



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
تاسیس ۱۳۷۲

دانشکده مهندسی هوافضا

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا – سازه های هوایی

# بهینه سازی طراحی مخروط های جدارنازک کامپوزیتی تقویت شده بکار رفته در سازه های هوافضایی

استاد راهنما:

دکتر علی مظفری

دکتر جمال زمانی اشنی

ارائه دهنده:

فاطمه بهرامی منظور

بهمن ۱۳۹۱



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاسیس ۱۳۷۲

*K.N Toosi University of Technology*  
*Aerospace Engineering*  
*M.S Thesis*  
*Aerospace Engineering –Aero structural Field*

Optimal Design of Conical Composite Shells with Reinforcement used in  
Aerospace Structure

Under Supervision of:

**Dr. A. Mozafari**

**Dr. J. Zamani Ashani**

By:

**Fateme Bahrami Manzoor**

**February ۲۰۱۳**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## تأییدیه هیات داوران

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه خانم فاطمه بهرامی منظور

را با عنوان: بهینه سازی مخروط های کامپوزیتی تقویت شده تحت بار خارجی

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد تأیید می کند.

| امضاء | رتبه علمی | نام و نام خانوادگی | اعضای هیئت داوران         |
|-------|-----------|--------------------|---------------------------|
|       | استادیار  | علی مظفری          | ۱- استاد راهنمای اول      |
|       | دانش یار  | جمال زمانی         | ۲- استاد راهنمای دوم      |
|       |           |                    | ۳- استاد مشاور            |
|       |           | سعید ایرانی        | ۴- استاد ممتحن            |
|       |           | فرخ                | ۵- استاد ممتحن            |
|       |           |                    | ۶- نماینده تحصیلات تکمیلی |

تقديم به

مادر مهربان

و

همسر عزيزم

تمامی عزیزانی که این حقیر را در نگارش این نوشته یاری نمودند...

## تشر و قدردانی

با سپاس خالصانه از تمامی اساتید بزرگوام، که از آغاز راه تا انجام دوره کارشناسی ارشد با نهایت بزرگواری بنده را مرهون زحمات بی دریغ خود نمودند. به خصوص اساتید ارجمند آقایان دکتر علی مظفری و دکتر جمال زمانی که بنده و دوستانم را در انجام این پروژه بسیار یاری نموده و راهنمایی هایشان چراغ راهنما بود.

فاطمه بهرامی منظور

شهریور ۱۳۹۱

## چکیده

یکی از انواع هندسه های مرسوم در صنایع هوافضا اشکالی با هندسه پوسته های مخروط ناقص هستند. مخروط های ناقص را می توان به عنوان دماغه اغلب وسایل پرنده بکار برد. طراحی بهینه هر چه ظریف تر سازه ها با قابلیت و استحکام بالا آرزوی هر مهندس طراح است. در اینجا به بررسی پوسته مخروط ناقص کامپوزیتی تقویت شده تحت بار هیدرواستاتیک خارجی پرداخته شده است. در ابتدا مبحث فاکتورها و پارامترهای مهم در طراحی این نوع مخروط ارائه شده، سپس تعدادی مخروط با پارامترهای مشخص مورد تست و آزمایش تجربی قرار گرفته است. بررسی دیگری روی حل عددی این نوع مخروط ها با نرم افزار ANSYS انجام گرفته و نتایج با نتایج تجربی مقایسه شده است. سپس با روش DOE تعداد آزمایشات را بهینه ساخته و با نرم افزار Mini TAB بهینه سازی فاکتورهای مختلف در این نوع مخروط ها انجام گرفته است. و در پایان اعداد بدون بعد هندسه مخروطی از جمله ناکاملی هندسی و ... برای مقایسه نتایج سازه مخروطی ساده کامپوزیتی، مخروط تقویت شده کامپوزیتی، مخروط ایزوتروپ ساده و تقویت شده محاسبه و تحلیل گردیده است.

### کلید واژه:

پوسته ی مخروط ناقص کامپوزیتی، تقویت کننده های رینگ، فشار هیدرواستاتیک خارجی، بهینه سازی.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

|         |  |
|---------|--|
| ج.....  | فهرست جدول‌ها.....   |
| خ.....  | فهرست شکل‌ها.....  |
| ۱.....  | فصل ۱- مقدمه.....  |
| ۱.....  | ۱-۱- پیشگفتار.....   |
| ۳.....  | ۱-۲- اهداف و روش پیشرفت پروژه.....   |
| ۵.....  | فصل ۲- بررسی پیشینه تحقیقات.....   |
| ۵.....  | ۱-۲- پیشگفتار.....   |
| ۵.....  | ۲-۲- نمونه‌های تحلیلی و تست سازه‌های استوانه‌ای و مخروطی جدارنازک تقویت شده.....   |
| ۵.....  | ۱-۲-۲- کمانش پوسته‌های مخروطی تقویت شده و ارتوتروپیک.....                          |
| ۷.....  | ۲-۲-۲- ناپایداری پلاستیکی پوسته تقویت شده با رینگ تحت فشار خارجی.....              |
| ۸.....  | ۳-۲-۲- فروپاشی پلاستیکی پوسته‌های مخروطی دوار تحت فشار خارجی.....                  |
| ۹.....  | ۴-۲-۲- مطالعه تئوری و آزمایشگاهی کمانش پوسته مخروطی و استوانه‌ای تحت بار مرکب..... |
| ۱۰..... | ۵-۲-۲- تحلیل کمانش سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده ی مشبک.....                        |
| ۱۳..... | ۶-۲-۲- کمانش سازه‌ی گنبدی تقویت شده تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی.....               |
| ۱۴..... | ۷-۲-۲- پایداری پوسته‌های مخروطی تقویت شده.....                                     |
| ۱۵..... | ۸-۲-۲- تحلیل ارتعاشی نازل راکت با استفاده از روش انرژی.....                        |
| ۱۷..... | ۳-۲- تحلیل‌ها و آزمایشات بهینه‌سازی پوسته‌های مخروطی.....                          |
| ۱۷..... | ۱-۳-۲- آنالیز حساسیت و طراحی بهینه سازه‌های کامپوزیتی نازک چند لایه.....           |
| ۱۸..... | ۲-۳-۲- بهینه‌سازی فرکانس پوسته‌های مخروطی با ثابت نگه داشتن وزن.....               |
| ۱۹..... | ۳-۳-۲- طراحی بهینه پوسته‌های مخروطی تقویت شده با ثابت ماندن فرکانس طبیعی.....      |
| ۲۰..... | ۴-۳-۲- بهینه‌سازی الاستیک و شبه الاستیک پوسته‌های مخروطی به نسبت ضخامت.....        |
| ۲۲..... | فصل ۳- بررسی پارامترهای مهم در طراحی با نمونه‌سازی آزمایشگاهی.....                 |



|    |   |       |
|----|---|-------|
| ۲۲ | مقدمه   | ۱-۳   |
| ۲۲ | ثبات رفتار کمانش و پس کمانش                         | ۲-۳   |
| ۲۶ | کرنش سنج برای تشخیص کمانش                           | ۳-۳   |
| ۲۶ | روش های مرسوم آزمایش فشار خارجی                     | ۴-۳   |
| ۳۰ | روش حجم کنترل آزمایش فشار خارجی                     | ۵-۳   |
| ۳۲ | بررسی پروژه مشابه قبلی در این زمینه                 | ۶-۳   |
| ۳۴ | نتایج و مقایسه بار کمانش استاتیکی برای مخروط ها     | ۷-۳   |
| ۳۶ | بررسی اثرات پارامترهای مختلف روی بار کمانش استاتیکی | ۸-۳   |
| ۳۹ | کامپوزیت ها   | ۹-۳   |
| ۴۰ | رشته ها   | ۱-۹-۳ |
| ۴۱ | مواد زمینه  | ۲-۹-۳ |
| ۴۲ | مروری اجمالی بر روش های شکل دهی مواد مرکب           | ۳-۹-۳ |

#### فصل ۴- بررسی مخروط تقویت شده کامپوزیتی با ساخت و تست تجربی نمونه ی آزمایشگاهی ۴۹

|    |  |       |
|----|--|-------|
| ۴۹ | مقدمه  | ۱-۴   |
| ۴۹ | ساخت نمونه   | ۲-۴   |
| ۴۹ | روش ساخت نمونه ها  | ۱-۲-۴ |
| ۵۰ | ابعاد نمونه ها   | ۲-۲-۴ |
| ۵۲ | جنس و ساخت قالب  | ۳-۲-۴ |
| ۵۳ | الیاف و رزین سازه نمونه  | ۴-۲-۴ |
| ۵۵ | نحوه اجرا  | ۵-۲-۴ |
| ۵۸ | کد گذاری قطعات   | ۳-۴   |
| ۵۹ | اندازه گیری پارامترهای ابعادی نمونه های پوسته مخروطی ساخته شده | ۴-۴   |
| ۶۷ | سازه ی تقویت کننده ها  | ۵-۴   |
| ۷۱ | مشخصات بارگذاری خارجی  | ۶-۴   |
| ۷۳ | انجام تست ها و نتایج   | ۷-۴   |
| ۷۳ | خصوصیات مورد نیاز برای آزمایشات                                | ۱-۷-۴ |
| ۷۴ | دستگاه آزمایش  | ۲-۷-۴ |
| ۷۷ | آماده سازی قطعات برای آزمایش                                   | ۳-۷-۴ |

|  |       |   |
|--|-------|---|
| ۷۹   | ۴-۷-۴ | روش آزمایش پایداری پوسته ساخته شده تحت فشار هیدرواستاتیک                    |
| ۸۰   | ۴-۷-۵ | تعیین بار کمانش استاتیکی سازه   |
| ۸۱   | ۴-۷-۶ | افزایش دقت آزمایش   |
| ۸۲   | ۴-۷-۷ | نتایج آزمایش پایداری پوسته مخروطی کامپوزیتی ساخته شده تحت فشار هیدرواستاتیک |
| <b>فصل ۵ - حل عددی پوسته مخروطی تقویت شده . ۸۵</b>         |       |   |
| ۸۵   | ۵-۱   | مقدمه   |
| ۸۵   | ۵-۲   | معادل سازی پارچه بافته شده با دو لایه تک جهت                                |
| ۸۸   | ۵-۳   | معادل سازی پارچه بافته شده با یک لایه اورتوتروپ                             |
| ۸۹   | ۵-۴   | صحه گذاری معادل سازی  |
| ۹۰   | ۵-۵   | مدل سازی مخروط تقویت شده کامپوزیتی در نرم افزار ANSYS                       |
| ۹۰   | ۵-۵-۱ | مدل سازی پوسته و تیر  |
| ۹۲   | ۵-۵-۲ | تعریف شرایط مرزی  |
| ۹۴   | ۵-۵-۳ | مقایسه نتایج شبیه سازی عددی پوسته ساده و تقویت شده                          |
| ۹۹   | ۵-۶   | شبیه سازی عددی مخروط ناقص با بارگذاری انفجاری                               |
| <b>فصل ۶ - بهینه سازی پوسته های مخروطی تقویت شده . ۱۰۳</b> |       |   |
| ۱۰۳  | ۶-۱   | مقدمه   |
| ۱۰۳  | ۶-۲   | بهینه سازی داده های تجربی   |
| ۱۰۵  | ۶-۲-۱ | فشار کمانش (P۱)   |
| ۱۰۶  | ۶-۲-۲ | فشار پسکمانش (P۲)   |
| ۱۰۸  | ۶-۲-۳ | فاکتور اختلاف وزن   |
| ۱۱۲  | ۶-۳   | آنالیز بهینه سازی وزن و فشار کمانش P۱                                       |
| ۱۱۳  | ۶-۴   | آنالیز بهینه سازی وزن و فشار پس کمانش P۲                                    |
| ۱۱۵  | ۶-۵   | مقایسه نتایج به دست آمده تست تجربی با نتایج مخروط ساده                      |
| ۱۱۶  | ۶-۶   | مقایسه پارامترهای بهینه سازی مخروط کامپوزیتی و ایزوتروپ                     |
| ۱۲۵  |       | نتیجه گیری  |
| ۱۲۵  |       | پیشنهادات   |
| ۱۲۸  |       | منابع و مراجع   |

## فهرست جدول‌ها

| عنوان  | صفحه |
|--|------|
| جدول ۱-۲: (آ) حساسیت انرژی به ضخامت ها. (ب) نقاط ثابت برای انرژی کرنشی. (ج) بهینه سازی ضخامت. (د) $\theta$ برای بیشترین فرکانس پایه. (ه) $\theta$ برای حداقل انرژی کرنشی الاستیک [۱۱]..... | ۱۷   |
| جدول ۱-۳: مقایسه بار کمانش استاتیکی برای مخروط ها با سه ضخامت متفاوت [۲۱].....   | ۳۴   |
| جدول ۲-۳: مشخصات کامپوزیت Glass/Epoxy [۲۴].....  | ۳۶   |
| جدول ۳-۳: فشار کمانش استاتیکی نسبت به زاویه مخروط [۲۱].....  | ۳۶   |
| جدول ۴-۳: فشار کمانش استاتیکی نسبت به نسبت ابعادی $R1H$ [۲۱].....  | ۳۷   |
| جدول ۵-۳: فشار کمانش استاتیکی نسبت به نسبت ابعادی $LR1$ [۲۱].....  | ۳۸   |
| جدول ۶-۳: فشار کمانش استاتیکی نسبت به جنس الیاف [۲۱].....  | ۳۸   |
| جدول ۱-۴: مشخصات مکانیکی رزین انتخابی [۲۸].....  | ۵۵   |
| جدول ۲-۴: کدگذاری نمونه های مورد آزمایش.....   | ۵۸   |
| جدول ۳-۴: اطلاعات هندسی مربوط به کد قطعه S۲۱۶ (میلی متر).....  | ۵۸   |
| جدول ۴-۴: اندازه گیری تغییرات ضخامت در نقاط مختلف قطعه S۲.....   | ۶۱   |
| جدول ۵-۴: خواص مکانیکی ماده کامپوزیتی [۲۸].....  | ۶۳   |
| جدول ۶-۴: جدول نسبت حجمی الیاف در روش لایه گذاری دستی [۲].....   | ۶۴   |
| جدول ۷-۴: اطلاعات متوسط نمونه های ساخته شده.....   | ۶۶   |
| جدول ۸-۴: نتایج آزمایش نمونه ها [۲۸].....  | ۸۳   |
| جدول ۱-۵: مشخصات الیاف بکار رفته در کامپوزیت.....  | ۸۷   |
| جدول ۲-۵: مشخصات رزین بکار رفته در کامپوزیت.....   | ۸۷   |
| جدول ۳-۵: مشخصات لایه های معادل.....   | ۸۸   |
| جدول ۴-۵: مشخصات لایه ارتوتروپ معادل.....  | ۸۹   |
| جدول ۵-۵: مخروط ساده - تغییرات فشار و مد کمانش عددی به ازای تغییرات $LR1$ [۲۳].....  | ۹۴   |
| جدول ۶-۵: مخروط تقویت شده - تغییرات فشار و مد کمانش عددی به ازای تغییرات $LR1$ .....   | ۹۴   |
| جدول ۷-۵: ضرایب مواد برای فولاد AL-۶XN [۳۲].....   | ۹۹   |
| جدول ۸-۵: تنظیمات آزمایش و ماکزیمم خیز ورق بدست آمده از نتایج تجربی و عددی.....  | ۱۰۰  |

- جدول ۱-۶: رابطه میان سائز مخروط ها با پارامتر هندسی **LR1** ..... ۱۰۳
- جدول ۲-۶: رابطه میان تعداد لایه مخروط ها با پارامتر هندسی **R1t** ..... ۱۰۴
- جدول ۳-۶: مقادیر کد نشده پارامتر ها برای معادله رگرسیون ..... ۱۰۵
- جدول ۴-۶: بهینه سازی توزیع ضخامت برای مخروط ..... ۱۱۰
- جدول ۵-۶: مقدار بهینه فاکتورها برای وزن و فشار کمانش ..... ۱۱۲
- جدول ۶-۶: مقدار بهینه فاکتورها برای وزن و فشار پس کمانش ..... ۱۱۴
- جدول ۷-۶: مقایسه بار کمانش استاتیکی ..... ۱۱۵
- جدول ۸-۶: چارت طراحی جهت بررسی کمانش پوسته مخروطی کامپوزیتی تحت فشار خارجی هیدرواستاتیک [۲۳] ..... ۱۲۲
- جدول ۹-۶: چارت طراحی جهت بررسی کمانش پوسته ایزوتروپ تحت فشار خارجی هیدرواستاتیک ..... ۱۲۲

## فهرست شکل‌ها

| صفحه    | عنوان   |
|---------|---|
| ۵.....  | شکل ۲-۱: نمایی از مخروط های تست شده با توضیح پارامترهای مهم   |
| ۶.....  | شکل ۲-۲: نتایج بدست آمده از آزمایش مخروط های سینگر [۳]  |
| ۷.....  | شکل ۲-۳: نمونه تحلیل شده در نرم افزار ANSYS در آزمایش راس [۴]   |
| ۷.....  | شکل ۲-۴: نمودار پروفیل نمونه های آزمایش شده در تحقیق راس [۴]  |
| ۸.....  | شکل ۲-۵: بررسی کمانش پوسته های استوانه ای راس با رینگ های مختلف [۴]   |
| ۸.....  | شکل ۲-۶: مخروط های ساده راس با ضخامتهای مختلف تحت کمانش [۵]   |
| ۸.....  | شکل ۲-۷: محفظه تست اعمال فشار خارجی بر مخروط ها در آزمایش راس [۵]   |
| ۹.....  | شکل ۲-۸: پروفیل مخروط های آلیاژی برای تست کمانش نسبت به محل استقرار تقویت کننده رینگ [۵]  |
| ۹.....  | شکل ۲-۹: مخروط های تقویت شده عرضی با رینگ هایی در ارتفاع های متفاوت [۵]   |
| ۹.....  | شکل ۲-۱۰: المان پوسته مخروطی [۵]  |
| ۱۰..... | شکل ۲-۱۱: آ. پروفیل و نمادگذاری مخروط و استوانه تحت بررسی. ب. جزئیات تقویت کننده های بکار رفته در نمونه های مخروطی و استوانه ای [۶]   |
| ۱۰..... | شکل ۲-۱۲: دستگاه آزمایش سازه های تحت بررسی [۶]  |
| ۱۱..... | شکل ۲-۱۳: نمودار نیروهای اعمالی بر المانی از سازه استوانه ای [۷]  |
| ۱۱..... | شکل ۲-۱۴: ممان اعمال شده بر سطح و توزیع ممان درون سطح [۷]   |
| ۱۲..... | شکل ۲-۱۵: نمونه شبیه سازی شده از سازه تحت بررسی در نرم افزار ANSYS و نمایش انواع کمانش در آن [۷]  |
| ۱۲..... | شکل ۲-۱۶: آ. دستگاه تست نمونه ها. ب. نمونه آزمایش قبل از بارگذاری. ج. نمونه های آزمایش بعد از بارگذاری [۷]  |
| ۱۳..... | شکل ۲-۱۷: نمایش اهمیت مخروط ها و استوانه ها و سازه های هوافضایی   |
| ۱۳..... | شکل ۲-۱۸: شبیه سازی نمونه استوانه ای مورد آزمایش در نرم افزار ANSYS. آ. نمونه قبل از بارگذاری. ب. نمونه پس از بارگذاری: کمانش کلی. ج. کمانش موضعی پوسته. د. کمانش موضعی تقویت کننده [۷] |
| ۱۴..... | شکل ۲-۱۹: سطح مقطع تقویت کننده رینگ [۸]   |
| ۱۴..... | شکل ۲-۲۰: سازه های تقویت شده قبل و بعد از بارگذاری با مقایسه فشارهای سازه های ساده و تقویت شده [۸]  |
| ۱۵..... | شکل ۲-۲۱: هندسه مدل تحلیل شده و تعیین پارامترهای مهم [۹]  |

- شکل ۲-۲۲: نمودار نمایش دهنده اثر دامنه ناقص حد مرز سطح بار پوسته ی مخروطی بدون تقویت در محدوده کمانش کلی و موضعی [۹]..... ۱۵
- شکل ۲-۲۳: اشکال مودهای ارتعاشی رینگ دوار [۱۰]..... ۱۶
- شکل ۲-۲۴: (آ) هندسه مدل مورد بررسی . ب) نمونه تحت بارگذاری آزمایشگاهی. ت) شبیه سازی نرم افزاری و مشاهده ی انواع مودهای کمانش [۱۰]..... ۱۶
- شکل ۲-۲۵: نمای کلی و پارامترهای فرضی نمونه المان بندی شده [۱۱]..... ۱۷
- شکل ۲-۲۶: نمایی از مدل تحلیل شده و نمودارهای بهینه سازی [۱۲]..... ۱۹
- شکل ۳-۱: کاهش ظرفیت ناگهانی بار در لحظه کمانش در بارگذاری محوری پوسته استوانه ای [۱۵]..... ۲۲
- شکل ۳-۲: نمودار نیرو- جابجایی محوری پوسته استوانه ای تحت فشار خارجی هیدرواستاتیک [۱۵]..... ۲۳
- شکل ۳-۳: نمودار گشتاور بر حسب پیچش زاویه ای برای پوسته استوانه تحت پیچش [۱۶]..... ۲۳
- شکل ۳-۴: شماتیک دستگاه مورد استفاده آقای تکنیون برای تشخیص لحظه کمانش [۱۸]..... ۲۵
- شکل ۳-۵: (آ) دستگاه آزمایش فشار انتها باز. ب) دستگاه آزمایش فشار انتها بسته [۲]..... ۲۷
- شکل ۳-۶: دستگاه آزمایش فشار انتها بسته با لوله خروجی [۱۸]..... ۲۸
- شکل ۳-۷: دستگاه آزمایش فشار با قابلیت تغییر در نیروی محوری [۲]..... ۲۹
- شکل ۳-۸: دستگاه آزمایش فشار خارجی به روش حجم کنترل [۱]..... ۳۱
- شکل ۳-۹: بار کمانش استاتیکی مخروط های کامپوزیتی دو لایه [۲۱]..... ۳۵
- شکل ۳-۱۰: بار کمانش استاتیکی مخروط های کامپوزیتی سه لایه [۲۱]..... ۳۵
- شکل ۳-۱۱: بار کمانش استاتیکی مخروط های کامپوزیتی چهار لایه [۲۱]..... ۳۵
- شکل ۳-۱۲: فشار کمانش استاتیکی نسبت به زاویه مخروط برای ترتیب لایه گذاری های مختلف [۲۱]..... ۳۷
- شکل ۳-۱۳: فشار کمانش استاتیکی نسبت به نسبت ابعادی  $R1H$  برای ترتیب لایه گذاری های مختلف [۲۱]..... ۳۷
- شکل ۳-۱۴: فشار کمانش استاتیکی نسبت به نسبت ابعادی  $LR1$  برای ترتیب لایه گذاری های مختلف [۲۱]..... ۳۸
- شکل ۳-۱۵: فشار کمانش استاتیکی نسبت به جنس الیاف برای ترتیب لایه گذاری های مختلف [۲۱]..... ۳۹
- شکل ۳-۱۶: روش لایه گذاری دستی Hand Lay Up [۲۶]..... ۴۳
- شکل ۳-۱۷: روش اسپری Spray up [www.art2iran.com](http://www.art2iran.com) [۲۷]..... ۴۴
- شکل ۳-۱۸: روش قالبگیری انتقالی رزین (RTM) [۲۶]..... ۴۵
- شکل ۳-۱۹: ساخت بافت های از پیش تعیین شده..... ۴۶
- شکل ۳-۲۰: پروفیل های تولیدی به روش پالتروژن..... ۴۶
- شکل ۳-۲۱: روش پالتروژن [۲۷]..... ۴۶

- شکل ۳-۲۲: روش رشته پیچی الیاف [۲۷] ..... ۴۷
- شکل ۴-۱: ابعاد هندسی در یک پوسته مخروطی ..... ۵۱
- شکل ۴-۲: ابعاد هندسی مدل ساخته شده ..... ۵۲
- شکل ۴-۳: قالب های چوبی مورد استفاده [۲۸] ..... ۵۳
- شکل ۴-۴: پارچه فیبر شیشه مورد استفاده [۲۸] ..... ۵۳
- شکل ۴-۵: پارچه صفحه ای (۹۰/۰) ..... ۵۴
- شکل ۴-۶: مقایسه بین خواص چند رزین پرکاربرد [۲۹] ..... ۵۴
- شکل ۴-۷: الگوها و برش پارچه ها [۲۸] ..... ۵۵
- شکل ۴-۸: الگوی گسترش مخروط بر روی نایلون [۲۸] ..... ۵۶
- شکل ۴-۹: مواد لازم جهت تهیه مدل [۲۸] ..... ۵۶
- شکل ۴-۱۰: پارچه پیچیده شده دور مدل [۲۸] ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۱: قطعات پس از خروج از روی مدل [۲۸] ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۲: پارامترهای هندسی پوسته مخروطی ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۳: تغییرات ضخامت در نقاط مختلف نمونه S۲ ..... ۶۲
- شکل ۴-۱۴: مقایسه پارامتر (آ) ضخامت متوسط (ب) انحراف از معیار ضخامت (ج) نسبت حجمی الیاف در نمونه های ساخته شده از دو لایه پارچه [۲۸] ..... ۶۳
- شکل ۴-۱۵: مقایسه متوسط نسبت حجمی الیاف در نمونه های ساخته شده از دو، سه و چهار لایه پارچه [۲۸] ..... ۶۳
- شکل ۴-۱۶: نمودار مورد استفاده برای یافتن مدول الاستیسیته [۲] ..... ۶۵
- شکل ۴-۱۷: نمودار برای پیدا کردن تنش نهایی شکست [۲] ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۸: طرح های مختلف بافت پارچه از راست: بافت دوگانه، ساتین و بافت مسطح متعادل ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۹: مقطع تقویت کننده های مختلف بررسی شده در تحقیقات پیشین ..... ۶۹
- شکل ۴-۲۰: مقطع انتخاب شده برای تقویت کننده های سازه ای ..... ۶۹
- شکل ۴-۲۱: ابعاد مقطع تقویت کننده ..... ۶۹
- شکل ۴-۲۲: تقویت کننده حلقوی و طولی ..... ۷۰
- شکل ۴-۲۳: تقویت کننده های آماده برای اتصال ..... ۷۰
- شکل ۴-۲۴: قطعه نهایی آماده برای آزمایش ..... ۷۱
- شکل ۴-۲۵: مودهای مختلف کمانش یک پوسته استوانه ای تحت بارگذاری محوری [۳۰] ..... ۷۲
- شکل ۴-۲۶: ایجاد مودهای کمانش در حالت استاتیکی. [۲۳] ..... ۷۳

- شکل ۴-۲۷: استفاده از کمپرسور جهت تولید هوای فشرده [۲۲]..... ۷۴
- شکل ۴-۲۸: کپ بالایی دستگاه طراحی شده [۲۲]..... ۷۵
- شکل ۴-۲۹: بالا- قطعه از نمای محل اتصال به هوای فشرده، پایین- از نمای محل قرارگیری سنجه فشار [۲۲]..... ۷۶
- شکل ۴-۳۰: شماتیک دستگاه آزمایش ایربک، استفاده شده برای انجام آزمایشات پروژه [۲۲]..... ۷۶
- شکل ۴-۳۱: شیارهای ایجاد شده روی در بالایی محفظه فشار [۲۲]..... ۷۷
- شکل ۴-۳۲: درپوش پایین طراحی شده برای پوسته مخروطی [۲۲]..... ۷۷
- شکل ۴-۳۳: چسب سیلیکونی درزبند [۲۸]..... ۷۸
- شکل ۴-۳۴: قرارگیری پوسته درون شیار درب محفظه فشار [۲۲]..... ۷۸
- شکل ۴-۳۵: ایجاد دو شیار در فلنج دستگاه و قرارگیری دو رینگ درون شیارها [۲۸]..... ۷۸
- شکل ۴-۳۶: ایجاد ۱۴ سوراخ در درب دستگاه تست [۲۸]..... ۷۹
- شکل ۴-۳۷: شماتیک روش آزمایش صورت گرفته در آزمایش..... ۸۰
- شکل ۴-۳۸: گیج فشار مورد استفاده در دستگاه [۲۸]..... ۸۱
- شکل ۴-۳۹: چینش قطعات چوب به منظور کاهش فضای مرده در مخزن تست [۲۸]..... ۸۱
- شکل ۴-۴۰: خرابی قطعه ۴-۱-۳ دلیل افزایش بار استاتیکی-تصویر نمونه قبل و بعد از آزمایش [۲۸]..... ۸۲
- شکل ۴-۴۱: ایجاد مودهای تقریباً متقارن پس از افزایش فشار در مرحله پس کمانش [۲۲]..... ۸۳
- شکل ۵-۱: پارچه بافته شده با زاویه صفر و ۹۰..... ۸۶
- شکل ۵-۲: معادل سازی پارچه بافته شده با دو لایه صفر و ۹۰ درجه..... ۸۶
- شکل ۵-۳: پارچه صفحه ای انتخاب شده برای ساخت قطعات..... ۸۷
- شکل ۵-۴: لایه اورتوتروپ معادل..... ۸۸
- شکل ۵-۵: ویرانی نمونه تست شده (خرابی نوع ۱)..... ۸۹
- شکل ۵-۶: مدل مخروط مورد بررسی حالت ساده و المان بندی شده..... ۹۰
- شکل ۵-۷: لایه گذاری المان..... ۹۱
- شکل ۵-۸: سطح مقطع رینگ تقویت عرضی..... ۹۲
- شکل ۵-۹: نحوه قرارگیری پوسته مخروطی در درب دستگاه..... ۹۳
- شکل ۵-۱۰: شرایط مرزی مورد استفاده و بارگذاری فشار خارجی هیدرواستاتیک برای پوسته مخروطی..... ۹۳
- شکل ۵-۱۱: شکل مد حاصل شده برای کمترین مقدار ویژه مخروط  $S_4$  با ضریب  $kt = 1,4$  [۲۳]..... ۹۴
- شکل ۵-۱۲: نمودار تعیین سایز برای پاسخ مستقل از سایز مش سازه..... ۹۵
- شکل ۵-۱۳: فشار ۳۳۰ میلی بار مخروط دولایه با یک رینگ عرضی..... ۹۶



- شکل ۵-۱۴: فشار ۷۰۰ میلی بار مخروط دولایه با یک رینگ عرضی ..... ۹۶
- شکل ۵-۱۵: فشار ۵۵۰ میلی بار مخروط دولایه با یک رینگ عرضی ..... ۹۷
- شکل ۵-۱۶: فشار ۵۸۰ میلی بار مخروط دولایه با یک رینگ عرضی ..... ۹۷
- شکل ۵-۱۷: فشار ۵۶۹ میلی بار مخروط دولایه با یک رینگ عرضی ..... ۹۷
- شکل ۵-۱۸: فشار ۸۱۹ میلی بار مخروط سه لایه با یک رینگ عرضی ..... ۹۸
- شکل ۵-۱۹: فشار ۱۵۰۰ میلی بار مخروط چهار لایه تک رینگ عرضی ..... ۹۹
- شکل ۵-۲۰: توزیع تنش روی مخروط ساده تحت بار انفجاری خارجی ..... ۱۰۱
- شکل ۶-۱: ضرایب رگرسیون برای فشار کمانش (P1) ..... ۱۰۵
- شکل ۶-۲: نمودار فشار کمانش بر حسب فاکتورهای تعداد لایه و سایز ..... ۱۰۶
- شکل ۶-۳: ضرایب رگرسیون برای فشار پس کمانش ..... ۱۰۷
- شکل ۶-۴: نمودار فشار پس کمانش بر حسب فاکتورهای تعداد لایه و سایز ..... ۱۰۷
- شکل ۶-۵: ضرایب رگرسیون برای وزن ..... ۱۰۸
- شکل ۶-۶: نمودار وزن براساس مقدار کمینه فاکتورها ..... ۱۰۹
- شکل ۶-۷: نمودار وزن براساس مقدار متوسط فاکتورها ..... ۱۰۹
- شکل ۶-۸: نمودار وزن براساس مقدار بیشینه فاکتورها ..... ۱۱۰
- شکل ۶-۹: الگوی بهینه سازی توزیع ضخامت برای مخروط تقویت شده با فرض همگرایی و واگرایی با ثابت نگه داشتن وزن [۲۹] ..... ۱۱۱
- شکل ۶-۱۰: آنالیز بهینه سازی همزمان وزن و فشار کمانش ..... ۱۱۲
- شکل ۶-۱۱: نمودار بهینه سازی فاکتورها برای وزن و فشار کمانش (P1) ..... ۱۱۳
- شکل ۶-۱۲: آنالیز بهینه سازی همزمان وزن و فشار پس کمانش ..... ۱۱۴
- شکل ۶-۱۳: نمودار بهینه سازی فاکتورها برای وزن و فشار پس کمانش ..... ۱۱۵
- شکل ۶-۱۴: پارمترهای هندسی موثر بر فشار کمانش ..... ۱۱۷
- شکل ۶-۱۵: اثر تغییرات **LR1** با فرض ثابت بودن  $\gamma$  و **R1t** [۲۳] ..... ۱۱۸
- شکل ۶-۱۶: اثر تغییرات **R1t** با فرض ثابت بودن  $\gamma$  و **LR1** [۲۳] ..... ۱۱۹
- شکل ۶-۱۷: تغییرات فشار کمانش بر حسب عکس عدد بدون بعد لاندا [۲۳] ..... ۱۲۰
- شکل ۶-۱۸: ایجاد مودهای غیر متقارن محوری در سطح محیطی پوسته در ناحیه پس کمانش [۲۳] ..... ۱۲۱
- شکل ۶-۱۹: مقایسه نتایج تجربی و عددی با ضرایب تصحیح متفاوت [۲۳] ..... ۱۲۳

# فصل اول

مقدمه

## مقدمه

### ۱-۱- پیشگفتار

پوسته‌های جدار نازک کاربرد وسیعی به عنوان عضوهای ساختاری پایه در سیستم‌های ساده و پیچیده دارند. پایداری و ارتعاش این پوسته‌ها همیشه توجه محققین را به خود جلب کرده است که بیشتر تحقیقات انجام شده به بحث حول وحوش پوسته‌های استوانه‌ای برمی‌گردد. موضوع کمانش<sup>۱</sup> پوسته‌ها، عموماً در رشته‌های مهندسی مکانیک، علوم دریایی و سازه‌های دریایی، مهندسی عمران، مهندسی شیمی و مهندسی هوافضا مطرح می‌گردد. کاربرد این موضوع را می‌توان برای مثال در طراحی ستون‌های فلزی، مخازن تحت مکش متغیر، لوله‌های طولی دردیگ‌های بخار جهت عبور گازهای داغ، بدنه زیردریائی و زیردریائی‌های تحقیقاتی، برخی از اجزاء سازه‌ایکشتی‌ها، طراحی فضاپیماها، اجزاء راکتورهای هسته‌ای، هواپیماهای مافوق صوت و صنایع خودروسازی وریلی مشاهده نمود. [۱]

در مورد پوسته‌های ایزوتروپ، فعالیت‌های زیادی برای پیدا کردن بارهای بحرانی استاتیکی پوسته‌ها در معرض بارگذاری‌های مختلف و با شرایط تکیه‌گاهی مختلف انجام شده است، که با نتایج تحلیلی و عددی سازگار باشند. از طرف دیگر تحقیقات اندکی درباره پوسته‌های غیرایزوتروپ انجام شده است که این اندک بودن به دلیل سختی‌های تولید و آزمایش تجربی و سختی‌های تحلیل آن است. این اندک بودن فعالیت‌ها در مورد پوسته‌های مخروطی نیز تا حدی صدق می‌کند. [۲-۱]

پوسته‌های نازک، سازه‌هایی بسیار مؤثری هستند که می‌توانند بارهای کمانش بالایی را تحمل کنند. لذا برای چندین دهه مورد توجه مهندسان و محققان قرار گرفته شده‌اند. مطالعات تحلیلی زیادی جهت تفسیر و تأثیر پارامترهای ساخت از جمله ناکاملی<sup>۲</sup> هندسی، غیر دایروی بودن پوسته‌ها و غیره در پدیده مربوط به رفتار ابتدایی کمانش پوسته‌های ایزوتروپ توسعه پیدا کرده است و برای یک‌سری از پوسته‌ها حساسیت بار کمانش به ناکاملی یا فاکتورهای مؤثر بدست آمده است. ولی متأسفانه میزان تأثیر این روش‌ها در روش‌های تحلیل مهندسی کوچک بوده و هنوز نیز به

---

<sup>۱</sup> Buckling

<sup>۲</sup> Imperfection sensitivity

ضریب های اطمینان تجربی استخراج شده از آزمایش های تجربی و ارائه نمودارهای طراحی کمانش پوسته ها، نیاز می باشد.

در این میان سازه های کامپوزیتی بخاطر وزن کم، استحکام بالا و مزایای بسیاری که دارند، مورد توجه قرار گرفته اند. به همین دلیل، شاهد رشد روزافزون استفاده از کامپوزیت ها بجای مواد فلزی در سازه های دریایی، سازه های زمینی، حمل و نقل، خودرو، رباتیک و سایر رشته های مهندسی هستیم. از جمله مزایای کامپوزیت ها، می توان به داشتن نسبت وزن به استحکام پایین، مقاومت بالا در برابر بارگذاری های حرارتی، اعمال کردن خواص دلخواه در جهت های مورد نیاز، مقاومت خستگی بالا و... اشاره کرد.

همانند سازه های ایزوتروپ، سازه های کامپوزیتی نیز تحت فشار خارجی هیدرواستاتیک، بار محوری، پیچش، برش، دچار کمانش می شوند. ظرفیت تحمل بار کامپوزیت ها متأثر از ناکاملی هندسی <sup>۱</sup>، شرایط مرزی و خروج از مرکز بار می باشد. تمام این پارامترها به نوع سازه ای که مورد بررسی قرار می گیرد، وابستگی دارد. معمولاً یک اختلاف قابل توجهی بین روش های تئوری و مشاهدات تجربی وجود دارد، مگر آنکه شرایط مرزی، خروج از مرکزی بار بطور دقیق در محاسبات منظور گردد. در ضمن باید یک اندازه گیری دقیقی نیز از شرایط هندسی اولیه صورت گیرد و در محاسبات تئوری لحاظ شود. [۱]

همچنین در میان پوسته های دوار، پوسته های مخروطی جایگاه ویژه ای دارند. این سازه ها به دلیل شکل آیرودینامیکی بسیار مناسب خود اکثراً نقش دماغه و اتصال دهنده دو پوسته استوانه ای کاربرد دارند. به همین دلیل در صنایع هوافضا و دریایی کاربرد فراوانی دارند. در صنایع هوافضا فاکتور کمینه بودن وزن بسیار پر اهمیت است. همچنین باید در این سازه ها به مقاومت خستگی و حرارتی بالا نیز توجه نمود.

در پایان نامه حاضر به بررسی تجربی کمانش پوسته های مخروطی کامپوزیت تقویت شده تحت فشار خارجی هیدرواستاتیکی پرداخته خواهد شد.

---

<sup>۱</sup> Initial imperfection