به نام خدا

# مدل‌سازی و تحلیل کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی لایه‌ای سوراخ‌دار با استفاده از نرم افزار «آباکوس»

نسخه: ۱/۰

| | | |
|---|---|---|
| توسعه دهنده (گان): | نام و نام خانوادگی: منصور ملکی،<br>تحصیلات : کارشناسی ارشد،<br>رتبه علمی: مربی | |
| تهیه کننده مستند: | منصور ملکی | |
| تاریخ تنظیم سند: | ۹۳ /۰۶ / ۲۷ | |

## فهرست مطالب

**عنوان** **شماره صفحه**

**چکیده**

### فصل اول : کلیات تحقیق

۱-۱- بیان مسئله..... ۱۰

۱-۲- اهمیت و ضرورت تحقیق..... ۱۱

۱-۳- اهداف..... ۱۱

### فصل دوم: اعتبارسنجی و روش اجرای تحقیق

۲-۱- تحلیل عملی «پریادارسینی» در کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی..... ۱۲

۲-۱-۱- مشخصات نمونه..... ۱۲

۲-۲- تحلیل المان محدود..... ۱۴

۲-۲-۱- مدل‌سازی و اعتبارسنجی روش تحلیل المان محدود..... ۱۵

۲-۲-۱-۱- خصوصیات مدل و نحوهٔ مدل‌سازی فرآیند..... ۱۵

۲-۲-۱-۲- تعیین روش مناسب تحلیل کمانش..... ۱۶

۲-۲-۱-۳- تعیین مدت زمان مناسب بارگذاری..... ۱۷

۲-۲-۱-۴- تعیین تعداد المان مناسب جهت مش‌بندی فرآیند مدل‌سازی..... ۱۸

۲-۲-۱-۵- مدل‌سازی نهایی و اعتبارسنجی کمانش پوسته..... ۲۱

۲-۲-۲- مدل‌سازی و تعیین اثر شکل سوراخ بر مقاومت کمانشی پوستهٔ استوانه‌ای معیار..... ۲۳

۲-۲-۲-۱- بررسی و تعیین حالت بهینهٔ مساحت سوراخ..... ۲۴

۲-۲-۲-۲- بررسی و تعیین نوع بهینهٔ شکل سوراخ..... ۲۶

۲-۲-۳- بررسی اثر زاویهٔ الیاف و چیدمان لایه‌ها بر میزان مقاومت کمانشی پوستهٔ استوانه‌ای..... ۲۷

۲-۲-۴- بررسی اثر ضخامت لایه‌ها بر میزان مقاومت کمانشی پوستهٔ استوانه‌ای..... ۲۷

۲-۲-۵- بررسی اثر طول استوانه بر میزان مقاومت کمانشی پوستهٔ استوانه‌ای..... ۲۸

۲-۳- تجزیه و تحلیل داده ها..... ۲۹

۲-۳-۱- مدل سازی سوراخ دایره ای..... ۲۹

۲-۳-۲- مدل سازی سوراخ مربعی..... ۳۲
۲-۳-۳- مدل سازی سوراخ مستطیلی- قائم..... ۳۵
۲-۳-۴- مدل سازی سوراخ مستطیلی- افقی..... ۳۸
۲-۳-۵- مدل سازی سوراخ بیضوی- قائم..... ۴۱
۲-۳-۶- مدل سازی سوراخ بیضوی- افقی..... ۴۴
۲-۴- نتیجه گیری و پیشنهادات..... ۴۸
۲-۴-۱- نتیجه گیری نهایی..... ۴۸
۲-۴-۲- پیشنهاد برای آینده تحقیق..... ۴۹

## فصل سوم: مستندات آموزشی

۳-۱- مدل سازی استوانه..... ۵۰
۳-۲- مدل سازی سوراخ های بیضوی بر روی بدنه استوانه..... ۵۴
۳-۳- تعریف فک ها..... ۶۰
۳-۴- تعریف مواد و جنس..... ۶۴
۳-۴-۱- تعریف خواص مکانیکی ماده..... ۶۴
۳-۴-۲- تعریف کامپوزیته بودن ماده..... ۶۹
۳-۵- مونتاژ کردن..... ۷۱
۳-۶- تعریف روش حل..... ۸۱
۳-۷- انتخاب بارگذاری و شرایط مرزی..... ۹۹
۳-۸- مش بندی..... ۱۱۲
۳-۹- آنالیز نهایی..... ۱۱۸

**منابع و مآخذ**..... ۱۲۳

## فهرست جداول

**عنوان** **شماره صفحه**


جدول (۱) خواص مکانیکی آزمایشگاهی کامپوزیت‌های CFRP.....۱۳

جدول (۲) متغیرهای مساله.....۱۴

جدول (۳) خواص مکانیکی استاندارد کامپوزیت‌های CFRP.....۱۶

جدول (۴) مقایسه روش‌های تحلیل کمانش.....۱۶

جدول (۵) مقایسهٔ تأثیر مدت زمان‌های اعمال بارگذاری مختلف بر میزان بار کمانشی .....۱۷

جدول (۶) مقایسهٔ تأثیر تعداد المان‌های مختلف بر میزان بار کمانشی در مدت زمان ثابت.....۱۸

جدول (۷) نیروی کمانش بر حسب درصدهای مختلف کاهش وزن پوستهٔ استوانه‌ای با سوراخ دایره‌ای.....۲۵

جدول (۸) نیروی کمانش برحسب چیدمان‌های اصلی لایه‌گذاری و جهت‌گیری الیاف در مدل با سوراخ دایره‌ای-۳٪.....۲۷

جدول (۹) نیروی کمانش برحسب ضخامت‌های مختلف لایه‌ها در مدل با سوراخ دایره‌ای-۳٪.....۲۸

جدول (۱۰) نیروی کمانش برحسب طول‌های مختلف پوستهٔ استوانه‌ای در مدل با سوراخ دایره‌ای.....۲۹

جدول (۱۱) مقایسهٔ تأثیر نوع شکل سوراخ بر میزان مقاومت کمانشی پوستهٔ استوانه‌ای.....۴۷

## فهرست نمودارها

**عنوان** **شماره صفحه**


نمودار (۱) نیروی کمانشی بر حسب تعداد مش‌بندی مدل..... ۱۹

نمودار (۲) نیرو بر حسب زمان فرآیند کمانش مدل معیار..... ۲۲

نمودار (۳) نیرو بر حسب جابه‌جایی فک بالایی در فرآیند کمانش مدل معیار..... ۲۲

نمودار (۴) نیروی کمانش بر حسب درصدهای کاهش وزن پوستهٔ استوانه‌ای با سوراخ دایره‌ای..... ۲۵

نمودار (۵) نیرو بر حسب زمان فرآیند کمانش مدل با سوراخ های دایره‌ای..... ۳۱

نمودار (۶) نیرو بر حسب جابه‌جایی فک بالایی در فرآیند کمانش مدل با سوراخ های دایره‌ای ..... ۳۲

نمودار (۷) نیرو بر حسب زمان فرآیند کمانش مدل با سوراخ‌های مربعی..... ۳۴

نمودار (۸) نیرو بر حسب جابه‌جایی فک بالایی در فرآیند کمانش مدل با سوراخ‌های مربعی..... ۳۵

نمودار (۹) نیرو بر حسب زمان فرآیند کمانش مدل با سوراخ‌های مستطیلی- قائم..... ۳۷

نمودار (۱۰) نیرو بر حسب جابه‌جایی فک بالایی در فرآیند کمانش مدل با سوراخ‌های مستطیلی- قائم..... ۳۸

نمودار (۱۱) نیرو بر حسب زمان فرآیند کمانش مدل با سوراخ‌های مستطیلی- افق..... ۴۰

نمودار (۱۲) نیرو بر حسب جابه‌جایی فک بالایی در فرآیند کمانش مدل با سوراخ‌های مستطیلی- افقی..... ۴۱

نمودار (۱۳) نیرو بر حسب زمان فرآیند کمانش مدل با سوراخ‌های بیضوی- قائم..... ۴۳

نمودار (۱۴) نیرو بر حسب جابه‌جایی فک بالایی در فرآیند کمانش مدل با سوراخ‌های بیضوی- قائم..... ۴۴

نمودار (۱۵) نیرو بر حسب زمان فرآیند کمانش مدل با سوراخ‌های بیضوی- افقی..... ۴۶

نمودار (۱۶) نیرو بر حسب جابه‌جایی فک بالایی در فرآیند کمانش مدل با سوراخ‌های بیضوی- افقی..... ۴۷

## فهرست اشکال

**عنوان** **شماره صفحه**


شکل (۱) مد کمانش پوستهٔ استوانه‌ای حاصل از آزمایش استاتیکی..... ۱۴

شکل (۲) کانتور تنش و شکل مدهای کمانش مدل در زمان‌های مختلف بر اساس تعداد المان ۳۰۰۰..... ۲۰

شکل (۳) کانتور تنش و شکل مدهای کمانش مدل در بازهٔ زمانی رخداد کمانش..... ۲۳

شکل (۴) کانتور تنش و شکل مدهای کمانش مدل با سوراخ‌های دایره‌ای در زمان‌های مختلف..... ۲۹

شکل (۵) کانتور تنش و شکل مدهای کمانش مدل با سوراخ‌های مربعی در زمان‌های مختلف..... ۳۲

شکل (۶) کانتور تنش و شکل مدهای کمانش مدل با سوراخ‌های مستطیلی- قائم در زمان‌های مختلف..... ۳۵

شکل (۷) کانتور تنش و شکل مدهای کمانش مدل با سوراخ‌های مستطیلی- افقی در زمان‌های مختلف..... ۳۸

شکل (۸) کانتور تنش و شکل مدهای کمانش مدل با سوراخ‌های بیضوی- قائم در زمان‌های مختلف..... ۴۱

شکل (۹) کانتور تنش و شکل مدهای کمانش مدل با سوراخ‌های بیضوی- افقی در زمان‌های مختلف..... ۴۴

شکل (۱۰) نتایج نهایی و دستاوردهای تحقیق..... ۴۸

شکل (۱۱) تعریف مدل ورق استوانه ای..... ۵۰

شکل (۱۲) ترسیم دایره سطح مقطع..... ۵۱

شکل (۱۳) دستور و نحوه اکسترود..... ۵۲

شکل (۱۴) ایجاد استوانه..... ۵۳

شکل (۱۵) ایجاد صفحه معیار جهت تشکیل سوراخ جانبی بیضوی..... ۵۴

شکل (۱۶) انتخاب صفحه جهت عملیات پاکت..... ۵۵

شکل (۱۷) ترسیم بیضی در صفحه انتخابی..... ۵۶

شکل (۱۸) ایجاد سوراخ - خالی کردن سوراخ بیضوی در جداره استوانه..... ۵۷

شکل (۱۹) ایجاد سوراخ بیضوی ثانوی- انتخاب صفحه..... ۵۸

شکل (۲۰) ایجاد نهایی سوراخ بیضوی ثانوی در جداره استوانه..... ۵۹

شکل (۲۱) تعریف صفحه فک ها..... ۶۰

شکل (۲۲) ایجاد صفحه فک ها..... ۶۱

شکل (۲۳) تشکیل نهایی صفحه دایره ای فک بالایی..... ۶۲

شکل (۲۴) انتخاب رفرنس پوینت جهت ایجاد قیود حرکتی و اعمال بار..... ۶۳
شکل (۲۵) تعریف خواص- چگالی ماده..... ۶۴
شکل (۲۶) تعریف خواص- خواص الاستیسیته ماده..... ۶۶
شکل (۲۷) تعریف کامپوزیت- Section..... ۶۹
شکل (۲۸) تعریف کامپوزیت- لایه گذاری..... ۷۰
شکل (۲۹) طریقه مونتاژ..... ۷۱
شکل (۳۰) ایجاد قیود مونتاژی..... ۷۳
شکل (۳۱) جابجایی حین مونتاژ..... ۷۵
شکل (۳۲) مراحل مونتاژ..... ۷۶
شکل (۳۳) مونتاژ نهایی..... ۸۰
شکل (۳۴) روش حل و شبیه سازی- گام۱..... ۸۱
شکل (۳۵) روش حل و شبیه سازی - گام۲..... ۸۲
شکل (۳۶) روش حل و شبیه سازی - گام۳..... ۸۳
شکل (۳۷) روش حل و شبیه سازی - گام۴..... ۸۴
شکل (۳۸) روش حل و شبیه سازی - گام۵..... ۸۵
شکل (۳۹) روش حل و شبیه سازی - گام۶..... ۸۶
شکل (۴۰) روش حل و شبیه سازی - گام۷..... ۸۷
شکل (۴۱) روش حل و شبیه سازی - گام۸..... ۸۸
شکل (۴۲) روش حل و شبیه سازی - گام۹..... ۸۹
شکل (۴۳) روش حل و شبیه سازی - گام۱۰..... ۹۰
شکل (۴۴) روش حل و شبیه سازی - گام۱۱..... ۹۱
شکل (۴۵) روش حل و شبیه سازی - گام۱۲..... ۹۲
شکل (۴۶) روش حل و شبیه سازی - گام۱۳..... ۹۳
شکل (۴۷) روش حل و شبیه سازی – گام۱۴..... ۹۴
شکل (۴۸) روش حل و شبیه سازی - گام۱۵..... ۹۵
شکل (۴۹) روش حل و شبیه سازی - گام۱۶..... ۹۶
شکل (۵۰) روش حل و شبیه سازی - گام۱۷..... ۹۷
شکل (۵۱) روش حل و شبیه سازی - گام۱۸..... ۹۸
شکل (۵۲) انتخاب بارگذاری و شرایط مرزی – گام ۱..... ۹۹

شکل (۵۳) انتخاب بارگذاری و شرایط مرزی – گام ۲..... ۱۰۰
شکل (۵۴) انتخاب بارگذاری و شرایط مرزی – گام ۳..... ۱۰۱
شکل (۵۵) انتخاب بارگذاری و شرایط مرزی – گام ۴..... ۱۰۲
شکل (۵۶) انتخاب بارگذاری و شرایط مرزی – گام ۵..... ۱۰۳
شکل (۵۷) انتخاب بارگذاری و شرایط مرزی – گام ۶..... ۱۰۴
شکل (۵۸) انتخاب بارگذاری و شرایط مرزی – گام ۷..... ۱۰۵
شکل (۵۹) انتخاب بارگذاری و شرایط مرزی – گام ۸..... ۱۰۶
شکل (۶۰) انتخاب بارگذاری و شرایط مرزی – گام ۹..... ۱۰۷
شکل (۶۱) انتخاب بارگذاری و شرایط مرزی – گام ۱۰..... ۱۰۸
شکل (۶۲) انتخاب بارگذاری و شرایط مرزی – گام ۱۱..... ۱۰۹
شکل (۶۳) انتخاب بارگذاری و شرایط مرزی – گام ۱۲..... ۱۱۰
شکل (۶۴) انتخاب بارگذاری و شرایط مرزی – گام ۱۳..... ۱۱۱
شکل (۶۵) مراحل مش بندی– گام ۱..... ۱۱۲
شکل (۶۶) مراحل مش بندی– گام ۲..... ۱۱۳
شکل (۶۷) مراحل مش بندی– گام ۳..... ۱۱۴
شکل (۶۸) مراحل مش بندی– گام ۴..... ۱۱۵
شکل (۶۹) مراحل مش بندی– گام ۵..... ۱۱۶
شکل (۷۰) مراحل مش بندی– گام ۶..... ۱۱۷
شکل (۷۱) آنالیز نهایی- ایجاد JOB- گام ۱..... ۱۱۸
شکل (۷۲) آنالیز نهایی- ایجاد JOB- گام ۲..... ۱۱۹
شکل (۷۳) آنالیز نهایی- ایجاد JOB- گام ۳..... ۱۲۰
شکل (۷۴) آنالیز نهایی- ایجاد JOB- گام ۴..... ۱۲۱
شکل (۷۵) آنالیز نهایی- ایجاد JOB- گام ۵..... ۱۲۲

# چکیده

پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی لایه‌ای سبک وزن، به طور فزاینده ای در ساختارهای هوافضایی پیشرفتهٔ امروزی و همچنین صنایع دریایی به منظور بهبود کارایی ساختاری و عملکردی آن ها مورد استفاده قرار می گیرند.چنین ساختارهای جدار نازکی، هنگامی که در معرض تنش های فشاری استاتیکی و دینامیکی واقع می شوند، نسبت به پدیدهٔ کمانش، حساس و به شدت در معرض خطر خواهند بود. از این رو غالباً مد شکست مرتبط و معیار بررسی حالت بحرانی و تحلیل دینامیکی این نوع پوسته ها بر اساس «کمانش» می باشد.در این پژوهش، جزئیات یک مطالعهٔ عملی- آزمایشگاهی انجام شده توسط «پریادارسینی» و دستیارانش بر روی کمانش سیلندرهای کامپوزیتی لایه ای از جنس پلاستیک تقویت شده با الیاف کربن تحت بارگذاری فشاری محوری کنترل شده تشریح گردیده است و پس از آن با شبیه سازی فرآیند کمانش با استفاده از نرم افزار «آباکوس»، ضمن اعتبار سنجی نتایج حاصله با نتایج روش عملی و با ثابت نگه داشتن کلیهٔ پارامترها و شرایط عملی در شبیه سازی ها، به بررسی تأثیر سوراخ دار بودن پوسته و نیز نوع شکل و اندازهٔ نسبی سوراخ بر میزان مقاومت کمانشی پوسته با هدف بهینه سازی و کاهش وزن آن پرداخته شده است

**کلمات کلیدی:** مدل‌سازی، پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی، کمانش دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای، تحلیل المان محدود

# فصل ۱: کلیات تحقیق

## ۱-۱- بیان مسئله

پوسته های کامپوزیتی استوانه ای، به خاطر نسبت بالای سفتی به جرم خود، از قطعات اصلی صنایع هوایی وهوافضا به شمار می روند. این قطعات، در ساخت بدنهٔ سازه های هوافضایی مانند هواپیما و موشک، مخازن سوخت و نیز در سازه های دریایی مانند جدارهٔ زیردریایی ها به کار گرفته می شوند و معمولاً در معرض ترکیبی از بارگذاری های فشاری، برشی یا بارگذاری عرضی قرار می گیرند. این ساختارها هنگامی که تحت تنش های فشاری دینامیکی یا استاتیکی قرار می گیرند نسبت به ناپایداری ها (کمانش) آسیب پذیرند. بنابراین معمولاً مد شکست مرتبط با این ساختارها، کمانش است [۶-۱].

از سوی دیگر، در سال های اخیر با اهمیت یافتن کاربرد پوسته های کامپوزیتی در صنایع دریایی، فقدان معیار طراحی استحکام کمانشی به عنوان یک مانع در گسترش بیشتر کاربرد این ساختارها درنظر گرفته می شود و از این رو، انجام مدل سازی ها و تحلیل های عددی- المانی در حل این مشکل، بسیار ارزنده خواهد بود.

در این میان، بهینه سازی یا اصلاح ساختاری پوسته های استوانه ای به لحاظ وزنی با توجه به نیاز روز افزون صنایع مزبور در مواردی چون ایجاد سوراخ بر روی جداره پوسته می تواند بسیار مفید و مؤثر واقع شود و این در حالی است که تاکنون بررسی های زیادی بر روی پارامترهای هندسی و جنسی پوسته ها از قبیل زاویه الیاف، چیدمان لایه ها، ضخامت لایه ها، نسبت طول به قطر پوسته، جنس ماتریس و متغیرهایی از این قبیل با درنظر گرفتن ترتیب و مراحل انباشتگی به عنوان یک پارامتر طراحی، صورت گرفته است اما مسئله اساسی کاهش وزن سازه است که در زمینه ایجاد سوراخ کمتر کار شده است.

لذا می توان با به کارگیری شبیه سازی های رایج، ضمن بهینه سازی مقاومت کمانشی ساختارهای پوسته ای استوانه ای، به واسطهٔ ایجاد سوراخ هایی در بدنهٔ آن ها، موجبات کاهش وزن قابل توجهی را در سازه های غول