



به نام خدا



*Market Code*

## شبه‌سازی ارتعاشات و عیب‌یابی بال هواگردها با استفاده از آنالیز مودال

 دانشگاه بوعلی سینا	مهدی کریمی: دکتری مکانیک، استادیار	توسعه دهندگان:
 دانشگاه بوعلی سینا	توحید دلایی میلان: کارشناسی ارشد، مکانیک	
توحید دلایی میلان		تهیه کننده مستند:
۱۳۹۴ / ۰۴ / ۳۱		تاریخ تنظیم سند:

## چکیده

بال‌های یک هواپیما به مانند حالت استاتیکی، حین پرواز نیز در معرض نیروها و تنش‌های سازه‌ای مختلفی قرار دارند. نیروی گرانش در حالت استاتیکی حائز اهمیت است. هرگونه شتاب‌گیری و کاهش شتاب در طول پرواز، نیروها و تنش‌های سازه‌ای را روی بال‌ها افزایش می‌دهد که متعاقبا به بدنه‌ی هواپیما منتقل می‌شوند. از آنجا که رفتار هر پارامتر تحلیل مودال مانند فرکانس‌های طبیعی، شکل مود، دمپینگ وابسته به خواص الاستیک ماده‌ی سازنده‌ی بال و خواص الاستیک وابسته به جامعیت سازه‌ای بال هستند، هر ناپیوستگی مانند ترک یا آسیب روی سطح بال منجر به تغییر در این پارامترهای طبیعی سازه می‌گردد. انحرافات ناشی از ناپیوستگی در کلیت سازه، به محقق این امکان را می‌دهد تا با بهره‌گیری از روش مهندسی معکوس، شدت و موقعیت عیب را شناسایی کند.

در این پژوهش به عیب‌یابی بال‌های هواپیماها می‌پردازیم. ابتدا نمونه‌ای ساده شده از بال هواپیما را در نرم‌افزار المان محدود انسیس مدل نموده و تحلیل مودال را برای حالات مختلف ترک به منظور استخراج فرکانس‌های طبیعی، به کار بردیم. سپس نتایج خود را با یک مرجع معتبر مقایسه نمودیم؛ این مقایسه هم شامل مقایسه با نتایج تجربی و هم المان محدود می‌شد. حاصل این مقایسه نشان از دقت قابل قبول نرم‌افزار المان محدود انسیس برای شبیه‌سازی فرآیند تحلیل مودال روی بال هواپیما دارد. همچنین اثر دو پارامتر مهم ترک یعنی مکان و عمق آن را بر روی فرکانس‌های طبیعی سازه بررسی کردیم. سپس نتایج این نرم‌افزار را برای آموزش و شبیه‌سازی شبکه‌ی عصبی‌ای به منظور یافتن مکان و عمق ترک به کار بردیم. خطای خروجی شبکه در حد معقول و قابل قبولی (به خصوص برای مکان‌ها و اعماق زیاد) بود.

**کلمات کلیدی :** بال هواپیما؛ آنالیز مودال؛ شبیه‌سازی المان محدود؛ شناسایی ترک؛ شبکه عصبی مصنوعی.

## فهرست مطالب

### فصل ۱- راهنمای کاربری ۱۲

۱۲	۱-۱- مقدمه
۱۳	۲-۱- شبیه‌سازی المان محدود
۱۳	۱-۲-۱- مدل‌سازی بال هواپیما
۲۷	۲-۲-۱- شبکه‌بندی بال هواپیما
۳۵	۳-۲-۱- تعریف شرایط مرزی و نوع تحلیل
۳۹	۴-۲-۱- تحلیل و نتایج آن

### فصل ۲- راهنمای آموزشی ۴۶

۴۶	۱-۲- مقدمه و مفاهیم اولیه
۴۸	۲-۲- مرور ادبیات
۵۰	۳-۲- جایگاه پروژه
۵۲	۴-۲- مدل‌سازی، آزمایش تجربی و المان محدود
۵۲	۱-۴-۲- مدل‌سازی ریاضی
۵۳	۲-۴-۲- ماهیت ترک
۵۶	۳-۴-۲- تحلیل مودال
۶۳	۴-۴-۲- آزمایش تجربی
۶۶	۵-۴-۲- تحلیل مودال المان محدود
۶۸	۶-۴-۲- بررسی اثر ترک بر ارتعاشات بال هواپیما
۷۴	۷-۴-۲- شناسایی ترک در بال هواپیما

### فصل ۳- اعتبارسنجی ۷۸

۷۸	۱-۳- نتایج
----	------------

۲-۳- صحه‌سازی و کارهای آینده ..... ۷۹

## فصل ۴- مستندات برنامه‌نویسی ..... ۸۶

۱-۴- مقدمه ..... ۸۶

۲-۴- تعریف داده‌ها در شبکه‌ی عصبی ..... ۸۶

۳-۴- تعریف شبکه‌ی عصبی و آموزش آن ..... ۹۱

۴-۴- شبیه‌سازی شبکه و مشاهده‌ی نتایج ..... ۱۰۱

۵-۴- شبکه‌ی عصبی برای مکان‌یابی ترک ..... ۱۰۵

## پیوست ..... ۱۰۸

## مراجع ..... ۱۱۴

MarketCode.ir

## فهرست اشکال

- شکل ۱- نمایی از نمونه‌ی ترک‌دار بال مد نظر [۱] ..... ۱۳
- شکل ۲- محیط اولیه‌ی نرم‌افزار انسیس ..... ۱۵
- شکل ۳- پنجره‌ی ایجاد نقاط کلیدی ..... ۱۶
- شکل ۴- نقاط کلیدی ایجاد شده ..... ۱۶
- شکل ۵- پنجره‌ی ایجاد سطح از طریق نقاط کلیدی ..... ۱۷
- شکل ۶- سطح تشکیل شده‌ی بال هواپیما ..... ۱۸
- شکل ۷- انتخاب سطح برای حجم‌دهی ..... ۱۹
- شکل ۸- تعیین ضخامت برای نمونه ..... ۱۹
- شکل ۹- شکل ۳ بعدی بال هواپیما ..... ۲۰
- شکل ۱۰- تصویر سطوح ترک ..... ۲۱
- شکل ۱۱- ایجاد نقاط کلیدی برای تشکیل سطوح ترک ..... ۲۱
- شکل ۱۲- ایجاد سطوح ترک: (الف) قبل، (ب) بعد، از ایجاد سطوح ..... ۲۲
- شکل ۱۳- جداسازی حجم تشکیل شده توسط سطوح ترک از حجم بال ..... ۲۳
- شکل ۱۴- فهرست سطوح در انسیس ..... ۲۴
- شکل ۱۵- شکل نهایی جداسازی حجم‌ها ..... ۲۵
- شکل ۱۶- فهرست حجم‌ها در انسیس ..... ۲۶
- شکل ۱۷- حذف حجم حاصل از سطوح ترک ..... ۲۶
- شکل ۱۸- نمای ترک ایجاد شده ..... ۲۷
- شکل ۱۹- تعریف نوع المان ..... ۲۸
- شکل ۲۰- تعریف خواص الاستیک بال هواپیما ..... ۲۹
- شکل ۲۱- تعریف چگالی بال هواپیما ..... ۳۰

- شکل ۲۲- تعریف اندازه‌ی المان‌های نزدیک به ترک ..... ۳۱
- شکل ۲۳- تعیین اندازه‌ی المان‌های نزدیک ترک ..... ۳۱
- شکل ۲۴- تعیین اندازه‌ی کلی المان‌های شبکه ..... ۳۲
- شکل ۲۵- انتخاب حجم کل برای شبکه‌بندی ..... ۳۳
- شکل ۲۶- نرم‌افزار در حال شبکه‌بندی قطعه ..... ۳۴
- شکل ۲۷- نمای شبکه‌بندی شده‌ی بال هواپیما ..... ۳۴
- شکل ۲۸- اندازه‌بندی المان‌ها در نزدیکی و دور از ترک ..... ۳۵
- شکل ۲۹- تعریف شرایط مرزی در سمت راست بال ..... ۳۶
- شکل ۳۰- تعریف جابجایی صفر برای تمام گره‌های روی سطح جانبی سمت راست بال ..... ۳۶
- شکل ۳۱- تعریف نوع تحلیل در نرم‌افزار ..... ۳۷
- شکل ۳۲- تعیین تعداد فرکانس طبیعی برای استخراج ..... ۳۸
- شکل ۳۳- تعیین دامنه‌ی فرکانس‌های استخراجی ..... ۳۹
- شکل ۳۴- شروع حل تحلیل ..... ۴۰
- شکل ۳۵- نرم‌افزار در حال تحلیل ..... ۴۱
- شکل ۳۶- پیغام نرم‌افزار مبنی بر اتمام تحلیل ..... ۴۱
- شکل ۳۷- خلاصه‌ای از نتایج نرم‌افزار ..... ۴۲
- شکل ۳۸- مشاهده‌ی جابجایی‌های ایجاد شده در بال ..... ۴۳
- شکل ۳۹- مودهای ارتعاشی بال هواپیما: (الف) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مد سوم ..... ۴۵
- شکل ۴۰- تعاریف مقدماتی در مورد ترک [۳] ..... ۵۴
- شکل ۴۱- ترک باز و ترک بسته [۳] ..... ۵۵
- شکل ۴۲- ترک عمودی و افقی [۳] ..... ۵۶
- شکل ۴۳- اجزای یک سیستم اندازه‌گیری ارتعاشات برای آنالیز مودال [۲۰] ..... ۵۷

- شکل ۴۴- طیف فرکانسی به دست آمده از یک چکش ضربه [۲۰] ..... ۵۹
- شکل ۴۵- اجزای داخلی شتابسنج [۲] ..... ۶۰
- شکل ۴۶- حساسیت حسگرهای شتابسنج بر حسب فرکانس [۲] ..... ۶۱
- شکل ۴۷- حساسیت حسگرهای شتابسنج نسبت به فرکانس طبیعی [۲] ..... ۶۲
- شکل ۵۰- دستگاه آنالیز (FFT) ..... ۶۵
- شکل ۵۱- ساختار المان SOLID186 ..... ۶۷
- شکل ۵۲- شکل مودهای نمونه‌ی ترک‌دار بال هواپیما (الف) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مود سوم ..... ۶۹
- شکل ۵۳- تغییرات فرکانس‌های طبیعی بال نسبت به تغییرات محل ترک برای عمق ۳ میلی‌متر ..... ۷۰
- (الف) فرکانس اول، (ب) فرکانس دوم، (ج) فرکانس سوم ..... ۷۰
- شکل ۵۴- تغییرات فرکانس‌های طبیعی بال نسبت به تغییرات محل ترک برای عمق ۵ میلی‌متر ..... ۷۱
- (الف) فرکانس اول، (ب) فرکانس دوم، (ج) فرکانس سوم ..... ۷۱
- شکل ۵۵- تغییرات فرکانس‌های طبیعی بال نسبت به تغییرات عمق ترک برای مکان ۴۵ سانتی‌متر ..... ۷۲
- (الف) فرکانس اول، (ب) فرکانس دوم، (ج) فرکانس سوم ..... ۷۲
- شکل ۵۶- تغییرات فرکانس‌های طبیعی بال نسبت به تغییرات عمق ترک برای مکان ۱۰۰ سانتی‌متر ..... ۷۳
- (الف) فرکانس اول، (ب) فرکانس دوم، (ج) فرکانس سوم ..... ۷۳
- شکل ۵۷- ورودی‌ها و خروجی شبکه‌های عصبی برای شناسایی (الف) مکان ترک (ب) عمق ترک [۲] ..... ۷۵
- شکل ۵۸- فرآیند آموزش شبکه‌ی عصبی برای پیش‌بینی مکان ترک ..... ۷۶
- شکل ۵۹- فرآیند آموزش شبکه‌ی عصبی برای پیش‌بینی عمق ترک ..... ۷۷
- جدول ۱۳- مقایسه‌ی نتایج پیش‌بینی شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای مکان و عمق ترک در نمونه‌ی بال
- هواپیما ..... ۸۴
- شکل ۶۰- محیط نرم‌افزار متلب ..... ۸۷
- شکل ۶۱- تعریف متغیرهای شبکه‌ی عصبی ..... ۸۸

- شکل ۶۲- تعریف داده‌های ورودی شبکه‌ی عصبی ..... ۸۹
- شکل ۶۳- تعریف داده‌های نمونه‌ی شبکه‌ی عصبی ..... ۸۹
- شکل ۶۴- تعریف داده‌های هدف شبکه‌ی عصبی ..... ۹۰
- شکل ۶۶- اجرای دستور nntool برای اجرای جعبه ابزار شبکه‌ی عصبی ..... ۹۲
- شکل ۶۷- محیط جعبه ابزار شبکه‌ی عصبی ..... ۹۲
- شکل ۶۸- شناساندن داده‌های ورودی به شبکه‌ی عصبی ..... ۹۳
- شکل ۶۹- شناساندن داده‌های نمونه به شبکه‌ی عصبی ..... ۹۴
- شکل ۷۰- شناساندن داده‌های هدف به شبکه‌ی عصبی ..... ۹۵
- شکل ۷۱- تعریف نوع شبکه‌ی عصبی ..... ۹۶
- شکل ۷۲- ساختار شبکه‌ی عصبی ..... ۹۷
- شکل ۷۳- تعریف داده‌های مورد نیاز برای شبکه‌ی عصبی ..... ۹۷
- شکل ۷۴- تعیین معیارهای توقف شبکه‌ی عصبی ..... ۹۸
- شکل ۷۵- فرآیند آموزش شبکه‌ی عصبی برای عمق ترک ..... ۹۹
- شکل ۷۶- نمودار عملکرد شبکه‌ی عصبی برای عمق ترک ..... ۱۰۰
- شکل ۷۷- شبیه‌سازی نمونه‌ها ..... ۱۰۱
- شکل ۷۸- نتایج حاصل از شبیه‌سازی شبکه‌ی عصبی برای عمق ترک ..... ۱۰۲
- شکل ۷۹- استخراج نتایج پیش‌بینی شبکه‌ی عصبی ..... ۱۰۳
- شکل ۸۰- نتایج پیش‌بینی شبکه‌ی عصبی از عمق ترک ..... ۱۰۴
- شکل ۸۱- فرآیند آموزش شبکه‌ی عصبی برای مکان ترک ..... ۱۰۵
- شکل ۸۲- نمودار عملکرد شبکه‌ی عصبی برای عمق ترک ..... ۱۰۶
- شکل ۸۳- نتایج حاصل از شبیه‌سازی شبکه‌ی عصبی برای عمق ترک ..... ۱۰۶
- شکل ۸۴- نتایج پیش‌بینی شبکه‌ی عصبی از عمق ترک ..... ۱۰۷



شکل ۸۵- شکل ۱- نواحی اصلی یک سلول عصبی بیولوژیک [۲۱]..... ۱۰۹

MarketCode.ir

## فهرست جداول

- جدول ۱- مشخصات هندسی نمونه‌ی بال ..... ۱۳
- جدول ۲- مشخصات خواص ماده ..... ۱۴
- جدول ۳- نقاط اولیه برای تشکیل سطح فوقانی بال ..... ۱۵
- جدول ۴- نقاط کلیدی برای ایجاد سطوح ترک ..... ۲۰
- جدول ۵- مقایسه‌ی نتایج المان محدود مرجع [۱] و المان محدود این پژوهش برای بال بدون ترک ..... ۸۰
- جدول ۶- مقایسه‌ی نتایج المان محدود مرجع [۱] و المان محدود این پژوهش برای بال با ترک در مکان ۷۵ سانتی‌متر و عمق ۳ میلی‌متر ..... ۸۰
- جدول ۷- مقایسه‌ی نتایج المان محدود مرجع [۱] و المان محدود این پژوهش برای بال با ترک در مکان ۷۵ سانتی‌متر و عمق ۴ میلی‌متر ..... ۸۱
- جدول ۸- مقایسه‌ی نتایج المان محدود مرجع [۱] و المان محدود این پژوهش برای بال با ترک در مکان ۷۵ سانتی‌متر و عمق ۵ میلی‌متر ..... ۸۱
- جدول ۹- مقایسه‌ی نتایج تحلیل تجربی و المان محدود بال بدون ترک ..... ۸۲
- جدول ۱۰- مقایسه‌ی نتایج تحلیل تجربی و المان محدود بال با ترک در مکان ۷۵ سانتی‌متر و عمق ۳ میلی‌متر ..... ۸۲
- جدول ۱۱- مقایسه‌ی نتایج تحلیل تجربی و المان محدود بال با ترک در مکان ۷۵ سانتی‌متر و عمق ۴ میلی‌متر ..... ۸۲
- جدول ۱۲- مقایسه‌ی نتایج تحلیل تجربی و المان محدود بال با ترک در مکان ۷۵ سانتی‌متر و عمق ۵ میلی‌متر ..... ۸۳