روش تحلیل پاسخ الکترومکانیک مبدل پیزوالکتریک متصل به سازه.....	۵۵
۱-۲-۳- روش مستقیم اعمال ولتاژ.....	۵۵
۳-۳- تحلیل پاسخ الکترومکانیک مبدل پیزوالکتریک متصل به تیر.....	۵۸
۴-۳- تحلیل پاسخ الکترومکانیک مبدل پیزوالکتریک متصل شده به ورق مربعی.....	۶۱
۵-۳- امپدانس الکترومکانیک مبدل پیزوالکتریک متصل به ورق دایره‌ای.....	۶۵
۶-۳- نتیجه‌گیری.....	۶۷
۴- تحلیل سلامت سازه براساس پاسخ الکترومکانیک مبدل پیزوالکتریک.....	۶۸
۱-۴- مقدمه.....	۶۸
۲-۴- معیارهای ارزیابی سلامت سازه براساس امپدانس الکترومکانیک.....	۶۹
۳-۴- بررسی شدت عیب.....	۷۲
۴-۴- بررسی اثر فاصله عیب از مبدل پیزوالکتریک.....	۷۴
۵-۴- شناسایی عیوب با استفاده از آرایش مبدل‌های پیزوالکتریک.....	۷۸
۶-۴- نتیجه‌گیری.....	۸۲

۸۳	۵- بحث و بررسی
۸۳	۵-۱- مقدمه
۸۴	۵-۲- عوامل مؤثر بر پاسخ الکترومکانیک مبدل پیزوالکتریک
۸۴	۵-۲-۱- ابعاد مبدل پیزوالکتریک
۸۶	۵-۲-۲- اندازه و نوع المان بندی
۸۸	۵-۲-۳- میرایی مبدل پیزوالکتریک
۸۸	۵-۲-۴- خواص مکانیکی و الکتریکی مبدل پیزوالکتریک
۹۱	۵-۲-۵- تعداد تقسیم بندی های محدوده فرکانسی
۹۱	۵-۳- ارتباط فرکانس طبیعی و پاسخ الکترومکانیک مبدل پیزوالکتریک
۹۳	۵-۴- عوامل مؤثر بر پاسخ الکترومکانیک مبدل پیزوالکتریک متصل به سازه سالم
۹۴	۵-۴-۱- موقعیت اتصال مبدل پیزوالکتریک به سازه
۹۵	۵-۴-۲- تغییر در شرایط مرزی تیر
۹۷	۵-۴-۳- اندازه مبدل پیزوالکتریک نسبت به ابعاد سازه
۹۷	۵-۴-۴- تغییر خواص مکانیکی پیزوالکتریک متصل به سازه
۹۸	۵-۴-۵- تغییر در نوع نمو فرکانسی
۹۹	۵-۵- عوامل مؤثر بر پاسخ الکترومکانیک مبدل پیزوالکتریک متصل به سازه معیوب
۱۰۰	۵-۵-۱- اثر محدوده فرکانسی
۱۰۱	۵-۵-۲- ارتباط بین فرکانس اول تشدید الکترومکانیکی و محل عیب
۱۰۱	۵-۵-۳- تعیین موقعیت ناحیه معیوب با شاخص عیب
۱۰۳	۵-۵-۴- بررسی اثر اندازه و فاصله عیب بر پاسخ الکترومکانیک مبدل های پیزوالکتریک
۱۰۶	۵-۵-۵- بررسی وجود دو عیب بر پاسخ الکترومکانیک مبدل های پیزوالکتریک
۱۰۸	۵-۶- نتیجه گیری
۱۱۰	۶- نتیجه گیری
۱۱۴	۷- پیشنهادات
۱۱۵	۸- مراجع
۱۲۲	واژه نامه انگلیسی به فارسی
۱۲۴	واژه نامه فارسی به انگلیسی
۱۲۶	ABSTRACT

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ جداسدن سقف هواپیمای خطوط هوایی آلوها[3]..... ۲
- شکل ۲-۱ انفجار راکت دلتا ۴[4]..... ۲
- شکل ۳-۱ انفجار فضاپیمای کلمبیا..... ۳
- شکل ۴-۱ سقوط بخشی از سقف ترمینال خطوط هوایی فرانسه در چین[6]..... ۳
- شکل ۵-۱ هزینه‌های عملیاتی هواپیما به صورت تفکیکی[3]..... ۴
- شکل ۶-۱ تشابه سیستم آشکارسازی فعال سلامت سازه با سیستم عصبی انسان[8]..... ۵
- شکل ۷-۱ اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ..... ۸
- شکل ۸-۱ (الف) امپدانس مکانیکی (ب) امپدانس الکتریکی..... ۱۰
- شکل ۹-۱ تجهیزات آزمایشگاهی اندازه‌گیری پاسخ الکترومکانیک مبدل پیزوالکتریک متصل به سازه..... ۱۱
- شکل ۱۰-۱ مدل سیستم یک درجه آزادی[17]..... ۱۲
- شکل ۱۱-۱ مدل دینامیکی اثر متقابل بین یک لایه پیزوالکتریک و یک سازه دوبعدی بر اساس امپدانس مکانیکی [18]..... ۱۳
- شکل ۱۲-۱ اثر میدان الکتریکی بر مبدل پیزوالکتریک در تحریک (الف) یک بعدی (ب) دوبعدی (ج) سه بعدی [26]..... ۱۶
- شکل ۱۲-۲ (الف) دو قطبی‌های ماده پیزوالکتریک در حالت خنثی (ب) ایجاد اختلاف پتانسیل در اثر اعمال نیروی خارجی [33]..... ۱۹
- شکل ۲-۲ اثر مستقیم و معکوس پیزوالکتریک[37]..... ۲۱
- شکل ۳-۲ روابط بین خصوصیات ماده پیزوالکتریک[15]..... ۲۲
- شکل ۴-۲ معادلات الکترومکانیکی مبدل پیزوالکتریک[38]..... ۲۳
- شکل ۵-۲ کرنش‌های مبدل پیزوالکتریک..... ۲۷
- شکل ۶-۲ نمایش امپدانس در دستگاه مختصات اعداد مختلط..... ۳۰
- شکل ۷-۲ حل تحلیلی مولفه‌های حقیقی و موهومی ادمیتانس در ارتعاشات تک محوری..... ۳۶
- شکل ۸-۲ هندسه مبدل پیزوالکتریک و المان بندی آن..... ۳۷
- شکل ۹-۲ بارالکتریکی مبدل پیزوالکتریک در ارتعاشات تک محوری (الف) مؤلفه حقیقی (ب) مؤلفه موهومی..... ۳۸
- شکل ۱۰-۲ تغییرات مؤلفه حقیقی و موهومی ادمیتانس در حالت‌های تحلیلی و عددی ارتعاشات تک محوری..... ۴۰
- شکل ۱۱-۲ هندسه مبدل پیزوالکتریک مربع شکل و المان بندی آن..... ۴۱
- شکل ۱۲-۲ بارالکتریکی مبدل پیزوالکتریک مربعی در ارتعاشات سه بعدی (الف) مؤلفه حقیقی (ب) مؤلفه موهومی..... ۴۲
- شکل ۱۳-۲ امپدانس محرک پیزوالکتریک مربع شکل در مقیاس لگاریتمی (الف) مؤلفه حقیقی (ب) مؤلفه موهومی..... ۴۳
- شکل ۱۴-۲ مقایسه حل عددی امپدانس مبدل پیزوالکتریک مربع شکل با نتایج آزمایشگاهی[30] (الف) مؤلفه حقیقی (ب) مؤلفه موهومی..... ۴۴
- شکل ۱۵-۲ بارالکتریکی مبدل پیزوالکتریک PIC-151 : (الف) مؤلفه حقیقی (ب) مؤلفه موهومی..... ۴۷
- شکل ۱۶-۲ مقایسه حل عددی ادمیتانس مبدل پیزوالکتریک با نتایج آزمایشگاهی : (الف) مؤلفه حقیقی (ب) مؤلفه موهومی..... ۴۸
- شکل ۱۷-۲ هندسه مبدل پیزوالکتریک دایره‌ای و المان بندی آن..... ۴۹
- شکل ۱۸-۲ بارالکتریکی مبدل پیزوالکتریک دایره‌ای (الف) مؤلفه حقیقی (ب) مؤلفه موهومی..... ۵۰
- شکل ۱۹-۲ امپدانس مبدل پیزوالکتریک دایره‌ای (الف) مؤلفه حقیقی (ب) مؤلفه موهومی..... ۵۱
- شکل ۲۰-۲ مقایسه حل عددی امپدانس مبدل پیزوالکتریک دایره‌ای با نتایج آزمایشگاهی[30] (الف) مؤلفه حقیقی (ب) مؤلفه موهومی..... ۵۲
- شکل ۱-۳ هندسه تیر فولادی و محرک پیزوالکتریک..... ۵۸

- شکل ۲-۳ - بارالکتریکی مبدل پیزوالکتریک متصل به تیر (الف) مؤلفه حقیقی (ب) مؤلفه موهومی ۶۰
- شکل ۳-۳ - مقایسه حل عددی مؤلفه حقیقی امیدانس محرک پیزوالکتریک متصل به تیر با نتایج آزمایشگاهی ۶۱
- شکل ۴-۳ - هندسه مبدل پیزوالکتریک متصل به سطح ورق و المان بندی آنها ۶۲
- شکل ۵-۳ - مقایسه حل عددی روش اعمال مستقیم ولتاژ با نتایج آزمایشگاهی و روش امیدانس مجموع جهت دار (الف) مؤلفه حقیقی (ب) مؤلفه موهومی ۶۵
- شکل ۶-۳ - موقعیت اتصال مبدل پیزوالکتریک به ورق آلومینیومی دایره‌ای ۶۶
- شکل ۷-۳ - مؤلفه حقیقی بارالکتریکی محرک پیزوالکتریک متصل به ورق دایره‌ای ۶۷
- شکل ۱-۴ - هندسه تیر معیوب فولادی با عیب دایره‌ای و موقعیت مبدل پیزوالکتریک متصل به آن ۷۱
- شکل ۲-۴ - هندسه تیر معیوب فولادی با عیب مربعی و موقعیت مبدل پیزوالکتریک متصل به آن ۷۳
- شکل ۳-۴ - ریشه میانگین مجذور انحراف برای تعیین شدت عیوب با ابعاد مختلف ۷۳
- شکل ۴-۴ - ریشه میانگین مجذور انحراف برای عیوب دایره‌ای با قطر مختلف ۷۴
- شکل ۵-۴ - هندسه ورق آلومینیومی دایره‌ای ۷۴
- شکل ۶-۴ - مؤلفه حقیقی امیدانس مبدل پیزوالکتریک برای ترک در فاصله ۳ میلی متری ۷۵
- شکل ۷-۴ - مؤلفه حقیقی امیدانس مبدل پیزوالکتریک برای ترک در فاصله ۱۰ میلی متری ۷۶
- شکل ۸-۴ - مؤلفه حقیقی امیدانس مبدل پیزوالکتریک برای ترک در فاصله ۲۵ میلی متری ۷۶
- شکل ۹-۴ - مؤلفه حقیقی امیدانس مبدل پیزوالکتریک برای ترک در فاصله ۴۰ میلی متری ۷۶
- شکل ۱۰-۴ - ریشه میانگین مجذور انحراف در فواصل گوناگون عیب ۷۷
- شکل ۱۱-۴ - مبدل‌های پیزوالکتریک متصل به تیر با عیب دایره‌ای ۷۷
- شکل ۱۲-۴ - ریشه میانگین مجذور انحراف برای تیر با عیب دایره‌ای ۷۸
- شکل ۱۳-۴ - ورق آلومینیومی آسیب دیده نزدیک محرک پیزوالکتریک ششم ۷۹
- شکل ۱۴-۴ - ورق آلومینیومی آسیب دیده نزدیک محرک پیزوالکتریک دوم ۷۹
- شکل ۱۵-۴ - مدل المان محدود ورق آلومینیومی با شرایط مرزی ۸۰
- شکل ۱۶-۴ - ریشه میانگین مجذور انحراف در ورق آسیب دیده نزدیک محرک پیزوالکتریک ششم: (الف) نتایج آزمایشگاهی [54] (ب) نتایج شبیه سازی ۸۱
- شکل ۱۷-۴ - ریشه میانگین مجذور انحراف در ورق آسیب دیده نزدیک محرک پیزوالکتریک دوم: (الف) نتایج آزمایشگاهی [54] (ب) نتایج شبیه سازی ۸۱
- شکل ۱-۵ - ادمیتانس مبدل‌های پیزوالکتریک با ابعاد مختلف (الف) مؤلفه حقیقی (ب) مؤلفه موهومی ۸۵
- شکل ۲-۵ - اثر نوع المان بندی بر پاسخ الکترومکانیک مبدل پیزوالکتریک ۸۷
- شکل ۳-۵ - بررسی اندازه المان‌ها بر پاسخ الکترومکانیک مبدل پیزوالکتریک ۸۷
- شکل ۴-۵ - بررسی اثر میرایی بر مؤلفه موهومی ادمیتانس مبدل پیزوالکتریک ۸۸
- شکل ۵-۵ - اثر مدول الاستیسیته بر مؤلفه موهومی ادمیتانس مبدل پیزوالکتریک ۸۹
- شکل ۶-۵ - اثر ضریب گذردهی الکترونی در خلا بر مؤلفه موهومی ادمیتانس مبدل پیزوالکتریک ۸۹
- شکل ۷-۵ - اثر نسبت پواسون بر مؤلفه موهومی ادمیتانس مبدل پیزوالکتریک ۹۰
- شکل ۸-۵ - بررسی اثر ثابت‌های پیزوالکتریک بر پاسخ الکترومکانیک مبدل پیزوالکتریک ۹۰
- شکل ۹-۵ - اثر تعداد تقسیم بندی‌ها بر مؤلفه موهومی ادمیتانس مبدل پیزوالکتریک ۹۱
- شکل ۱۰-۵ - تغییرات بارالکتریکی مبدل‌های پیزوالکتریک WILIT1 T2 در فرکانس‌های تحریک ۹۲
- شکل ۱۱-۵ - شکل مدهای افزایش طولی مبدل پیزوالکتریک WILIT1: (الف) فرکانس ۱۷۱ کیلوهرتز (ب) فرکانس ۲۱۲ کیلوهرتز ۹۳
- شکل ۱۲-۵ - شکل مدهای افزایش طولی مبدل پیزوالکتریک WILIT2: (الف) فرکانس ۱۷۱ کیلوهرتز (ب) فرکانس ۲۱۲ کیلوهرتز ۹۳

- شکل ۵-۱۳- موقعیت مبدل پیزوالکتریک متصل به تیر فولادی ۹۴
- شکل ۵-۱۴- مؤلفه حقیقی امیدانس در موقعیت مختلف مبدل پیزوالکتریک بر روی تیر ۹۵
- شکل ۵-۱۵- مؤلفه حقیقی امیدانس محرک پیزوالکتریک برای تیر آزاد و یک سر گیردار ۹۶
- شکل ۵-۱۶- مؤلفه حقیقی امیدانس محرک پیزوالکتریک متصل به تیر سالم با شرایط مرزی مختلف ۹۶
- شکل ۵-۱۷- بررسی اثر اندازه مبدل پیزوالکتریک نسبت به ابعاد سازه ۹۷
- شکل ۵-۱۸- بررسی اثر خواص مکانیکی مبدل پیزوالکتریک نسبت به خواص مکانیکی سازه ۹۸
- شکل ۵-۱۹- تغییرات مؤلفه حقیقی امیدانس محرک پیزوالکتریک متصل به تیر سالم در نمو فرکانسی خطی و لگاریتمی ۹۹
- شکل ۵-۲۰- ریشه میانگین مجذور انحراف برای دو محدوده فرکانسی مختلف ۱۰۰
- شکل ۵-۲۱- تغییرات اولین فرکانس تشدید در فواصل گوناگون ترک ۱۰۱
- شکل ۵-۲۲- ورق آلومینیومی آسیب دیده در محل پیزوالکتریک پنجم ۱۰۲
- شکل ۵-۲۳- ریشه میانگین مجذور انحراف در ورق دارای عیب دایره‌های در مرکز ورق ۱۰۲
- شکل ۵-۲۴- هندسه ورق آلومینیومی معیوب (تمامی اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر هستند) ۱۰۳
- شکل ۵-۲۵- ریشه میانگین مجذور انحراف برای آرایش نوع اول و نوع دوم ۱۰۴
- شکل ۵-۲۶- آرایش‌های سوم و چهارم مبدل‌های پیزوالکتریک ۱۰۴
- شکل ۵-۲۷- ریشه میانگین مجذور انحراف برای آرایش‌های گوناگون مبدل‌های پیزوالکتریک ۱۰۵
- شکل ۵-۲۸- ریشه میانگین مجذور انحراف مؤلفه حقیقی امیدانس برای آرایش‌های گوناگون مبدل‌های پیزوالکتریک برای عیب دایره‌ای به شعاع ۰/۵ میلی‌متر ۱۰۵
- شکل ۵-۲۹- ریشه میانگین مجذور انحراف مؤلفه حقیقی امیدانس برای آرایش‌های گوناگون مبدل‌های پیزوالکتریک برای عیب دایره‌ای به شعاع ۱/۵ میلی‌متر ۱۰۶
- شکل ۵-۳۰- ورق آلومینیومی دارای دو عیب ۱۰۷
- شکل ۵-۳۱- ریشه میانگین مجذور انحراف در ورق دارای دو عیب دایره‌ای ۱۰۸

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲	خواص مبدل پیزوالکتریک APC-850 [11]	۳۵
جدول ۲-۲	خواص مبدل پیزوالکتریک PIC-151 [26]	۴۵
جدول ۱-۳	خواص مبدل پیزوالکتریک APC-841 [30]	۵۹
جدول ۱-۴	مقدار معیارهای ارزیابی سلامت سازه برای عیوب دایره‌ای با شعاع مختلف	۷۲
جدول ۱-۵	ابعاد مبدل پیزوالکتریک	۸۴

فهرست علائم و اختصارات

B	مؤلفه موهومی ادمیتانس (سوسپتانس)
c	میانگین سرعت موج
D_i	مؤلفه بردار جابه‌جایی الکتریکی
d_{33}, d_{32}, d_{31}	ثابت‌های کرنش پیزوالکتریک
\tilde{D}_j	مؤلفه ثابت دمای جابه‌جایی الکتریکی
DI	شاخص آسیب
E_i	مؤلفه بردار میدان الکتریکی
F	بردار نیرو
F_0	دامنه نیروی تحریک
f	فرکانس
G	مؤلفه حقیقی ادمیتانس (کندوکتانس)
g_{mi}	مؤلفه‌های ماتریس پیزوالکتریک
I	جریان الکتریکی
Im	مؤلفه موهومی
j	عدد موهومی
k	ثابت فنر
k_{ij}	ثابت کوپلینگ الکترومکانیکی
m	جرم
N	تعداد تقسیم‌بندی‌های محدوده فرکانسی
Q	بار الکتریکی
Re	مؤلفه حقیقی
S_{ij}	مؤلفه کرنش خطی
S_{ij}^E	مؤلفه ماتریس نرمی بدون اعمال میدان الکتریکی

T_i	مؤلفه تنش
t	زمان
u_i	مؤلفه بردار جابه‌جایی
V	ولتاژ الکتریکی
\mathbf{v}	برداری سرعت
v_0	دامنه سرعت
Y	ادمیتانس الکترومکانیکی
Y_{11}, Y_{22}, Y_{33}	مؤلفه حقیقی مدول الاستیسیته
$\bar{Y}_{11}, \bar{Y}_{22}, \bar{Y}_{33}$	مدول الاستیسیته مختلط
Z	امپدانس الکترومکانیکی
α	ضریب میرایی جرمی
α_i^E	ضریب انبساط حرارتی در میدان الکتریکی ثابت
β	ضریب میرایی متناسب با ماتریس سفتی
δ	ضریب کاهش دی‌الکتریک
ϵ_0	ضریب گذردهی خلا
ϵ_{ij}^T	مؤلفه ماتریس ضریب گذردهی در تنش ثابت
η	ضریب افت مکانیکی
θ	دمای مطلق
$\hat{\mu}$	میانگین داده‌ها
ν	نسبت پواسون
ρ	دانسیته
σ	انحراف استاندارد
ω	فرکانس زاویه‌ای

۱- مقدمه

۱-۱- روش‌های آشکارسازی سلامت سازه

آشکارسازی سلامت سازه و شناسایی عیوب در سازه‌ها و تجهیزات مختلف به‌ویژه تجهیزات هوافضایی اهمیت زیادی دارد. بررسی سلامت سازه به دو روش کلی انجام‌پذیر است: فعال^۱ و غیرفعال^۲ [1]. بررسی سلامت سازه به‌صورت غیرفعال بدین معنی است که برای ارزیابی سازه باید تجهیزات از سرویس‌دهی خارج شوند و اجرای روش‌های بازبینی سلامت سازه همزمان با استفاده از آنها امکان‌پذیر نیست. آزمایش‌های غیرمخرب مانند بازرسی بصری، آزمون مافوق صوت، رادیوگرافی و انتشار امواج آکوستیک^۳ روش‌های سلامت سازه غیرفعال هستند [2]. اجرای این روش‌های آزمایش برای سازه‌های مهندسی پیچیده و بزرگ مانند فضاپیماها و هواپیماها و اکثر سازه‌های هوافضایی به زمان زیادی نیاز دارد و استخراج نتایج به مهارت کاربر وابسته است. در اغلب این روش‌ها نیاز به اطلاع از محدوده عیوب است و دسترسی به قسمت مورد نظر سازه باید امکان‌پذیر باشد. روش‌های فعال سلامت سازه امکان ارزیابی سازه به‌صورت همزمان با استفاده از آن را برای کاربر فراهم کند تا بتوان اطلاعات کاملی از شرایط کل سازه حتی نواحی غیرقابل دسترس را در هر زمان دلخواه از سرویس‌دهی بدست آورد.

فاجعه پرواز ۲۴۳ خطوط هوایی آلوها^۴ در ۲۸ آوریل ۱۹۸۸ اتفاق افتاد که علت آن وجود ترک و گسترش این عیب کوچک در طول سقف بود که مطابق شکل ۱-۱، منجر به جداشدن

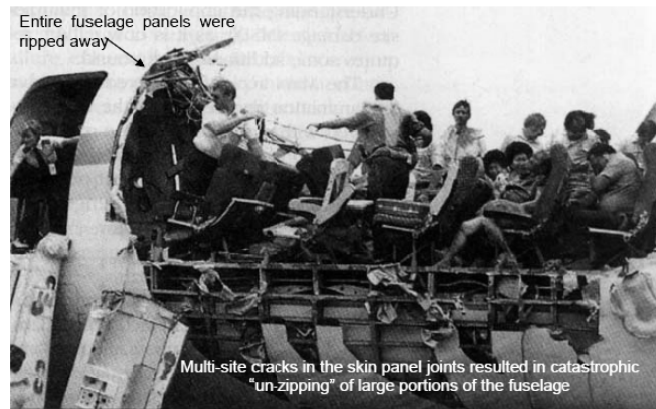
1 active

2 passive

3 acoustic emission

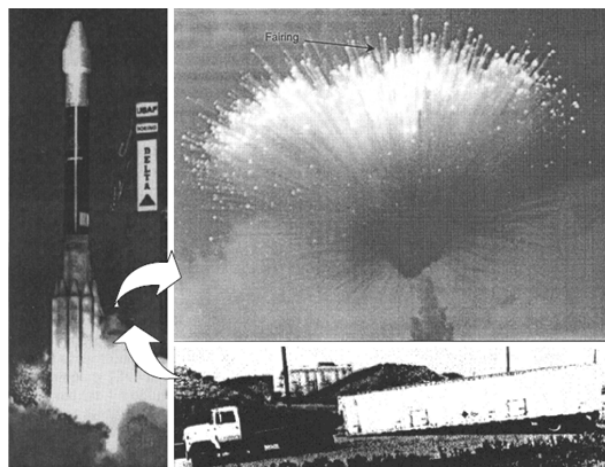
4 Aloha

سقف هواپیما شد. در این حادثه ۶۹ نفر از مسافران و خدمه پروازی آسیب دیدند. لازم به ذکر است که هیچ‌گونه گزارشی از آسیب و خرابی در سازه هواپیما در شروع پرواز و اوج‌گیری آن گزارش نشده بود [3].



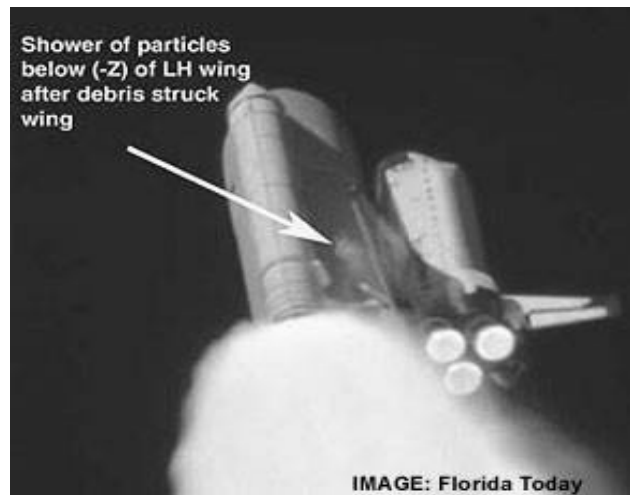
شکل ۱-۱ جداسدن سقف هواپیمای خطوط هوایی آلوها [3]

واقعه ۱۷ ژانویه سال ۱۹۹۷ فاجعه دیگری بود که منجر به انفجار راکت دلتا ۲ شد. این حادثه، ۱۲/۵ ثانیه از شروع روی داد که پس از تحقیقات فراوان، علت حادثه وجود ترک در یکی از موتورهای راکت گزارش گردید. این ترک در هنگام حمل راکت به سمت سکوی پرتاب به وجود آمده بود و در طول پرواز گسترش یافته و در نهایت موجب منفجر شدن راکت گردیده بود [4]. این در حالی است که اگر از روش‌های فعال سلامت سازه در این راکت استفاده می‌شد وجود ترک قبل از پرتاب شناسایی می‌شد.



شکل ۲-۱ انفجار راکت دلتا ۲ [4]

از فجایع دیگری که در زمینه هوافضا اتفاق افتاده است می توان به حادثه فضاپیمای کلمبیا^۱ در ۱۶ ژانویه سال ۲۰۰۳ اشاره کرد. همان طور که شکل ۱-۳ نشان داده شده است حادثه در اثر جدا شدن تکه ای از فوم تانک خارجی سوخت و برخورد آن با لبه^۲ حمله^۲ بال سمت چپ فضاپیما روی داد [5].



شکل ۱-۳ انفجار فضاپیمای کلمبیا

سقوط بخشی از ترمینال خطوط هوایی فرانسه در چین مطابق با شکل ۱-۴ حادثه دیگری است که در ۲۳ می سال ۲۰۰۴ روی داد و منجر به کشته شدن چهار نفر و مجروح شدن سه نفر شد. فاجعه مشابه دیگری در ترمینال شماره ۳ فرودگاه بین المللی دبی در تاریخ ۲۸ سپتامبر سال ۲۰۰۴ روی داد [6].

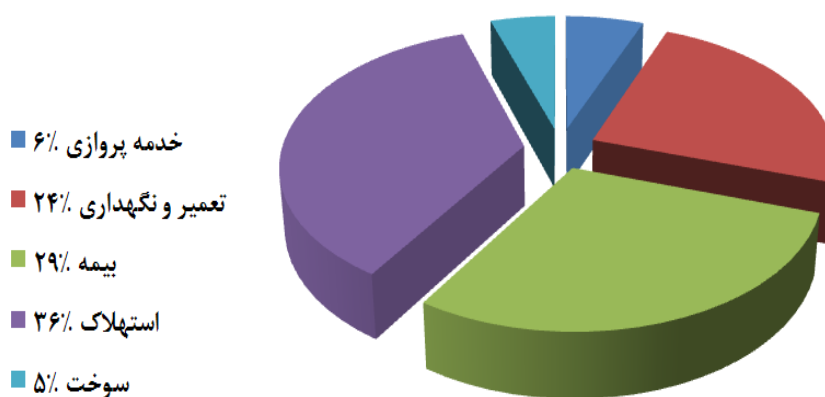


شکل ۱-۴ سقوط بخشی از سقف ترمینال خطوط هوایی فرانسه در چین [6]

1 Columbia
2 leading edge

این حوادث موجب خسارت‌های جانی و مالی و عدم اطمینان به عملکرد مجموعه‌ها می‌شود. یک راه‌حل برای جلوگیری از بروز چنین حوادثی استفاده از آزمایش‌های غیرمخرب برای تعیین سلامت سازه است که با توجه به هزینه بسیار بالای این آزمایش‌ها و همچنین عواقب ناشی از تعطیلی ترمینال یا به تعویق انداختن زمان پرتاب راکت دلتا، از انجام آزمایشات آشکارسازی سلامت صرف‌نظر کردند. اگر اطلاعاتی از سلامت سازه در حین سرویس‌دهی به کمک روشی با هزینه کم و زمان کوتاه کسب شود، این حوادث هرگز روی نمی‌داد و اکثر شرکت‌ها آزمایش‌های سلامت سازه را انجام می‌دادند. برای دستیابی به این اهداف روش‌های فعال سلامت سازه بر مبنای تغییر در پاسخ دینامیکی سازه و بکارگیری مواد هوشمند^۱ در سازه‌های مختلف ارائه شده است [3].

عملیات تعمیر و نگهداری هزینه‌های زیادی را بر شرکت‌های استفاده‌کننده از تجهیزات هوایی تحمیل می‌کند و همان‌طور که در شکل ۱-۵ نشان داده شده است هزینه تعمیر و نگهداری در صنایع هواپیمایی حدود یک چهارم هزینه‌های عملیاتی را شامل می‌شود که این هزینه را می‌توان به کمک روش فعال بررسی سلامت سازه به میزان قابل توجهی کاهش داد. به‌طور مشابه روش‌های فعال بررسی سلامت سازه را می‌توان در بازرسی سیستم‌های حمل و نقل کشتی‌ها، حمل و نقل جاده‌ای، دستگاه‌های حیاتی، سدها، پل‌ها، تجهیزات نیروگاه‌ها، راکتورهای هسته‌ای، برج‌ها و آسمان‌خراش‌ها استفاده کرد تا از بروز وقایع در این مجموعه‌ها جلوگیری شود و هزینه نگهداری آنها کاهش یابد [7].



شکل ۱-۵ هزینه‌های عملیاتی هواپیما به صورت تفکیکی [3]