



پروژه شمشاد هوا فضا

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

پایان نامه کارشناسی ارشد

تشخیص پدیده جدایش بین لایه‌های در ورق‌های چندلایه با استفاده از تحلیل ارتعاشات

رحیم گرگین

استاد راهنما

دکتر محمد طاهای ابدی

استاد مشاور

دکتر حامد کاشانی

مرداد ۱۳۸۹





نام و نام خانوادگی دانشجو: رحیم گرگین

عنوان پایان نامه یا رساله: تشخیص پدیده جدایش بین لایه‌ای در ورق‌های چندلایه با استفاده از

تحلیل ارتعاشات

تاریخ دفاع:

رشته: مهندسی هوافضا

گرایش: مهندسی فضایی

هیئت داوران

| | | |
|-------|-----------------|--------------|
| امضاء | محمد طاهای ابدی | ۱- آقای دکتر |
| امضاء | حامد کاشانی | ۲- آقای دکتر |
| امضاء | محمدعلی فارسی | ۲- آقای دکتر |
| امضاء | مجتبی صدیقی | ۳- آقای دکتر |

مدیر تحصیلات تکمیلی پژوهشگاه هوافضا

دکتر فمیدا فلاح رجب‌زاده

تأییدیہ صحت و اصالت نتایج

اینجانب رحیم گرگین به شماره دانشجویی ۸۶۲۱۱۰۵ دانشجوی رشته مهندسی هوافضا گرایش مهندسی فضایی مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه نتایج این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید پژوهشگاه هوافضاست و موارد نسخه برداری 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 دانشجو: رحیم گرگین

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه برای سایرین با اخذ مجوز از معاون پژوهشی و استاد راهنما، از تاریخ ۱۳۹۰/۶/۳۱ بلامانع است.

نام استاد راهنما:

دکتر محمد طاهای‌ابدی

نام دانشجو:

رحیم گرگین

سپاسگزاری

با سپاس و تشکر بی‌پایان از درگاه ایزد منان، بر خود واجب می‌دانم در ابتدا از زحمات استاد گرامی جناب آقای دکتر محمد طاهای ابدی که در این پروژه قبول زحمت فرموده‌اند و با صبر، شکیبایی و پشتیبانی دائمی خود اینجانب را در این پروژه یاری نموده‌اند، سپاسگزاری و قدردانی نمایم. همچنین از زحمات بی‌دریغ جناب آقای دکتر حامد کاشانی قدردانی و تشکر می‌نمایم.

تقدیم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار
نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیسایم و از ریشه
آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش
تلاش نمایم. والدینی که بودندشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان
دلیلی است بر بودنم چرا که این دو وجود پس از پروردگار مایه
هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی
پر از فراز و نشیب آموختند.

چکیده

وجود عیب در سازه سبب تغییر خواص مودال سازه شامل فرکانس طبیعی، ضریب میرایی، شکل مود و توابع پاسخ فرکانسی می‌شود که با استفاده از این خواص می‌توان سلامت سازه را بررسی کرد. فرکانس طبیعی و ضریب میرایی فقط وجود یا عدم وجود عیب در سازه را تعیین می‌کند. از طرف دیگر تغییرات شکل مود یا توابع پاسخ فرکانسی سازه علاوه بر اطلاع از وجود یا عدم وجود عیب، قابلیت تعیین موقعیت و شدت عیوب سازه را دارد. در این تحقیق سه روش برای بررسی سلامت سازه ارائه می‌شود. در روش اول شاخص عیب بر اساس شکل مود تعریف می‌شود و با استفاده از این شاخص موقعیت و شدت عیوب در تیر تک‌لایه و جدایش بین‌لایه‌ای در تیر مرکب چندلایه ارائه می‌شود. پارامترهای موثر بر عملکرد این روش در تعیین موقعیت عیوب تیر و جدایش بین‌لایه‌ای در شرایط مختلف تعیین می‌شود. پارامترهای موثر بر عملکرد این روش برای تعیین موقعیت عیوب و جدایش بین‌لایه‌ای در شرایط مختلف بررسی می‌شود. مقایسه روش ارائه‌شده با تحقیقات پیشین نشان می‌دهد این روش با حسگرهای کمتری و بدون نیاز به شکل مود سازه سالم، عیوب سازه را با دقت مناسبی شناسایی می‌کند. روش دوم بر اساس انحنای توابع پاسخ فرکانسی، در این تحقیق برای آشکارسازی سلامت سازه ارائه می‌شود و از این روش برای تعیین موقعیت عیوب تیر تک‌لایه و جدایش بین‌لایه‌ای در تیر مرکب استفاده می‌شود. پارامترهای موثر بر این روش شامل، فرکانس و دامنه نیروی تحریک، موقعیت عیوب و شرایط تکیه‌گاهی، تعداد حسگرها و نرخ داده‌برداری در دقت تعیین موقعیت و شدت عیوب بررسی می‌شود. شناسایی جدایش بین‌لایه‌ای بر اساس پاسخ دینامیک سازه تحت اثر بارگذاری متناوب روش دیگری است که در این تحقیق بررسی می‌شود. در این روش شاخص عیبی بر اساس اختلاف جابه‌جایی سطوح فوقانی و تحتانی ورق ارائه می‌شود. این روش عملکرد مناسبی در شناسایی موقعیت جدایش بین‌لایه‌ای در ورق مرکب چندلایه دارد. پارامترهای بهینه برای تعیین موقعیت جدایش بین‌لایه‌ای شامل فرکانس و دامنه نیروی تحریک، موقعیت عیب و تکیه‌گاه، نرخ داده‌برداری و موقعیت عیب در ضخامت ورق بررسی می‌شود و نشان داده می‌شود که با استفاده از این روش سلامت ورق مرکب به‌صورت موضعی بررسی می‌شود و بر خلاف روش‌های پیشین نیازی به تحلیل پاسخ کل ورق نیست.

کلمات کلیدی: آشکارسازی سلامت سازه، جدایش بین‌لایه‌ای، شاخص عیب

فهرست مطالب

| | |
|----|---|
| ح | چکیده..... |
| ۱ | ۱- مقدمه..... |
| ۱ | ۱-۱- اهمیت آشکارسازی سلامت سازه..... |
| ۴ | ۲-۱- مروری بر تحقیقات پیشین..... |
| ۴ | ۱-۲-۱- شناسایی عیوب بر اساس تغییرات ماتریس سفتی سازه..... |
| ۵ | ۲-۲-۱- شناسایی عیوب بر اساس فرکانس طبیعی سازه..... |
| ۶ | ۳-۲-۱- شناسایی عیوب بر اساس ضریب میرایی سازه..... |
| ۷ | ۴-۲-۱- شناسایی عیوب بر اساس شکل موده‌های سازه..... |
| ۱۰ | ۵-۲-۱- شناسایی عیوب بر اساس توابع پاسخ فرکانسی سازه..... |
| ۱۳ | ۳-۱- روش‌های شناسایی عیوب ورق تک‌لایه..... |
| ۱۳ | ۱-۳-۱- شناسایی عیوب ورق بر اساس شکل مود ورق..... |
| ۱۵ | ۲-۳-۱- شناسایی عیوب ورق بر اساس توابع پاسخ فرکانسی..... |
| ۱۵ | ۴-۱- شناسایی جدایش بین لایه‌ای در سازه‌های مرکب چندلایه..... |
| ۱۹ | ۵-۱- محدودیت‌های روش‌های پیشین..... |
| ۲۰ | ۶-۱- اهداف کلی پروژه..... |
| ۲۱ | ۷-۱- روند کلی پایان نامه..... |
| ۲۳ | ۲- شناسایی عیوب با استفاده از شاخص عیب..... |
| ۲۳ | ۱-۲- مقدمه..... |
| ۲۳ | ۲-۲- حل تحلیلی معادله حرکت تیر..... |
| ۲۵ | ۳-۲- معرفی شاخص عیب..... |
| ۲۷ | ۴-۲- تحلیل سلامت سازه همسانگرد..... |
| ۳۹ | ۵-۲- تعیین جدایش بین لایه‌ای با استفاده از شاخص عیب..... |
| ۴۵ | ۶-۲- نتیجه‌گیری..... |
| ۴۶ | ۳- شناسایی عیوب تیر بر اساس مقادیر توابع پاسخ فرکانسی..... |
| ۴۶ | ۱-۳- مقدمه..... |
| ۴۷ | ۲-۳- توابع پاسخ فرکانسی سازه..... |
| ۴۷ | ۱-۲-۳- تعیین توابع پاسخ فرکانسی سیستم‌های نامیرای چند درجه آزادی..... |
| ۴۹ | ۳-۳- روش محاسباتی..... |
| ۵۱ | ۴-۳- شناسایی عیوب تیر بر اساس انحنای توابع پاسخ فرکانسی..... |
| ۵۱ | ۱-۴-۳- بررسی عملکرد روش ارائه شده در تعیین موقعیت عیب در تیر..... |
| ۵۳ | ۲-۴-۳- بررسی اثر فرکانس نیروی تحریک بر نتیجه روش انحنای توابع پاسخ فرکانسی..... |

| | | |
|-------|--|-----|
| ۳-۴-۳ | بررسی اثر دامنه نیروی تحریک بر نتیجه روش انحناى توابع پاسخ فرکانسى | ۵۵ |
| ۴-۴-۳ | بررسی اثر تعداد المان‌های تیر بر نتیجه روش انحناى توابع پاسخ فرکانسى | ۵۷ |
| ۵-۴-۳ | بررسی اثر نرخ داده بردارى بر نتیجه روش انحناى توابع پاسخ فرکانسى | ۵۸ |
| ۶-۴-۳ | بررسی اثر وجود چند عیب در تیر بر نتیجه روش انحناى توابع پاسخ فرکانسى | ۶۰ |
| ۷-۴-۳ | بررسی اثر محل تکیه‌گاه تیر بر نتیجه روش انحناى توابع پاسخ فرکانسى | ۶۱ |
| ۵-۳ | تعیین موقعیت جدایش بین لایه‌ای در تیر مرکب چندلایه با استفاده از توابع پاسخ | |
| ۶۳ | فرکانسى تیر | |
| ۱-۵-۳ | بررسی کارایی روش ارائه شده در تعیین موقعیت جدایش بین لایه‌ای در تیر مرکب چندلایه | ۶۳ |
| ۲-۵-۳ | بررسی اثر وجود چند جدایش بین لایه‌ای بر نتیجه روش ارائه شده | ۶۶ |
| ۱-۵-۳ | بررسی اثر موقعیت جدایش بین لایه‌ای در ضخامت تیر بر نتیجه روش ارائه شده | ۶۸ |
| ۶-۳ | نتیجه گیری | ۷۱ |
| ۴ | شناسایی جدایش بین لایه‌ای براساس پاسخ متناوب سازه | ۷۲ |
| ۱-۴ | مقدمه | ۷۲ |
| ۲-۴ | روش محاسباتی | ۷۳ |
| ۳-۴ | نتایج تحلیل متناوب ورق چندلایه با جدایش بین لایه‌ای | ۷۴ |
| ۱-۳-۴ | بررسی کارایی روش ارائه شده | ۷۵ |
| ۲-۳-۴ | بررسی اثر مقدار فرکانس تحریک بر نتیجه روش | ۷۷ |
| ۳-۳-۴ | بررسی اثر دامنه نیروی تحریک بر نتیجه روش | ۷۸ |
| ۴-۳-۴ | بررسی اثر نرخ داده بردارى بر نتیجه روش | ۷۹ |
| ۵-۳-۴ | بررسی اثر موقعیت هندسى جدایش بین لایه‌ای بر مقدار شاخص عیب ورق | ۸۰ |
| ۶-۳-۴ | بررسی اثر وجود چند جدایش بین لایه‌ای بر مقدار شاخص عیب ورق | ۸۲ |
| ۷-۳-۴ | بررسی اثر محل تکیه‌گاه ورق بر مقدار شاخص عیب در ورق | ۸۴ |
| ۸-۳-۴ | بررسی اثر خواص جهتی ورق بر مقدار شاخص عیب ورق | ۸۷ |
| ۹-۳-۴ | بررسی اثر تغییر موقعیت جدایش بین لایه‌ای در ضخامت ورق بر مقدار شاخص عیب | ۸۸ |
| ۴-۴ | تعیین موقعیت چند جدایش بین لایه‌ای در ورق مرکب هشت لایه | ۹۰ |
| ۵-۴ | نتیجه گیری | ۹۲ |
| ۵ | بحث و بررسی | ۹۳ |
| ۱-۵ | مقدمه | ۹۳ |
| ۲-۵ | بررسی کارایی روش های مختلف ارائه شده برای تعیین موقعیت عیوب تیر مبتنی بر | |
| ۱-۲-۵ | مقایسه کارایی روش های استفاده از شاخص عیب و انحناى شکل مود تیر فلزی در تعیین موقعیت یک عیب | ۹۳ |
| ۲-۲-۵ | ارزیابی عملکرد روش استفاده از شاخص عیب تیر در شناسایی عیب بسیار کوچک | ۹۵ |
| ۳-۲-۵ | کاربرد روش استفاده از شاخص عیب تیر برای نتایج آزمایشگاهی | ۱۰۰ |
| ۳-۵ | بررسی کارایی روش های ارائه شده برای تعیین موقعیت عیوب تیر مبتنی بر استفاده از | |
| ۱۰۳ | توابع پاسخ فرکانسى تیر | |

| | |
|--|-----|
| ۴-۵- بررسی روش‌های شناسایی عیوب در ورق تک‌لایه و جدایش بین لایه‌ای در ورق مرکب چندلایه | ۱۰۸ |
| ۴-۵-۱- معرفی روش‌های تعیین موقعیت عیوب ورق مبتنی بر شکل مود ورق | ۱۰۸ |
| ۴-۵-۲- تعیین موقعیت جدایش بین لایه‌ای شبیه‌سازی شده با مد آزاد در ورق مرکب سه لایه با استفاده از شکل مود ورق ۱۱۰ | ۱۱۰ |
| ۴-۵-۳- تعیین موقعیت جدایش بین لایه‌ای با مد مقید در ورق مرکب چند لایه با استفاده از توابع پاسخ فرکانسی ورق ۱۱۴ | ۱۱۴ |
| ۴-۵-۴- تعیین موقعیت جدایش بین لایه‌ای در ورق مرکب چندلایه با ضخامت کم با استفاده از شاخص عیب ۱۱۶ | ۱۱۶ |
| ۶- نتیجه گیری | ۱۱۷ |
| ۷- پیشنهادات | ۱۲۰ |
| مراجع | ۱۲۲ |
| پیوست الف- انحناهای اصلی شکل مود | ۱۲۶ |
| واژه‌نامه انگلیسی به فارسی | ۱۲۸ |
| واژه‌نامه فارسی به انگلیسی | ۱۳۰ |
| ABSTRACT | ۱۳۲ |

فهرست شکل‌ها

- شکل (۲-۱) تشابه تعیین سلامت سازه در زمان سرویس‌دهی با سیستم عصبی انسان ۳
- شکل (۳-۱) تغییر شکل مود تیر یک‌سرگردار بعد از پیدایش عیب در وسط تیر ۷
- شکل (۴-۱) ورق مسطح تک‌لایه ۱۳
- شکل (۵-۱) گره‌های ورق معیوب ۱۵
- شکل (۱-۲) تیر سالم با تکیه‌گاه ساده ۲۸
- شکل (۲-۲) مقادیر ضریب α برای گره‌های تیر سالم ۲۹
- شکل (۳-۲) تغییرات شاخص عیب برای تیر دارای یک عیب متناظر با حالت‌های اول تا چهارم جدول (۱-۲)، (الف) حالت ۱، (ب) حالت ۲، (ج) حالت ۳، (د) حالت ۴ ۳۱
- شکل (۴-۲) تغییرات شاخص عیب برای تیر دارای دو عیب متناظر با حالت‌های پنجم تا هشتم جدول (۱-۲)، (الف) حالت ۵، (ب) حالت ۶، (ج) حالت ۷، (د) حالت ۸ ۳۳
- شکل (۵-۲) تغییرات شاخص عیب برای تیر دارای سه عیب متناظر با حالت‌های نهم تا دوازدهم جدول (۱-۲)، (الف) حالت ۹، (ب) حالت ۱۰، (ج) حالت ۱۱، (د) حالت ۱۲ ۳۵
- شکل (۶-۲) ارتباط بین کاهش مدول الاستیسیته و شاخص عیب در تیر دارای یک عیب ۳۷
- شکل (۷-۲) تیر دوسرگردار مرکب ۸ لایه ۳۹
- شکل (۸-۲) مقادیر شاخص عیب برای ۱۱ گره از سطح فوقانی تیر معیوب ۴۱
- شکل (۹-۲) مقادیر شاخص عیب برای ۱۱ گره از سطح فوقانی تیر معیوب، (الف) جدایش بین لایه‌ای ۵ و ۶، (ب) جدایش بین لایه‌ای ۶ و ۷، (ج) جدایش بین لایه‌ای ۷ و ۸ ۴۲
- شکل (۱۰-۲) مقادیر شاخص عیب برای ۲۱ گره از سطح فوقانی تیر معیوب ۴۳
- شکل (۱۱-۲) مقادیر شاخص عیب برای ۲۱ گره از سطح فوقانی تیر معیوب ۴۴
- شکل (۱-۳) تیر یکسرگردار تحریک شده توسط دسته‌ای از نیروی خارجی ۴۷
- شکل (۲-۳) تیر مورد بررسی با تکیه‌گاه یکسرگردار ۵۱
- شکل (۳-۳) مقدار تابع پاسخ فرکانسی هر گره از - تیر سالم، - تیر معیوب ۵۲
- شکل (۵-۳) انحنای اختلاف مقادیر توابع پاسخ فرکانسی تیر سالم و تیر معیوب ۵۴
- شکل (۶-۳) انحنای اختلاف مقادیر توابع پاسخ فرکانسی تیر سالم و تیر معیوب در تحریک تیر با فرکانس 30 Hz ۵۵
- شکل (۷-۳) انحنای اختلاف مقادیر توابع پاسخ فرکانسی تیر سالم و تیر معیوب ۵۶
- شکل (۸-۳) انحنای اختلاف مقادیر توابع پاسخ فرکانسی تیر سالم و تیر معیوب ۵۷
- شکل (۹-۳) انحنای اختلاف مقادیر توابع پاسخ فرکانسی تیر سالم و تیر معیوب ۵۸
- شکل (۱۰-۳) انحنای اختلاف مقادیر توابع پاسخ فرکانسی تیر سالم و تیر معیوب ۵۹
- شکل (۱۱-۳) انحنای اختلاف مقادیر توابع پاسخ فرکانسی تیر سالم و تیر معیوب دارای دو عیب ۶۰
- شکل (۱۲-۳) انحنای اختلاف مقادیر توابع پاسخ فرکانسی تیر سالم و تیر معیوب دارای سه عیب، (a) تیر با تکیه‌گاه در ابتدای تیر و نیرو در انتهای تیر (b) تیر با تکیه‌گاه در انتهای تیر و نیرو در ابتدای تیر (c) مجموع هر دو شرایط تکیه‌گاهی ۶۲

- شکل (۳-۱۳) تیر مرکب ۳ لایه با تکیه‌گاه یکسرگیردار ۶۳
- شکل (۳-۱۴) موقعیت جدایش بین‌لایه‌ای شبیه‌سازی شده در تیر مرکب ۳ لایه ۶۵
- شکل (۳-۱۵) انحنای اختلاف مقادیر توابع پاسخ فرکانسی گره‌های مورد بررسی تیر سالم و تیر دارای یک جدایش بین‌لایه‌ای ۶۵
- شکل (۳-۱۶) موقعیت دو جدایش بین‌لایه‌ای شبیه‌سازی شده در تیر مرکب ۳ لایه ۶۶
- شکل (۳-۱۷) انحنای اختلاف مقادیر توابع پاسخ فرکانسی تیر سالم و تیر معیوب دارای دو جدایش بین‌لایه‌ای، (الف) تیر با تکیه‌گاه در ابتدای تیر و نیرو در انتهای تیر (ب) تیر با تکیه‌گاه در انتهای تیر و نیرو در ابتدای تیر (ج) مجموع هر دو شرایط تکیه‌گاهی ۶۷
- شکل (۳-۱۸) موقعیت چهار جدایش بین‌لایه‌ای شبیه‌سازی شده در تیر مرکب ۳ لایه ۶۹
- شکل (۳-۱۹) انحنای اختلاف مقادیر توابع پاسخ فرکانسی تیر سالم و تیر معیوب دارای چهار جدایش بین‌لایه‌ای، (الف) تیر با تکیه‌گاه در ابتدای تیر و نیرو در انتهای تیر (ب) تیر با تکیه‌گاه در انتهای تیر و نیرو در ابتدای تیر (ج) مجموع هر دو شرایط تکیه‌گاهی ۷۰
- شکل (۴-۱) جدایش بین‌لایه‌ای ۷۳
- شکل (۴-۲) ورق مرکب سه لایه با تکیه‌گاه یکسرگیردار تحت اثر نیروی متناوب ۷۵
- شکل (۴-۳) موقعیت هندسی جدایش بین‌لایه‌ای بین لایه‌های ۲ و ۳ ۷۵
- شکل (۴-۴) مقدار شاخص عیب گره‌های سطح فوقانی ورق با یک جدایش بین‌لایه‌ای ۷۶
- شکل (۴-۵) مقدار شاخص عیب گره‌های سطح فوقانی ورق با یک جدایش بین‌لایه‌ای ۷۷
- شکل (۴-۶) مقدار شاخص عیب گره‌های سطح فوقانی ورق با یک جدایش بین‌لایه‌ای ۷۸
- شکل (۴-۷) مقدار شاخص عیب گره‌های سطح فوقانی ورق با یک جدایش بین‌لایه‌ای ۷۹
- شکل (۴-۸) مقدار شاخص عیب گره‌های سطح فوقانی ورق با یک جدایش بین‌لایه‌ای ۸۰
- شکل (۴-۹) موقعیت هندسی یک جدایش بین‌لایه‌ای در مرکز ورق ۸۱
- شکل (۴-۱۰) مقدار شاخص عیب گره‌های سطح فوقانی ورق دارای یک جدایش بین‌لایه‌ای در مرکز ۸۲
- شکل (۴-۱۱) موقعیت هندسی دو جدایش بین‌لایه‌ای در ورق سه لایه ۸۳
- شکل (۴-۱۲) مقدار شاخص عیب گره‌های سطح فوقانی ورق با دو جدایش بین‌لایه‌ای ۸۳
- شکل (۴-۱۳) ورق مرکب ۳ لایه با تکیه‌گاه گیردار در یک لبه ۸۴
- شکل (۴-۱۴) مقدار شاخص عیب گره‌های سطح فوقانی ورق با تکیه‌گاه گیردار در یک لبه و با دو جدایش بین‌لایه‌ای ۸۵
- شکل (۴-۱۵) مقدار شاخص عیب گره‌های سطح فوقانی ورق با تکیه‌گاه گیردار در یک لبه و با دو جدایش بین‌لایه‌ای ۸۷
- شکل (۴-۱۶) ورق مرکب هشت لایه با تکیه‌گاه گیردار در یک لبه ۸۸
- شکل (۴-۱۷) موقعیت هندسی دو جدایش بین‌لایه‌ای در ورق هشت لایه ۸۹
- شکل (۴-۱۸) مقدار شاخص عیب گره‌های سطح فوقانی ورق هشت لایه دارای دو جدایش بین‌لایه‌ای در صفحه مرکزی ۹۰
- شکل (۴-۱۹) موقعیت هندسی چهار جدایش بین‌لایه‌ای در ورق مرکب هشت لایه ۹۱
- شکل (۴-۲۰) مقدار شاخص عیب گره‌های سطح فوقانی ورق هشت لایه دارای چهار جدایش بین‌لایه‌ای ۹۱
- شکل (۵-۱) تیر تک‌لایه با تکیه‌گاه ساده در لبه‌ها ۹۴

- شکل (۲-۵) تعیین موقعیت عیب در تیر با استفاده از (الف) روش انحنای شکل مود تیر، (ب) استفاده از شاخص عیب تیر ۹۵
- شکل (۳-۵) شبیه‌سازی یک عیب بسیار کوچک در تیر ۹۶
- شکل (۴-۵) روش انحنای شکل مود در تعیین موقعیت عیوب کوچک تیر، (الف) عیب با شدت ۰.۵٪ کاهش مدول الاستیسیته و استفاده از تمامی المانها، (ب) عیب با شدت ۰.۸٪ کاهش مدول الاستیسیته و استفاده از تمامی المانها، (ج) عیب با شدت ۰.۸٪ کاهش مدول الاستیسیته و استفاده از المانهای انتخاب شده ۹۸
- شکل (۵-۵) تغییرات مقدار معیار عیب در امتداد تیر ۹۹
- شکل (۶-۵) تغییرات مقدار معیار عیب بین گره‌های ۵۱ تا ۶۱ تیر ۹۹
- شکل (۷-۵) نمایی از پل Z24 در کشور سوئیس ۱۰۰
- شکل (۸-۵) نمایی از موقعیت عیب در پل Z24 ۱۰۱
- شکل (۹-۵) شکل مود پل سالم و پل معیوب، — شکل مود پل سالم، - شکل مود پل معیوب ۱۰۱
- شکل (۱۰-۵) اختلاف مطلق انحنای شکل مود پل سالم و پل معیوب ۱۰۲
- شکل (۱۱-۵) مقدار معیار عیب برای نقاط مختلف پل ۱۰۳
- شکل (۱۲-۵) تیر تک‌لایه با تکیه‌گاه یکسرگیردار ۱۰۴
- شکل (۱۳-۵) تعیین موقعیت عیوب با استفاده از روشهای مختلف استفاده از توابع پاسخ فرکانسی تیر، (الف) روش انحنای توابع پاسخ فرکانسی با تحریک سیگنال تصادفی، (ب) روش میان‌یابی توابع پاسخ فرکانسی و استفاده از معیار عیب لیمونگلی با تحریک سیگنال تصادفی، (ج) روش انحنای توابع پاسخ فرکانسی با تحریک نیروی متناوب، (د) روش میان‌یابی توابع پاسخ فرکانسی و استفاده از انحنای توابع پاسخ فرکانسی با تحریک نیروی متناوب ۱۰۵
- شکل (۱۴-۵) تعیین موقعیت عیوب با استفاده از روشهای مختلف استفاده از توابع پاسخ فرکانسی تیر، (الف) روش انحنای توابع پاسخ فرکانسی با تحریک سیگنال تصادفی، (ب) روش میان‌یابی توابع پاسخ فرکانسی و استفاده از معیار عیب لیمونگلی با تحریک سیگنال تصادفی، (ج) روش انحنای توابع پاسخ فرکانسی با تحریک نیروی متناوب، (د) روش میان‌یابی توابع پاسخ فرکانسی و استفاده از انحنای توابع پاسخ فرکانسی با تحریک نیروی متناوب ۱۰۷
- شکل (۱۵-۵) موقعیت عیب در ورق تک‌لایه با تکیه‌گاه یکسرگیردار ۱۰۸
- شکل (۱۶-۵) موقعیت عیب در ورق، (الف) روش انحنای تفاضل محدود شکل مود، (ب) روش انحنای اصلی شکل مود، (ج) روش انحنای شکل مود با استفاده از همسان‌سازی شکاف، (د) روش انحنای اصلی شکل مود با استفاده از همسان‌سازی شکاف ۱۰۹
- شکل (۱۷-۵) ورق مرکب سه لایه با تکیه‌گاه یکسرگیردار ۱۱۰
- شکل (۱۸-۵) موقعیت هندسی جدایش بین‌لایه‌ای در ورق مرکب سه لایه ۱۱۱
- شکل (۱۹-۵) موقعیت جدایش بین‌لایه‌ای در ورق، (الف) روش انحنای تفاضل محدود شکل مود، (ب) روش انحنای اصلی شکل مود، (ج) روش انحنای شکل مود با استفاده از همسان‌سازی شکاف، (د) روش انحنای اصلی شکل مود با استفاده از همسان‌سازی شکاف ۱۱۱
- شکل (۲۰-۵) ورق مرکب سه لایه با ضخامت کم ۱۱۲
- شکل (۲۱-۵) موقعیت هندسی جدایش بین‌لایه‌ای در ورق مرکب با ضخامت کم ۱۱۳

- شکل (۲۲-۵) موقعیت جدایش بین لایه‌ای در ورق با ضخامت کم، (الف) روش انحنای تفاضل محدود شکل مود، (ب) روش انحنای اصلی شکل مود، (ج) روش انحنای شکل مود با استفاده از همسان سازی شکاف، (د) روش انحنای اصلی شکل مود با استفاده از همسان سازی شکاف..... ۱۱۳
- شکل (۲۳-۵) ورق مرکب سه لایه با تکیه‌گاه یکسرگیردار..... ۱۱۴
- شکل (۲۴-۵) موقعیت جدایش بین لایه‌ای در ورق با ضخامت کم، (الف) روش انحنای تفاضل محدود توابع پاسخ فرکانسی، (ب) روش انحنای اصلی توابع پاسخ فرکانسی، (ج) روش انحنای توابع پاسخ فرکانسی با استفاده از همسان سازی شکاف، (د) روش انحنای اصلی توابع پاسخ فرکانسی با استفاده از همسان سازی شکاف..... ۱۱۵
- شکل (۲۵-۵) موقعیت جدایش بین لایه‌ای در ورق مرکب سه لایه با استفاده از شاخص عیب..... ۱۱۶

فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۲) شرایط مختلف برای معرفی عیوب در تیر ۳۰
- جدول (۲-۲) مقدار شاخص عیب در موقعیت عیب ۱ و عیب ۲ برای حالت‌های مختلف قرارگیری عیوب... ۳۶
- جدول (۳-۲) مقایسه درصد کاهش مدول الاستیسیته المان معیوب شبیه‌سازی شده با مقادیر شاخص عیب
و شاخص عیب اصلاح شده المان معیوب..... ۳۸

فهرست علائم و اختصارات

| | |
|------------------|--------------------------------------|
| A | سطح مقطع |
| $a(\omega)$ | تابع پاسخ فرکانسی سازه |
| b | پهنای تیر |
| E_x | مدول الاستیسیته در جهت x |
| E_y | مدول الاستیسیته در جهت y |
| f | فرکانس تحریک |
| G | شاخص عیب تیر |
| G_{xy} | مدول برشی در صفحه xy |
| G_{yz} | مدول برشی در صفحه yz |
| h | ضخامت |
| I_{xx} | ممان اینرسی حول محور x |
| K | ماتریس سفتی سازه |
| κ_{xxi}^m | انحنای شکل مود سازه در صفحه xz |
| κ_{yyi}^m | انحنای شکل مود سازه در صفحه yz |
| κ_{xyi}^m | انحنای شکل مود سازه در صفحه xy |
| κ_{xxi}^a | انحنای توابع پاسخ فرکانسی در صفحه xz |
| L | طول تیر |
| ρ | چگالی |
| ρ_v | شعاع انحنا |
| $S_{ff}(\omega)$ | تابع چگالی احتمال متغیر خروجی |
| $S_{xx}(\omega)$ | تابع چگالی احتمال متغیر ورودی |
| u | مولفه بردار جابه‌جایی در جهت x |

| | |
|------------|--|
| v | مولفه بردار جابه‌جایی در جهت y |
| v_{xy} | ضریب پواسون بیانگر کرنش در جهت y و تحت اثر تنش اعمالی در جهت x |
| w | مولفه بردار جابه‌جایی در جهت z |
| ω_n | فرکانس طبیعی |
| Z | شاخص عیب ورق |

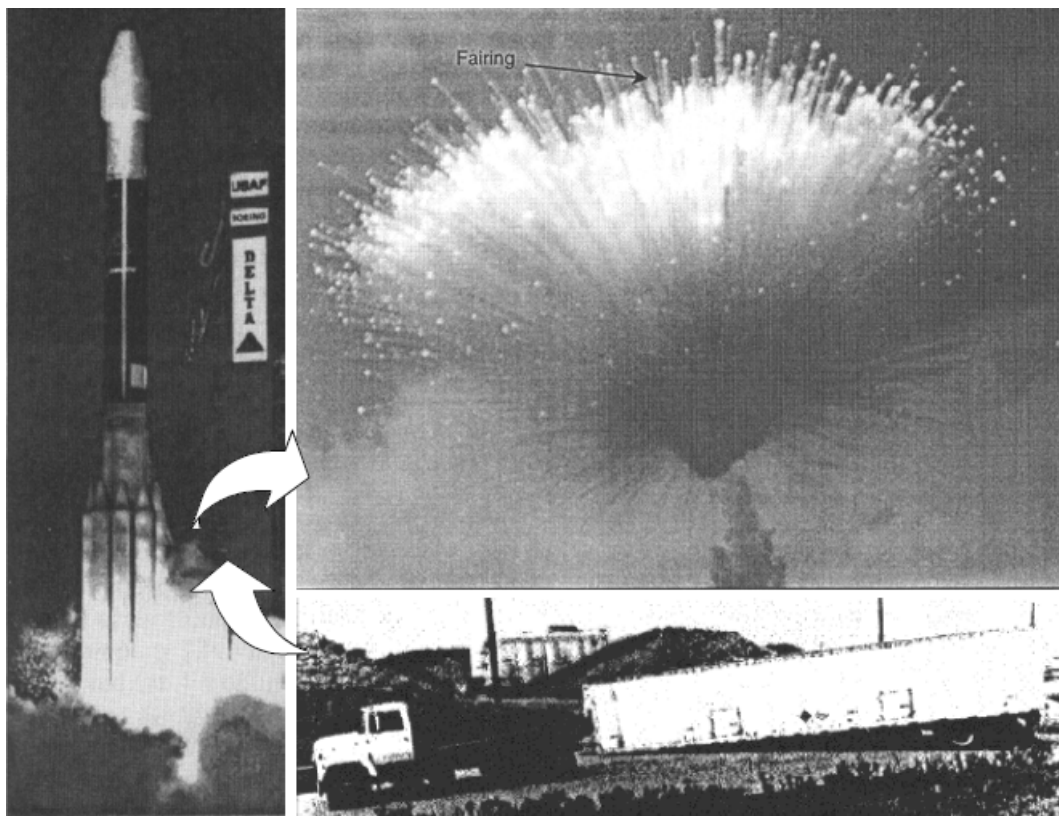
۱- مقدمه

۱-۱- اهمیت آشکارسازی سلامت سازه

روش‌های آشکارسازی سلامت سازه^۱ برای استفاده مطمئن از سازه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و افزایش بهره‌وری تجهیزات مختلف به‌ویژه تجهیزات هوافضایی اهمیت بالایی دارد. به‌منظور آشکارسازی سلامت سازه نیاز به روش‌های شناسایی عیوب احتمالی در سازه است که در صورت تعیین موقعیت و شدت عیوب احتمالی می‌تواند به‌عنوان ابزار بسیار مفیدی برای تصمیم‌گیری دربارهٔ توقف تجهیزات و اجرای عملیات تعمیر و نگهداری استفاده شود. روش‌های معمول شناسایی عیوب استفاده از آزمایش‌های غیرمخرب^۲ مانند بازرسی بصری^۳، روش‌های مافوق صوت^۴، رادیوگرافی^۵ و انتشار امواج آکوستیک^۶ است [۱]. اجرای این روش‌های بازبینی سازه همزمان با استفاده از آنها امکان‌پذیر نیست و اصطلاحاً روش آزمایش غیرفعال^۷ هستند، بدین معنی که استفاده از تجهیزات همزمان با انجام این آزمایش‌ها امکان‌پذیر نیست و برای آشکارسازی سلامت تجهیزات، باید از سرویس‌دهی خارج شوند که این موجب اتلاف زمان و افزایش هزینه تعمیر و نگهداری تجهیزات می‌شود. گاهی برخی از این روش‌ها در مواردی مانند آزمایش‌های بازرسی هواپیما و سازه‌های فضایی غیرکاربردی هستند [۲]، زیرا در اغلب این روش‌ها نیاز به اطلاع از محدودهٔ ایجاد عیوب است و دسترسی به قسمت مورد نظر سازه باید امکان‌پذیر

-
1. structural health monitoring
 2. non-destructive tests
 3. visual inspection
 4. ultrasonic methods
 5. radiography
 6. elastic waves propagation
 7. pasive

باشد [۳]. آزمایش‌های غیرمخرب رایج اطلاعات محدودی از سلامت سازه در مدت زمان توقف سازه ارائه می‌دهند در صورتی که برای افزایش قابلیت اطمینان و ایمنی سازه نیاز است در کلیه زمان سرویس‌دهی سازه اطلاعات دقیقی از سلامت سازه تهیه شود و در اختیار کاربر تجهیزات قرار گیرد که اصطلاحاً به آن روش فعال آشکارسازی سلامت سازه می‌گویند. بنابراین نیاز به روشی است که توسط آن بتوان اطلاعات کاملی از سلامت کل سازه حتی نواحی غیرقابل دسترس سازه را در هر زمان دلخواه از سرویس‌دهی سازه بدست آورد. نیاز به ارائه چنین روشی بعد از ۱۷ ژانویه سال ۱۹۹۷ و در پی انفجار راکت دلتا ۲ در ماموریت ۲۴۱ خود، بعد از ۱۲/۵ ثانیه پس از شروع پرتاب، بیشتر احساس شد. شکل (۱-۱) نحوه انتقال راکت به سمت سکوی پرتاب، هندسه آن و زمان انفجار را نشان می‌دهد. تحقیقات پس از انفجار نشان داد [۴] علت انفجار، رشد ترکی بود که در یکی از موتورهای راکت و در هنگام حمل راکت به سمت سکوی پرتاب ایجاد شده بود.



شکل (۱-۱) انفجار راکت دلتا ۲ در ماموریت ۲۴۱ راکت دلتا