



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
تاسیس ۱۳۷۸

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش ساخت و تولید

بررسی تجربی پوسته‌های مخروطی کامپوزی‌تی تقویت شده تحت بارگذاری استاتیکی

استاد راهنما:

دکتر جمال زمانی اشنی

ارائه دهنده:

محمدحسین وهابی میبیدی

اسفند ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

چکیده

پوسته‌های مخروطی به خاطر شکل خاص آیرودینامیکی، سازه اصلی دماغه وسایل حمل و نقل هوا-فضایی و زیر دریایی‌ها را تشکیل می‌دهند. کاربرد کامپوزیت‌ها در این سازه‌ها به دستیابی نسبت‌های وزن به استحکام پایین منتهی خواهد شد. به علت نوع کاربرد، اغلب این سازه‌ها تحت فشار خارجی هستند. در این حالت خاص طراحی بر اساس پایداری و استحکام سازه و در عین حال کاهش هزینه و کاهش وزن اهمیت زیادی دارد. بدین منظور در پروژه حاضر هدف، رسیدن به یک رابطه تجربی برای فشار کمانش، فشار پس-کمانش و بهینه سازی این پارامترها بر اساس افزایش وزن نمونه های تقویت شده و نیز تأثیر فاکتورهای مختلف بر این فشارها بوده است. فاکتورهای مورد بررسی در این پروژه ۴ فاکتور اندازه مخروطها، تعداد لایه‌ها، تعداد تقویت کننده طولی و تعداد تقویت کننده حلقوی است. برای نیل به این هدف نمونه‌های کامپوزیتی از الیاف بافته شده شیشه با زمینه رزین اپوکسی و تقویت کننده‌های طولی و حلقوی و براساس یک نرم افزار بهینه سازی آزمایشات^۱ ساخته شد. در ساخت تقویت کننده‌ها از یک روش ابداعی استفاده گردید.

کلمات کلیدی: پوسته تقویت شده، کامپوزیت، آزمایش تجربی، کمانش، بهینه سازی آماری

فهرست

فصل اول - مقدمه	۱۳
فصل دوم - مروری بر کارهای تحقیقاتی صورت گرفته در زمینه کمانش پوسته ها	۱۶
۱-۲- مقدمه	۱۶
۲-۲- پوسته ها تحت فشار خارجی	۱۶
۳-۲- ثبت رفتار کمانش و پس کمانش	۲۴
۴-۲- کرنش سنج برای تشخیص کمانش	۲۷
۵-۲- روشهای مرسوم آزمایش فشار خارجی	۲۷
۱-۵-۲- روش حجم کنترل آزمایش فشار خارجی	۳۱
۶-۲- پوسته های تقویت شده تحت بارگذاری خارجی	۳۳
فصل سوم	۳۷
۱-۳- مقدمه	۳۷
۲-۳- بررسی پروژه مشابه قبلی در این زمینه	۳۷
۱-۲-۳- نتایج و مقایسه بار کمانش استاتیکی برای مخروطها	۳۹
۲-۲-۳- بررسی اثرات پارامترهای مختلف روی بار کمانش استاتیکی	۴۲
۳-۳- کامپوزیت ها	۴۶
۱-۳-۳- رشته ها	۴۷
۲-۳-۳- مواد زمینه	۴۸
۴-۳- مروری اجمالی بر روشهای شکل دهی مواد مرکب	۴۹
۱-۴-۳- روش قالبگیری دستی	۴۹
۲-۴-۳- روش قالبگیری فشاری	۵۰

۵۰	۳-۴-۳-روش شکلدهی به کمک خلاء
۵۱	۳-۴-۴-روش تزریق رزین
۵۱	۳-۴-۵-روش پیچاندن الیاف
۵۲	۳-۵-۵-تجهیزات مورد نیاز برای انجام تست کمانش استاتیکی
۵۲	۳-۵-۱-طراحی سامانه برای تست سازهها در حضور نیروهای استاتیکی خارجی
۵۳	۳-۵-۲-سختی معادل سیال آزمایش
۵۴	۳-۵-۳-کنترل تغییر شکل نمونه ها با استفاده از روش های مختلف آزمایش
۵۵	۳-۵-۴-دیاگرام فنر برای دستگاه های آزمایش فشار
۵۸	فصل چهارم- ساخت نمونه های آزمایش
۵۸	۴-۱-مقدمه
۵۸	۴-۲-ساخت نمونه
۵۸	۴-۲-۱-اتخاذ روش ساخت نمونه ها
۵۹	۴-۲-۲-انتخاب ابعاد نمونه ها
۶۱	۴-۲-۳-انتخاب جنس و ساخت قالب
۶۲	۴-۲-۴-انتخاب الیاف
۶۳	۴-۲-۵-انتخاب رزین
۶۶	۴-۲-۶-برش پارچه ها و رسم الگوها
۶۸	۴-۲-۷-نحوه اجرا
۷۱	۴-۳-اندازه گیری پارامترهای پوسته مخروطی ساخته شده
۸۰	۴-۴-تقویت کننده های سازه ای
۸۳	۴-۴-۱-ساخت تقویت کننده ها
۸۶	فصل پنجم- طراحی و انجام آزمایش ها

۸۶	۱-۵- مقدمه
۸۶	۲-۵- معرفی فاکتور های موجود در ساخت و تعداد سطح آنها
۸۷	۳-۵- بهینه سازی آزمایشات
۸۹	۴-۵- مشخصات بار گذاری خارجی
۹۲	۵-۵- انجام تست ها و نتایج
۹۲	۱-۵-۵- خصوصیات مورد نیاز برای آزمایشات
۹۳	۲-۵-۵- دستگاه آزمایش
۹۶	۳-۵-۵- آماده سازی قطعات برای آزمایش
۹۹	۴-۵-۵- روش آزمایش پایداری پوسته ساخته شده تحت فشار هیدرواستاتیک
۱۰۰	۵-۵-۵- تعیین بار کمانش استاتیکی سازه
۱۰۱	۶-۵-۵- افزایش دقت آزمایش
۱۰۴	۶-۵- نتایج آزمایش پایداری پوسته مخروطی کامپوزیتی ساخته شده تحت فشار هیدرواستاتیک
۱۰۶	فصل ششم - بحث، بررسی و تحلیل نتایج
۱۰۶	۱-۶- مقدمه
۱۰۸	۲-۶- آنالیز واریانس
۱۰۹	۱-۲-۶- فشار کمانش (P1)
۱۱۲	۲-۲-۶- نمودار های فشار کمانش
۱۱۴	۳-۲-۶- فشار پسکمانش (P2)
۱۱۶	۴-۲-۶- نمودار های فشار پسکمانش
۱۲۰	۳-۶- فاکتور اختلاف وزن
۱۲۲	۱-۳-۶- نمودار های وزن
۱۲۵	۴-۶- آنالیز بهینه سازی وزن و فشار کمانش P1

۱۲۶.....	۵-۶- آنالیز بهینه وزن و فشار پسکمانش P_2
۱۲۸.....	۶-۶- مقایسه نتایج به دست آمده با پژوهش قبلی
۱۳۰.....	فصل هفتم - جمع بندی
۱۳۰.....	۱-۷- نتیجه گیری
۱۳۲.....	۲-۷- پیشنهادها
۱۳۳.....	فصل هشتم - منابع و مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۲- ۱- دستگاه مورد استفاده آقای فابرین در زمینه
بررسی کمانش لوله های جدار ضخیم ۱۷
- شکل ۲- ۲- دستگاه استفاده شده توسط راس برای آزمایش
کمانش پوسته مخروطی جدار ضخیم ۱۸
- شکل ۲- ۳- مخروط های آزمایش شده توسط راس ۱۹
- شکل ۲- ۴- استوانه های آزمایش شده توسط سدler ۱۹
- شکل ۲- ۵- استوانه های ارتروپیک تست شده در مرجع ۲۱
- شکل ۲- ۶- نمودار طراحی ارائه شده در مرجع برای پوسته
های استوانه های ارتروپیک ۲۱
- شکل ۲- ۷- مدل ضخامت ناکاملی هندسی برای لایه k ام ۲۲
- شکل ۲- ۸- کاهش فشار ناشی از ناکاملی هندسی ۲۳
- شکل ۲- ۹- فیکسچر طراحی شده برای پوسته استوانه ای
کامپوزیتی جهت انجام آزمایش فشار خارجی ۲۳
- شکل ۲- ۱۰- کاهش ظرفیت ناگهانی بار در لحظه کمانش در
بارگذاری محوری پوسته استوانه ای ۲۴
- شکل ۲- ۱۱- نمودار نیرو- جابجایی محوری پوسته استوانه
ای تحت فشار خارجی هیدرواستاتیک ۲۴
- شکل ۲- ۱۲- نمودار گشتاور بر حسب پیچش زاویه ای برای
پوسته استوانه تحت پیچش ۲۵
- شکل ۲- ۱۳- شماتیک دستگاه مورد استفاده آقای تکنیون
برای تشخیص لحظه کمانش ۲۶
- شکل ۲- ۱۴- دستگاه آزمایش فشار انتها باز ۲۸
- شکل ۲- ۱۵- دستگاه آزمایش فشار انتها بسته ۲۸
- شکل ۲- ۱۶- دستگاه آزمایش فشار انتها بسته با لوله
خروجی ۲۹
- شکل ۲- ۱۷- دستگاه آزمایش فشار با قابلیت تغییر در
نیروی محوری ۳۰

شکل ۲- ۱۸- دستگاه آزمایش فشار خارجی به روش حجم کنترل	۳۲.....
شکل ۲- ۱۹- نمونه قطعات قبل و بعد از آزمایش.....	۳۴.....
شکل ۲- ۲۰- مشخصات قطعات مورد آزمایش.....	۳۵.....
شکل ۲- ۲۱- مدلسازی عددی سازه در نرم افزار ANSYS.....	۳۵.....
شکل ۳- ۱- بار کمانش استاتیکی مخروطهای کامپوزیتی دو لایه	۳۹.....
شکل ۳- ۲- بار کمانش استاتیکی مخروطهای کامپوزیتی سه لایه	۴۰.....
شکل ۳- ۳- بار کمانش استاتیکی مخروطهای کامپوزیتی چهار لایه	۴۱.....
شکل ۳- ۴- فشار کمانش استاتیکی نسبت به زاویه مخروط برای ترتیب لایه‌گذاریه‌های مختلف.....	۴۳.....
شکل ۳- ۵- فشار کمانش استاتیکی نسبت به نسبت ابعادی برای ترتیب لایه‌گذاریه‌های مختلف.....	۴۳.....
شکل ۳- ۶- فشار کمانش استاتیکی نسبت به نسبت ابعادی برای ترتیب لایه‌گذاریه‌های مختلف.....	۴۴.....
شکل ۳- ۷- فشار کمانش استاتیکی نسبت به جنس الیاف برای ترتیب لایه‌گذاریه‌های مختلف.....	۴۵.....
شکل ۳- ۸- روش گذاری دستی لایه گذاری	۵۰.....
شکل ۳- ۹- روش فشاری لایه گذاری	۵۰.....
شکل ۳- ۱۰- فرآیند شکلدهی به کمک خلا	۵۱.....
شکل ۳- ۱۱- روش تزریق رزین	۵۱.....
شکل ۳- ۱۲- روش پیچش الیاف	۵۲.....
شکل ۳- ۱۳- دیاگرام فنر دستگاههای فشار سنتی	۵۶.....
شکل ۳- ۱۴- جابجایی جزئی نمونه طی کمانش	۵۷.....

- شکل ۴-۱- ابعاد هندسی در یک پوسته مخروطی ۶۰
- شکل ۴-۲- ابعاد هندسی مدل ساخته شده (ضخامت پوسته ها نیز در سه مقدار متفاوت تغییر می کند) ۶۱
- شکل ۴-۳- قالبهای چوبی مورد استفاده ۶۲
- شکل ۴-۴- شماتیک پارچه فیبر شیشه مورد استفاده ۶۳
- شکل ۴-۵- شماتیک پارچه صفحه ای (۹۰/۰) ۶۳
- شکل ۴-۶- مقایسه بین خواص چند رزین پر کاربرد ۶۵
- شکل ۴-۷- الگوهای مقوایی برای برش پارچه ها ۶۶
- شکل ۴-۸- اجرای طرح گسترش مخروط بر روی پارچه ۶۷
- شکل ۴-۹- پارچه های بریده شده با استفاده از الگو ۶۷
- شکل ۴-۱۰- الگوی گسترش مخروط بر روی نایلون ۶۸
- شکل ۴-۱۱- مواد لازم جهت تهیه مدل ۶۸
- شکل ۴-۱۲- پارچه پیچیده شده دور مدل ۷۰
- شکل ۴-۱۳- قطعات پس از خروج از روی مدل ۷۰
- شکل ۴-۱۴- پارامترهای هندسی پوسته مخروطی ۷۲
- شکل ۴-۱۵- تغییرات ضخامت در نقاط مختلف نمونه S2 ۷۴
- شکل ۴-۱۶- نمودار مورد استفاده برای یافتن مدول الاستیسیته ۷۸
- شکل ۴-۱۷- نمودار برای پیدا کردن تنش نهایی شکست ۷۹
- شکل ۴-۱۸- طرحهای مختلف بافت پارچه از راست: بافت دوگانه، ساتین و بافت مسطح متعادل (نوع مورد استفاده) ۷۹

- شکل ۴-۱۹- مقطع انتخاب شده برای تقویت کننده های سازه ای ۸۲
- شکل ۴-۲۰- تیغه برش الماسه به همراه فرز دستی ۸۳
- شکل ۴-۲۱-بالا: نمونه نهایی تقویت کننده طولی، وسط: تقویت کننده حلقوی، پایین: تقویت کننده های آماده برای اتصال ۸۴
- شکل ۴-۲۲- قطعه نهایی آماده برای آزمایش ۸۵
- شکل ۵-۱- مودهای مختلف کماتش یک پوسته استوانهای تحت بارگذاری محوری ۹۱
- شکل ۵-۲- ایجاد مودهای کماتش در حالت استاتیکی. ۵ لوب در راستای محیطی ایجاد شده است. ... ۹۱
- شکل ۵-۳- استفاده از کمپرسور جهت تولید هوای فشرده ۹۳
- شکل ۵-۴- کپ بالایی دستگاه طراحی شده. ۹۴
- شکل ۵-۵- بالا: قطعه از نمای محل اتصال به هوای فشرده، پایین: از نمای محل قرارگیری سنج فشار. ۹۵
- شکل ۵-۶- شماتیک دستگاه آزمایش ایربک ، استفاده شده برای انجام آزمایشات پروژه ۹۶
- شکل ۵-۷- شیارهای ایجاد شده روی در بالایی محفظه فشار ۹۶
- شکل ۵-۸- درپوش پایین طراحی شده برای پوسته مخروطی ۹۷
- شکل ۵-۹- چسب سیلیکونی درزبند ۹۷
- شکل ۵-۱۰- قرار گیری پوسته درون شیار درب محفظه فشار ۹۸
- شکل ۵-۱۱- ایجاد دو شیار در فلنج دستگاه و قرار گیری دو ارینگ درون شیارها ۹۸
- شکل ۵-۱۲- ایجاد ۱۴ سوراخ در درب دستگاه تست ۹۹
- شکل ۵-۱۳- شماتیک روش آزمایش صورت گرفته در پایان نامه ۱۰۰

- شکل ۵-۱۴- گنج فشار مورد استفاده در پروژه ۱۰۱.....
- شکل ۵-۱۵- چینش قطعات چوب به منظور کاهش فضای مرده در مخزن تست. ۱۰۲.....
- شکل ۵-۱۶- خرابی 4-1-3S بدلیل افزایش بار استاتیکی - بالا: تصویر نمونه قبل از آزمایش، پایین: نمونه بعد از آزمایش. ۱۰۳.....
- شکل ۵-۱۷- ایجاد مدهای تقریباً متقارن پس از افزایش فشار در مرحله پس کمانش ۱۰۴.....
- شکل ۶-۱- پارمترهای هندسی مؤثر بر فشار کمانش ۱۰۶.....
- شکل ۶-۲- آنالیز اولیه انجام شده روی فشار کمانش ۱۱۰.....
- شکل ۶-۳- آنالیز دوباره با حذف تمام فاکتورهای غیر مؤثر به جز فاکتور تقویت کننده طولی ۱۱۰.....
- شکل ۶-۴- آنالیز نهایی با حذف فاکتور تقویت کننده طولی ۱۱۱.....
- شکل ۶-۵- ضرایب رگرسیون برای فشار کمانش (P1) ۱۱۱.....
- شکل ۶-۶- آنالیز اولیه انجام شده روی فشار پس کمانش ۱۱۵.....
- شکل ۶-۷- آنالیز نهایی با حذف فاکتور تقویت کننده طولی ۱۱۵.....
- شکل ۶-۸- ضرایب رگرسیون برای فشار پس کمانش ۱۱۶.....
- شکل ۶-۹- آنالیز اولیه انجام شده روی وزن ۱۲۰.....
- شکل ۶-۱۰- آنالیز نهایی با حذف فاکتورهای غیر مؤثر ۱۲۱.....
- شکل ۶-۱۱- ضرایب رگرسیون برای وزن ۱۲۱.....
- شکل ۶-۱۲- آنالیز بهینه سازی همزمان وزن و فشار کمانش ۱۲۵.....
- شکل ۶-۱۳- آنالیز بهینه سازی همزمان وزن و فشار پس کمانش ۱۲۷.....

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 کماتش^۱ پوسته‌ها، عموماً در رشته‌های مهندسی مکانیک، علوم دریایی و سازه‌های دریایی، مهندسی عمران، مهندسی شیمی و مهندسی هوا و فضا 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 زیردریایی و زیردریایی‌های تحقیقاتی، برخی از اجزاء سازه‌ای کشتی‌ها، 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. [۹-۱]

پوسته‌های نازک، سازه‌هایی بسیار مؤثری هستند که می‌توانند بارهای کماتش 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^۲ هندسی، غیر دایروی بودن پوسته‌ها و غیره در پدیده مربوط به رفتار ابتدایی کماتش پوسته‌های ایزوتروپ توسعه پیدا کرده است و برای یک‌سری از پوسته‌ها حساسیت بار کماتش به ناکاملی یا فاکتورهای مؤثر بدست آمده است. ولی متأسفانه میزان تأثیر این روش‌ها در روش‌های تحلیل مهندسی کوچک می‌باشد و هنوز نیز به ضریب‌های اطمینان تجربی استخراج شده از آزمایش‌های تجربی و

^۱ Buckling

^۲ Imperfection sensitivity

ارائه نمودارهای طراحی کمانش پوسته ها، نیاز می‌باشد.

در این میان سازه‌های کامپوزیتی بخاطر وزن کم، استحکام بالا و امتیازهای زیادی که دارا هستند، مورد توجه قرار گرفته‌اند. به این دلیل شاهد رشد روزافزون استفاده از کامپوزیت‌ها بجای مواد فلزی در سازه‌های دریایی، سازه‌های زمینی، حمل و نقل، خودرو، رباتیک و سایر رشته‌های مهندسی هستیم. از جمله مزایای کامپوزیت‌ها، میتوان به داشتن نسبت وزن به استحکام پایین، مقاومت بالا در برابر بارگذاری‌های حرارتی، اعمال کردن خواص دلخواه در جهت‌های مورد نیاز، مقاومت خستگی بالا و... اشاره کرد.

همانند سازه‌های ایزوتروپ، سازه‌های کامپوزیتی نیز تحت فشار خارجی هیدرواستاتیک، بار محوری، پیچش، برش، دچار کمانش می‌شوند. ظرفیت تحمل بار کامپوزیت‌ها متاثر از ناکاملی هندسی^۱، شرایط مرزی و خروج از مرکز بار می‌باشد. تمام این پارامترها به نوع سازه‌ای که مورد بررسی قرار می‌گیرد، وابستگی دارد. معمولاً یک اختلاف قابل توجهی بین روش‌های تئوری و مشاهدات تجربی وجود دارد، مگر آنکه شرایط مرزی، خروج از مرکزی بار بطور دقیق در محاسبات منظور گردد. در ضمن باید یک اندازه‌گیری دقیقی نیز از شرایط هندسی اولیه صورت گیرد و در محاسبات تئوری لحاظ شود. [۱]

همچنین در میان پوسته‌های دوار، پوسته‌های مخروطی جایگاه ویژه‌ای دارند. این سازه‌ها به دلیل شکل آیرودینامیکی بسیار مناسب خود اکثراً نقش دماغه و اتصال دهنده دو پوسته استوانه‌های کاربرد دارند. این سازه‌ها به دلیل شکل خود در صنایع هوافضا و دریایی کاربرد فراوانی دارند. در صنایع هوافضا فاکتور کمینه بودن وزن بسیار پر اهمیت است. همچنین باید در این سازه‌ها به مقاومت خستگی و حرارتی بالا نیز توجه شود.

در پایان نامه حاضر به بررسی تجربی کمانش پوسته‌های مخروطی کامپوزیت تقویت شده تحت فشار خارجی هیدرواستاتیکی پرداخته خواهد شد. از اهداف این پروژه می‌توان به: ۱- بررسی اثر پارامترهای بدون بعد هندسی پوسته مخروطی کامپوزیتی در فشار کمانش و فشار پس کمانش ۲- بررسی اثر تعداد و نوع تقویت کننده‌های سازه‌ای در فشار کمانش و فشار پس کمانش ۳- بررسی همزمان پارامترهای هندسی و تقویت کنندگی بر فشار کمانش و پس کمانش ۴- مقایسه میزان تقویت کنندگی با توجه به افزایش وزن سازه ۵- و در نهایت رسیدن به یک رابطه تجربی برای فشار کمانش روی سازه‌های تقویت شده کامپوزیتی، اشاره کرد.

مطمئناً رسیدن به اهداف فوق با دشواری‌هایی همراه خواهد بود. در ادامه به برخی از مشکلات و

¹ Initial Imperfection

گلوگاه‌های پیش رو اشاره خواهد شد. ۱- طراحی و ساخت سازه های مورد آزمایش، البته برای این طراحی لازم است که موارد ذیل مورد توجه قرار گیرد که از آن جمله می توان به: تعیین هندسه سازه، تعیین نیروی لازم جهت ایجاد بارگذاری استاتیکی، نحوه تهیه مواد اولیه سازه و ساخت قطعات، مشکل انتخاب روش ساخت، تهیه مواد لازم، زمان بر و هزینه بر بودن ساخت قطعات، اندازه گیری پارامترهای مختلف اشاره کرد. ۲- طراحی آزمایشات از نظر تعداد قطعات ساخته شده و دفعات تست ۳- بررسی و معرفی پارامترهای لازم و مؤثر در پایداری پوسته کامپوزیتی جهت داده برداری ۴- شکل، جنس و هندسه سازه تقویت کننده ۵- نحوه اتصال سازه تقویت شد به سازه اصلی ۶- شناسایی معیارهای شروع کمانش.

خط مشی کلی که در این پروژه دنبال می شود عبارت است از: انتخاب نوع و جنس سازه مخروطی کامپوزیتی، انتخاب نوع و جنس سازه تقویت کننده، ساخت قطعات کامپوزیتی و اتصال سازه تقویت کننده به سازه اصلی. در ادامه انتخاب روش آزمایش پوسته‌ها، آزمایش و داده برداری، استخراج داده‌ها و نمودارها و در انتها بحث و نتیجه گیری از فعالیت‌های انجام شده می باشد.

ساختار این پروژه به این شکل خواهد بود که: ابتدا در فصل دوم به بررسی تحقیقات صورت گرفته در زمینه کمانش پوسته‌های مخروطی، پوسته‌های کامپوزیتی، و پوسته‌های تقویت شده پرداخته خواهد شد و مفاهیم و مباحث مرتبط با موضوعات مطرح خواهند شد.

در فصل سوم به بررسی روش‌های طراحی و تکنیک‌های آزمایش پوسته‌ها تحت فشار خارجی و نیز به صورت اجمالی روش‌های ساخت کامپوزیت‌ها معرفی می شود. در فصل چهارم به نوع مواد مورد استفاده و همچنین روش ساخت نمونه های مورد آزمایش و نحوه اندازه گیری پارامترهای مورد نظر شرح داده خواهند شد. در این فصل مراحل ساخت به صورت مفصل مطرح خواهد شد. در فصل پنجم نحوه طراحی آزمایشات (DOE) مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ادامه فصل پنجم روش انجام آزمایشات و نحوه اندازه گیری پارامترهای مورد نظر و نتایج حاصله توضیح داده خواهد شد. در فصل ششم نیز به بحث و بررسی و تحلیل نتایج حاصل از آزمایشات قطعات ساخته شده، پرداخته خواهد شد. این فصل شامل راهنمایی‌ها و روابط لازم جهت طراحی و انتخاب سازه مخروطی تقویت شده تحت بارگذاری استاتیکی خارجی است. در نهایت در فصل هفتم نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات ارائه خواهد شد.

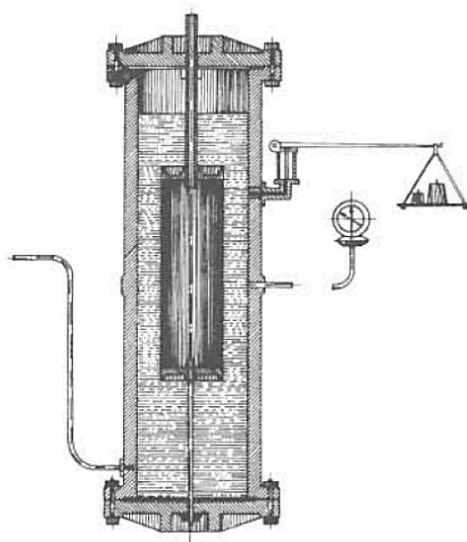
فصل دوم - مروری بر کارهای تحقیقاتی صورت گرفته در زمینه کمانش پوسته ها

۲-۱- مقدمه

براساس مطالعات انجام شده مشخص گردید، تحقیقات زیادی چه در حوزه تئوریک و چه در حوزه تجربی در زمینه پایداری پوسته‌ها بخصوص پوسته‌های استوانه‌ای ایزوتروپ تحت بارگذاری خارجی انجام شده است. در زمینه پایداری پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده نیز تحقیقات بسیار کمی صورت گرفته است. و معمولاً نتایج تجربی انتشار پیدا نکرده‌اند این موضوع در مورد پوسته‌های مخروطی و به خصوص تقویت شونده‌گی، کاملاً قابل لمس و مشهود می‌باشد. در ادامه به برخی از تحقیقات صورت پذیرفته در زمینه پایداری پوسته‌ها و در حوزه های آزمایشات تجربی و بررسی‌های تحلیلی و عددی و تقویت شونده‌گی اشاره خواهد شد.

۲-۲- پوسته ها تحت فشار خارجی




اولین آزمایشات مربوط به کمانش پوسته ها در سال ۱۸۴۵-۱۸۵۰ توسط فابرین در لندن و بر روی لوله‌ها تحت فشار محوری و خمش انجام شد. این تحقیق در راستای طراحی پل کانوی بوده است. چندین سال بعد فابرین تحقیقات تجربی وسیعی را بر روی لوله‌ها تحت فشار خارجی انجام داد و بصورت مختصر در انتشارات علمی لندن به سال ۱۸۵۷ چاپ شد و در سال ۱۸۵۸ توسط انتشارات رویال بصورت کامل به چاپ رسید. شکل (۲-۱) نمایی از دستگاه مخزن آزمایش مورد استفاده فابرین را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱- دستگاه مورد استفاده آقای فابرین در زمینه بررسی کماتش لوله های جدار ضخیم [۱]

فابرین بر روی ۳۲ لوله استوانه ای تحت فشار خارجی هیدرواستاتیک، آزمایش کماتش انجام داد و در تلاش بعدی به بررسی اثر غیر دایروی بودن لوله ها و بررسی کماتش لوله های بیضوی بود. در جدول (۲-۱) به برخی از نتایج حاصل از آزمایشات فابرین اشاره شده است.

جدول ۲-۱- مطالعات فابرین بر روی مقاوت پوسته های استوانه در برابر فشار خارجی [۱]

MARK	NO	DIAMETER INCHES	LENGTH INCHES	THICKNESS INCHES	PRESSURE OF COLLAPSE LBS. PER SQ. IN.	REMARKS
N.	13	8	30	.043	39	
O.	14	8	39	.043	32	
P.	15	8	40	.043	31	

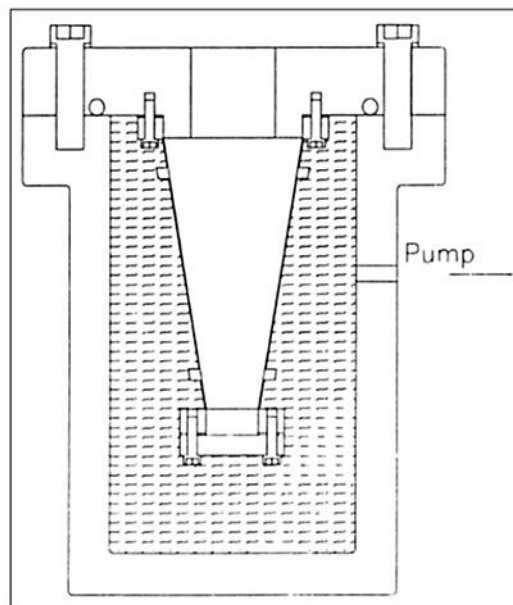
برای حدود نیم قرن پیش، نتایج تجربی فابرین و فرمولی که برای نتایج تست هایش ارائه نموده بود، اساس طراحی و فرمول پایه برای سایر محققین بود. از محققان فوق که جهت اصلاح و تکمیل فرمول آقای فابرین تلاش نمودند می توان به لاو، نیستون نام برد.

در مرجع [۱] نتایج تحقیقات نیروی دریایی آمریکا در حوزه استحکام مخازن در برابر فشار خارجی به چاب رسید. در این تحقیق نزدیکی قابل توجهی بین نتایج آزمایش و فرمول های تحلیلی ارائه شده توسط ون مایز، سوتول و توکووا برای استوانه های کوتاه مشاهده شد. فرمول تقریبی نیروی دریایی آمریکا بصورت زیر می باشد.

$$p_{cr} = \frac{2.42E}{(1 - \nu^2)^{3/4}} \frac{(t/D)^{5/2}}{[(L/D) - 0.45(t/D)^{1/2}]} \quad (1-2)$$

که در آن L طول لوله و D شعاع لوله می باشد. فرمول بالا تا زمان کنونی نیز برای بیشتر طراحی ها مورد استفاده قرار می گیرد.

در مقاله [۵] راس به بررسی تجربی و عددی پایداری سه پوسته مخروطی جدار ضخیم تحت فشار خارجی هیدرو استاتیک پرداخت. در شکل (۲-۲) دستگاه مورد استفاده راس را نشان می دهد. راس در این تحقیق برای تشخیص لحظه کمانش از ۱۲ کرنش سنج در محیط داخلی مخروط استفاده نمود. و سپس با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش تجربی و تحلیلی صورت گرفته، مشخص گردید علت انحراف نتایج تجربی و عددی عدم در نظر گرفتن ناکاملی هندسی محیطی در مدل عددی می باشد، لذا جدول طراحی ارائه گردید. در شکل (۳-۲) مخروط های آزمایش شده توسط راس آورده شده است.

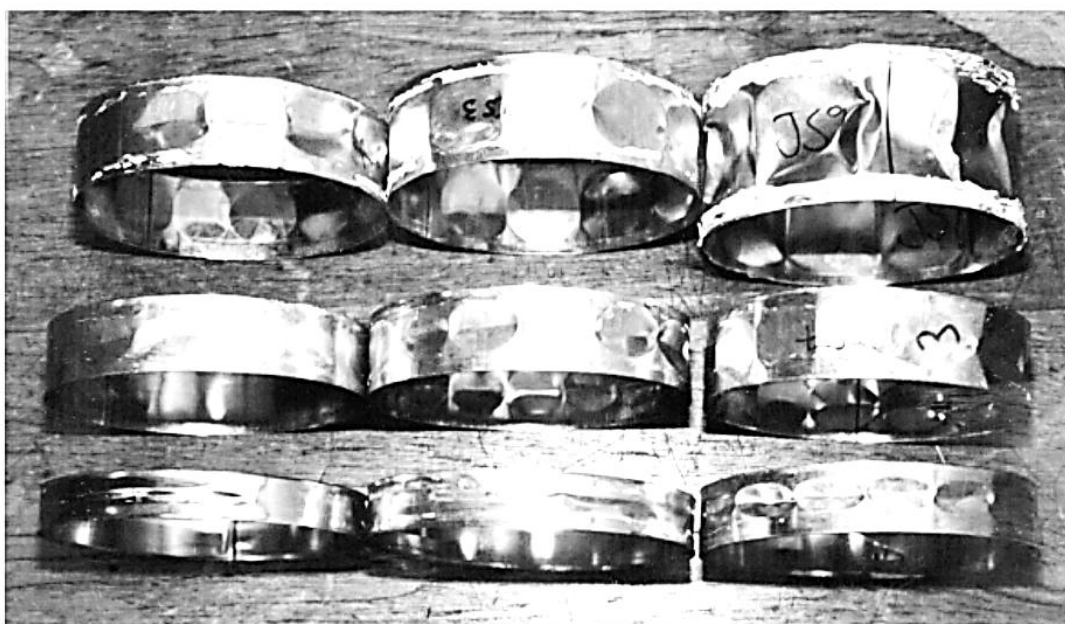


شکل ۲-۲- دستگاه استفاده شده توسط راس برای آزمایش کمانش پوسته مخروطی جدار ضخیم [۵]



شکل ۲-۳- مخروط های آزمایش شده توسط راس [۵]

در مقاله [۶] سدler مطابق شکل (۲-۴) به بررسی تجربی پایداری ۹ پوسته استوانه‌ای نازک تحت فشار هیدرواستاتیک پرداخت. ابعاد هندسی مورد استفاده در تحقیق فوق در جدول (۲-۲) مشخص شده است. در تحقیق فوق با استفاده از تئوری الاستیک پوسته‌ها، مجدد مساله بصورت تئوریک حل گردید و عدم مدل-سازی ناکاملی محیطی، علل انحراف نتایج تجربی نسبت به نتایج تحلیلی مشخص گردید و لذا جهت پوشش انحراف نتایج جدول طراحی مطابق جدول (۲-۳) و ضرایب تصحیح بنام PKD معرفی و ارائه گردید.



شکل ۲-۴- استوانه های آزمایش شده توسط سدler [۶]

جدول ۲-۲- مشخصات پوسته های استوانه‌ای آزمایش شده توسط سدلر [۶]

Model	L (mm)	e^a	r (mm)	R (mm)
JS6	7	0.78t	0.216	76.792
JS1	10.1	0.45t	0.293	76.654
JS5	15.75	0.46t	0.295	76.653
JS4	19.4	0.49t	0.296	76.652
JS2	22.25	0.31t	0.299	76.651
JS7	26.5	0.53t	0.295	76.638
JS8	29.0	0.44t	0.294	76.641
JS3	34.8	0.73t	0.295	76.653
JS9	60.2	0.74t	0.215	76.779

جدول ۲-۳- نتایج آزمایش و نتایج حل تئوری پوسته استوانه مورد استفاده سدلر [۶]

Model	1/λ	P_{exp} (MPa)	P_{cr} (MPa)	PKD = P_{cr}/P_{exp}
JS6	0.707	1.207(-)	1.294(26)	1.072
JS1	0.831	1.179(-)	1.767(22)	1.499
JS5	0.654	0.890(15)	1.012(20)	1.137
JS4	0.468	0.724(17)	0.795(19)	1.100
JS2	0.569	0.621(15)	0.695(18)	1.119
JS7	0.494	0.579(14)	0.551(17)	0.950
JS8	0.471	0.5138(13)	0.494(16)	0.918
JS3	0.450	0.428(12)	0.404(15)	0.944
JS9	0.230	0.172(10)	0.101(13)	0.587

در مقاله [۸] راس به بررسی تجربی و تئوری پایداری ۳۲ نمونه پوسته استوانه‌ای که با پارچه کامپوزیتی پیچیده شده بودند، پرداخت. تحقیق بر روی پایداری لوله های تقویت شده با الیاف کربن و الیاف شیشه بود. در ضمن در تحقیق فوق از نرم افزار ANSYS بعنوان حل عددی استفاده شد. در تحقیق فوق مشخص گردید که مدل‌های ساخته شده در محل تغییر در جنس الیاف خراب می‌شوند. همچنین مشخص شد که جدول طراحی مواد کامپوزیت ارتروپیک با نمودار طراحی مواد ایزوتروپ متفاوت می‌باشد.