دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

تحلیل استحکام استاتیکی و کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده دارای گشودگی

نگارش:

روح‌الله محمدجانی

استاد راهنما:

پروفسور امیررضا شاهانی

شهریور ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحیم

تائیدیه هیئت داوران

اعضای هیئت داوران، نسخه نهایی پایان‌نامه آقای **روح‌الله محمدجانی** را با عنوان **تحلیل استحکام استاتیکی و کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده دارای گشودگی** از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد تائید می‌کنند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام‌خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	پروفسور امیررضا شاهانی	استاد	
۲- استاد ممتحن	دکتر محمد شرعیات	دانشیار	
۳- استاد ممتحن	دکتر علی‌اصغر جعفری	دانشیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد شرعیات	دانشیار	

اظهارنامه دانشجو

عنوان پایان‌نامه: **تحلیل استحکام استاتیکی و کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده دارای گشودگی**

دانشجو: روح‌الله محمدجانی

شماره دانشجویی: ۹۰۲۳۰۰۴

استاد راهنما: پروفسور امیررضا شاهانی

اینجانب **روح‌الله محمدجانی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی **مکانیک جامدات** گرایش **طراحی کاربردی** دانشکده‌ی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه تحت عنوان فوق‌الذکر توسط شخص اینجانب انجام شده است و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تائید می‌باشد و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ کجا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب مصوب دانشکده مهندسی مکانیک را به طور کامل رعایت نموده‌ام.

امضاء

روح‌الله محمدجانی

مهر ۱۳۹۲

حق چاپ و تکثیر و مالکیت بر نتایج

۱. حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هر گونه کپی‌برداری از پایان‌نامه به صورت کلی یا بخشی از آن، تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد. در ضمن، متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲. کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست. همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیر و تشکر

به ثمر رسیدن تحقیق حاضر، جز با راهنمایی‌ها و استفاده از تجربیات ارزشمند جناب آقای پروفسور امیررضا شاهانی میسر نبوده است. ایشان با وجود مشغله‌های فراوان از هیچگونه کمکی دریغ ننموده و با دانش عمیق خود از مباحث اصلی مرتبط با پژوهش، موجبات پر بار شدن هر چه بیشتر این پایان‌نامه و تکمیل آن به شکلی شایسته را فراهم نمودند. بر خـود لازم می‌دانم با همه وجود از لطف و بزرگواری ایشان تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین از پدر و مادر عزیز و مهربانم که آرامش روحی و آسایش فکری فراهم نمودند تا با حمایت‌های همه‌جانبه در محیطی مطلوب، مراتب تحصیلی و نیز پایان‌نامه درسی را به اتمام برسانم، سپاسگزاری می‌نمایم.

چکیده

پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده یکی از المان‌های پرکاربرد در سازه‌های مهندسی هستند که بطور گسترده‌ای در مجموعه‌ی وسیعی از سازه‌های فضایی و زیر آبی نظیر موشک‌ها، راکت‌های پیشران شاتل، زیر دریایی‌ها و ... کاربرد دارند. بر این اساس، اطلاع از رفتار استحکامی (نحوه‌ی توزیع تنش بین اجزای مختلف سازه) و کمانشی پوسته‌ی تقویت‌نشده و همچنین تأثیرات تقویت‌کننده‌ها و گشودگی‌ها بر رفتار یادشده، برای طراحی صحیح و بهینه‌ی چنین سازه‌هایی، به‌جهت اطمینان از عملکرد و استحکام آنها، بسیار ضروری می‌نماید. تأثیر گشودگی‌ها بر توزیع تنش و بارهای کمانش یکی از با اهمیت‌ترین مسائل در طراحی سازه‌های فضایی می‌باشد. با لحاظ کردن گشودگی در مسئله و تقویت آن، دشواری‌های فراوانی در روند تحلیل اضافه می‌گردد. در اینحالت احتساب تغییر شکل‌های برشی پوسته، تعیین توزیع بار میان اعضای تقویت‌کننده و پوسته را به مسئله‌ای پیچیده مبدّل می‌سازد. بعلاوه بواسطه‌ی وجود تغییر شکل‌های خمشی قبل از کمانش در نزدیکی ناحیه‌ی گشودگی، تحلیل کمانش نیز به مسئله‌ای غیرخطی تبدیل شده و یافتن یک پاسخ تحلیلی برای آن به‌سبب تعداد زیاد پارامترهای موثر بر بار بحرانی کاری بسیار دشوار خواهد بود.

هدف از پروژه‌ی حاضر مطالعه‌ی شرایط وقوع واماندگی در پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده می‌باشد. جهت ارضای ملاحظات استحکامی مسئله پس از یافتن نحوه‌ی توزیع تنش میان اجزاء، بررسی تسلیم آنها مطابق معیارهای مربوطه صورت می‌پذیرد. همچنین مجموعه‌ای از مودهای ناپایداری اعم از کمانش پنل و کمانش کلی، کمانش موضعی پوسته در فواصل بین تقویت‌کننده‌ها و ... مورد مطالعه قرار خواهند گرفت. در انتها نیز بررسی آثار ناشی از ایجاد گشودگی در سازه و همچنین تأثیر تقویت آن توسط قاب‌دریچه بر بار کمانش سازه، به‌وسیله‌ی مدل‌سازی عددی (به‌جهت پیچیدگی‌های تئوری ناشی از غیرخطی شدن مسئله) در نرم‌افزار ABAQUS صورت خواهد پذیرفت.

کلمات کلیدی: پوسته‌های تقویت‌شده، رفتار استحکامی، ریب و استرینگر، کمانش کلی و پنل، گشودگی، قاب‌دریچه.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... ج
فهرست جدول‌ها ..... د
فهرست شکل‌ها ..... ه

فصل ۱- جستجوی مراجع و مطالعه‌ی پیشینه‌ی تحقیق ۱

فصل ۲- یافتن نحوه‌ی توزیع بار میان تقویت‌کننده‌ها و پوسته ۸

۲-۱- مقدمه ۸
۲-۲- توزیع بار درون پوسته‌ی استوانه‌ای تقویت‌شده ۹

فصل ۳- بررسی کمانش پنل استوانه‌ای ۱۲

۳-۱- مفاهیم اولیه‌ی پایداری پوسته‌های نازک ۱۲
۳-۲- تعیین بار کمانش ۱۲
۳-۲-۱- روش تعادل ۱۳
۳-۲-۲- روش انرژی ۱۳
۳-۳- کمانش در پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌نشده تحت نیروی فشاری محوری ۱۴
۳-۳-۱- کمانش اولیه‌ی حلقوی ۱۴
۳-۳-۲- کمانش اولیه‌ی شطرنجی ۱۶
۳-۴- تحلیل پس‌کمانش پوسته‌های استوانه‌ای مدوّر ۱۸
۳-۴-۱- روابط تئوریک ۱۹
۳-۴-۲- روابط و داده‌های تجربی ۲۱
۳-۵- کمانش در پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده ۲۳
۳-۶- تحلیل کمانشی پوسته‌های تقویت‌شده ۲۳
۳-۷- مودهای کمانش در پوسته‌های تقویت‌شده ۲۴
۳-۷-۱- استخراج پاسخ کمانش پنل و کمانش کلی پوسته‌های تقویت‌شده با ریب و استرینگر ۲۵
۳-۷-۲- پاسخ کمانشی پوسته در فواصل بین تقویت‌کننده‌های طولی و محیطی مجاور ۴۲

فصل ۴- تحلیل استاتیکی و کمانشی استوانه‌ی دارای گشودگی ۴۸

۴-۱- تحلیل استاتیکی ۴۸
۴-۱-۱- تئوری Shear-Lag ۴۸
۴-۱-۱-۱- تنش‌های استرینگر در مقطع حاوی گشودگی ۴۸
۴-۱-۱-۲- تنش‌های استرینگر در مقطع بدون گشودگی ۴۹
۴-۱-۲- تکنیک بار اختلال ۵۰

۴-۱-۳- کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌نشده‌ی دارای گشودگی ۵۳
۴-۱-۴- کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده‌ی دارای گشودگی ۶۱

فصل ۵- صحه‌گذاری روابط استخراج‌شده با تحلیل المان‌محدود ۶۶

۵-۱- پوسته‌ی تقویت‌نشده‌ی بدون گشودگی ۶۹
۵-۱-۱- تحلیل کمانش ۶۹
۵-۱-۲- تأثیر نواقص هندسی اولیه ۷۳
۵-۱-۳- تأثیر شرایط تکیه‌گاهی ۷۵
۵-۱-۴- توزیع تنش در پوسته ۷۷
۵-۲- پوسته‌ی تقویت‌نشده‌ی دارای گشودگی ۷۸
۵-۲-۱- مطالعه‌ی کمانشی خطی به‌روش المان‌محدود ۸۱
۵-۲-۲- مطالعه‌ی کمانشی غیرخطی به‌روش المان‌محدود ۸۵
۵-۲-۳- مطالعه‌ی کمانشی توسط روابط تئوری و تجربی ۸۸
۵-۳- پوسته‌ی تقویت‌شده‌ی بدون گشودگی ۹۰
۵-۳-۱- صحت‌سنجی محاسبات کمانشی برنامه توسط نتایج مراجع ۹۰
۵-۳-۲- صحت‌سنجی محاسبات کمانشی برنامه توسط نتایج تحلیل المان‌محدود ۹۱
۵-۳-۳- صحت‌سنجی محاسبات توزیع تنش برنامه توسط نتایج تحلیل المان‌محدود ۹۵

فصل ۶- گستره کاربرد روابط تئوری و مطالعات المان‌محدود سازه‌های دارای گشودگی ۹۹

۶-۱- بررسی صحت محاسبات کمانشی روابط تئوری به‌کمک تحلیل المان‌محدود ۹۹
۶-۱-۱- پوسته‌ی تقویت‌شده‌ی (توسط استرینگر) بدون گشودگی ۱۰۱
۶-۱-۲- پوسته‌ی تقویت‌شده‌ی (توسط ریب و استرینگر) بدون گشودگی ۱۰۷
۶-۲- مطالعه‌ی عددی پوسته‌ی تقویت‌شده‌ی دارای گشودگی ۱۱۲
۶-۲-۱- گشودگی تقویت‌نشده ۱۱۲
۶-۲-۲- گشودگی تقویت‌شده ۱۱۹

فصل ۷- جمع‌بندی و پیشنهادات ۱۳۵

۷-۱- جمع‌بندی ۱۳۵
۷-۲- پیشنهادات ۱۳۶

ضمیمه أ -محاسبه‌ی مشخصات هندسی تقویت‌کننده ۱۳۷

واژه‌نامه ۱۴۲
فهرست مراجع ۱۴۳

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
بار کمانش سازه‌ی بدون گشودگی	P_{WOC}
بار کمانش سازه‌ی دارای گشودگی	P_{WC}
بار کمانش سازه با گشودگی تقویت‌شده توسط قاب	P_{WCR}
بار کمانش سازه با گشودگی فاقد قاب‌دریچه	P_{WOCR}
پارامتر تقویت گشودگی	γ
پارامترهای مربوط به استرینگر (زیرنویس)	s
پارامترهای مربوط به ریب (زیرنویس)	r
تعداد نیم‌موج‌های امتداد طولی	m
تعداد نیم‌موج‌های امتداد محیطی	n
تنش بحرانی کمانش	σ_{cr}
تنش بیشینه	$\sigma_{\max}$
تنش تسلیم	σ_{Y}
ثابت پیچشی تقویت‌کننده	J
زاویه‌ی قوس گشودگی	α
سفتی پیچشی تقویت‌کننده	GJ
سفتی خمشی	D
سهم بار تحمل‌شده توسط پوسته	P_{skin}
شعاع ژیراسیون	ρ
شعاع سطح میانی	R
ضخامت پوسته	t
ضریب‌منظر گشودگی	AR
طول کل استوانه	L
فاصله‌ی بین استرینگرها	d
فاصله‌ی بین ریب‌ها	l
مدول برشی	G
مدول یانگ	E
مساحت گشودگی	S_C
مساحت مقطع تقویت‌کننده (با زیرنویس)	A
ممان اینرسی	I
نسبت پواسون	ν

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۵-۱: ابعاد و خواص پوسته‌ی مدل‌سازی‌شده..... ۷۰
جدول ۵-۲: تعداد المان‌ها، نامگذاری تحلیل بر اساس آن و نتایج محاسبات آباکوس. ۷۱
جدول ۵-۳: بار و تعداد امواج الگوی کمانش بدست‌آمده توسط آباکوس. ۷۲
جدول ۵-۴: نحوه‌ی تعریف شرایط‌مرزی روی لبه‌های انتهایی پوسته [۴۵]. ۷۶
جدول ۵-۵: مشخصات و نام المان‌بندی‌های متفاوت خطی و خطی/ مرتبه‌دو..... ۸۳
جدول ۵-۶: نتایج تحلیل عددی برای المان‌بندی خطی و خطی/ مرتبه‌دو..... ۸۳
جدول ۵-۷: محاسبات بار کمانش بنابر تحلیل خطی و غیرخطی مرجع [۴۶] و مطالعه حاضر. ۸۶
جدول ۵-۸: ابعاد و خواص پوسته‌ی تقویت‌شده مراجع [۱۶] و [۱۸]. ۹۰
جدول ۵-۹: مقایسه‌ی نتایج تحقیق حاضر و مرجع [۱۶] (تقویت با ریب و استرینگر)..... ۹۱
جدول ۵-۱۰: ابعاد و خواص پوسته و تقویت‌کننده‌ها..... ۹۲
جدول ۵-۱۱: نام تحلیل، تعداد المان‌ها و نتایج محاسبات آباکوس (بار وقوع ناپایداری کلی). ۹۴
جدول ۶-۱: ابعاد و خواص پوسته و تقویت‌کننده‌ها..... ۱۰۲
جدول ۶-۲: سایز دانه‌بندی، تعداد المان‌ها و نتایج کمانشی آباکوس (شرایط تکیه‌گاهی ساده)..... ۱۰۴
جدول ۶-۳: نتایج محاسبات بار ناپایداری کلی تئوری و آباکوس بر واحد طول (N/mm). ۱۰۴
جدول ۶-۴: نسبت بار حاصل از تحلیل المان‌محدود به بار محاسبه‌شده از تئوری..... ۱۰۵
جدول ۶-۵: نتایج محاسبات بار ناپایداری کلی تئوری و آباکوس بر واحد طول (N/mm). ۱۰۸
جدول ۶-۶: نتایج محاسبات بار ناپایداری کلی تئوری و آباکوس بر واحد طول (N/mm). ۱۱۰
جدول ۶-۷: ابعاد و خواص پوسته مدل‌سازی‌شده..... ۱۱۴
جدول ۶-۸: تعداد المان‌ها و نتایج محاسبات متناظر از آباکوس. ۱۱۶
جدول ۶-۹: نتایج بار کمانش سازه بر حسب تغییر ابعاد گشودگی..... ۱۱۸
جدول ۶-۱۰: ضخامت قاب‌دریچه، مقدار γ و بار کمانش متناظر از محاسبات آباکوس. ۱۲۰
جدول ۶-۱۱: شماره‌ی ساختار قاب‌دریچه، مقدار γ و بار کمانش متناظر از محاسبات آباکوس. ۱۲۳
جدول ۶-۱۲: ضخامت قاب، مقدار γ و بار کمانش حاصل از آباکوس ($d = 25$ mm)..... ۱۲۵
جدول ۶-۱۳: ضخامت قاب، مقدار γ و بار کمانش حاصل از آباکوس ($d = 37.5$ mm)..... ۱۲۵
جدول ۶-۱۴: ضخامت قاب، مقدار γ و بار کمانش حاصل از آباکوس ($d = 50$ mm)..... ۱۲۶
جدول ۶-۱۵: ضخامت قاب‌دریچه، مقدار γ و بار کمانش حاصل از محاسبات آباکوس..... ۱۲۹
جدول ۶-۱۶: مقادیر متفاوت W_1 و W_2 و بار کمانش متناظر از محاسبات آباکوس..... ۱۳۱
جدول ۶-۱۷: شماره‌ی الگوی تقویت و بار کمانش متناظر از محاسبات آباکوس. ۱۳۳

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: شمایی از سطح میانی، شعاع و ضخامت پوسته [۱]. ۸
شکل ۲-۲: شمایی از یک پوسته‌ی استوانه‌ای تقویت‌شده [۱۸]. ۱۰
شکل ۳-۱: مود کمانش اولیه‌ی متقارن [۶]. ۱۴
شکل ۳-۲: مود کمانش اولیه‌ی نامتقارن [۶]. ۱۷
شکل ۳-۳: نتایج تست‌های کمانش پوسته‌های استوانه‌ای در نیروی فشاری محوری [۶]. ۱۸
شکل ۳-۴: رفتار پس‌کمانش استوانه‌ی تحت نیروی فشاری محوری [۶]. ۲۰
شکل ۳-۵: استحکام نهایی پوسته‌ی استوانه‌ای تحت نیروی فشاری محوری [۶]. ۲۰
شکل ۳-۶: منحنی σ_{cr} / E بر حسب R / t (استوانه‌ی تقویت‌نشده؛ بهترین برازش) [۸]. ۲۲
شکل ۳-۷: نتایج تست‌های کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تحت نیروی فشاری محوری [۱۰]. ۲۲
شکل ۳-۸: مودهای متفاوت ناپایداری در پوسته‌های تقویت‌شده [۳۲]. ۲۵
شکل ۳-۹: ناپایداری پنل [۱۴]. ۲۶
شکل ۳-۱۰: ناپایداری کلی [۱۴]. ۲۶
شکل ۳-۱۱: ضرایب کاهنده‌ی استوانه‌های تقویت‌شده به‌میزان سبک (معیار ۹۰٪ احتمال) [۹]. ۳۱
شکل ۳-۱۲: هندسه‌ی پوسته‌ی استوانه‌ای تقویت‌شده [۱۶]. ۳۳
شکل ۳-۱۳: پیش‌بینی‌های بار کمانش برای استوانه‌ی ایزوتروپیک تقویت‌شده [۱۸]. ۴۲
شکل ۳-۱۴: پنل استوانه‌ای تحت فشار محوری [۷]. ۴۴
شکل ۳-۱۵: شماتیک منحنی بی‌بعد لگاریتمی داده‌های تست پنل‌های خمیده‌ی ایزوتروپیک [۲۲]. ۴۷
شکل ۴-۱: نحوه‌ی تغییرات تنش‌های استرینگر در اطراف گشودگی [۲۳]. ۵۰
شکل ۴-۲: شمای استوانه‌ی دارای گشودگی به همراه انواع بارگذاری [۲۴]. ۵۱
شکل ۴-۳: شمای یک پنل برش [۲۴]. ۵۱
شکل ۴-۴: شمایی از یک Bay [۲۴]. ۵۱
شکل ۴-۵: شمایی از مقایسه‌ی نتایج بار استرینگر حاصل از تست‌ها و تحلیل بار اختلال [۲۶]. ۵۳
شکل ۴-۶: مقایسه‌ی نتایج تست‌ها و رابطه‌ی تجربی (۴-۱۲) [۲۷]. ۵۶
شکل ۴-۷: تأثیر تقویت گشودگی بر حسب پارامتر کیفیت پوسته و طول کمان گشودگی [۲۸]. ۵۸
شکل ۴-۸: تأثیر تقویت گشودگی بر بار کمانشی سازه [۳۷]. ۵۹
شکل ۴-۹: تأثیر ضخامت، مساحت و جهت‌گیری الیاف تقویت‌کننده بر بار کمانش سازه [۳۳]. ۶۱
شکل ۴-۱۰: منحنی تغییرات P/P_0 بر حسب $\overline{w}/w_0$ برای پوسته‌ی تقویت‌شده با استرینگر [۲۹]. ۶۲
شکل ۴-۱۱: تغییرات P/P_0 بر حسب $\overline{w}/w_0$ برای پوسته‌ی تقویت‌شده با ریب و استرینگر [۲۹]. ۶۳
شکل ۴-۱۲: تغییرات P_{cr}/P_0 بر حسب w_{sf}/w_0؛ پوسته‌ی تقویت‌شده با ریب و استرینگر [۴۱]. ۶۴
شکل ۴-۱۳: تغییرات P_{cr}/P_0 بر حسب d؛ پوسته‌ی تقویت‌شده با ریب و استرینگر [۴۱]. ۶۵

شکل ۵-۱: روندنمای کلی برنامه. ۶۸
شکل ۵-۲: کانتور تغییرات مولفه‌ی شعاعی جابجایی ناشی از کمانش مطابق مود ۱ و ۳. ۷۳
شکل ۵-۳: کمانش پوسته تحت نیروی محوری با شرایط تکیه‌گاهی ساده و گیردار [۴۴]. ۷۶
شکل ۵-۴: کانتور تغییرات مولفه‌های طولی و محیطی تنش پیش از کمانش پوسته. ۷۷
شکل ۵-۵: ابعاد و مشخصات مسئله‌ی دارای گشودگی [۴۶]. ۷۸
شکل ۵-۶: شمای عمومی رفتار ناپایدار استاتیکی [۴۸]. ۸۱
شکل ۵-۷: شمایی از المان‌بندی پوسته همراه با نمایش نواحی خطی/ مرتبه‌دو. ۸۲
شکل ۵-۸: کانتور تغییرات مولفه شعاعی جابجایی کمانشی. ۸۴
شکل ۵-۹: منحنی تغییرات تنش مایزز روی لبه بالایی گشودگی (عمود بر امتداد طولی). ۸۴
شکل ۵-۱۰: تغییرات بار محوری بر حسب جابجایی طولی نقطه‌ی اعمال بار. ۸۵
شکل ۵-۱۱: مسیرهای تعادل پوسته‌ی استوانه‌ای دارای گشودگی تحت نیروی محوری [۵۰]. ۸۶
شکل ۵-۱۲: تغییرات بار- جابجایی شعاعی نقطه‌ی A. ۸۷
شکل ۵-۱۳: کانتور تنش محوری برای طول کمان متناظر با لحظه‌ی ناپایداری (۰/۲۲۸۱). ۸۹
شکل ۵-۱۴: جزئیات سیستم تقویت‌کننده [۴۵]. ۹۲
شکل ۵-۱۵: کانتور تغییرات مولفه شعاعی جابجایی ناشی از ناپایداری کلی. ۹۵
شکل ۵-۱۶: تغییرات مولفه طولی تنش پیش از کمانش در پوسته. ۹۷
شکل ۵-۱۷: تغییرات مولفه محیطی تنش پیش از کمانش در پوسته. ۹۷
شکل ۵-۱۸: مولفه محیطی تنش پیش از کمانش در نقاط میانی مجموعه ریب‌ها. ۹۸
شکل ۵-۱۹: منحنی تغییرات مولفه طولی تنش پیش از کمانش در استرینگر. ۹۸
شکل ۶-۱: نتایج محاسبات بار کمانش تئوری و المان‌محدود. ۱۰۶
شکل ۶-۲: کانتور تغییرات مولفه‌ی شعاعی جابجایی ناشی از کمانش؛ حالت SS با ۳۶ استرینگر. ۱۰۷
شکل ۶-۳: کانتور تغییرات مولفه‌ی شعاعی جابجایی ناشی از کمانش؛ ۳ ریب و ۱۶ استرینگر. ۱۰۹
شکل ۶-۴: نتایج محاسبات بار کمانش تئوری و المان‌محدود (تعداد ریب‌ها: ۳ عدد). ۱۰۹
شکل ۶-۵: نتایج محاسبات بار کمانش تئوری و المان‌محدود (تعداد ریب‌ها: ۶ عدد). ۱۱۱
شکل ۶-۶: مقادیر بار کمانش تحلیل المان‌محدود. ۱۱۲
شکل ۶-۷: شمایی از پوسته تقویت‌شده دارای گشودگی [۴۵]. ۱۱۳
شکل ۶-۸: شمای استرینگر، ریب و سازه‌ی نهایی با دو گشودگی مقابل به قطر در وسط طول. ۱۱۴
شکل ۶-۹: کانتور تغییرات مولفه‌ی شعاعی جابجایی کمانشی (تحلیل غیرخطی). ۱۱۷
شکل ۶-۱۰: تغییرات بار کمانش بر حسب تغییر ابعاد گشودگی. ۱۱۸
شکل ۶-۱۱: تغییرات پارامتر بار کمانش بر حسب تغییر پارامتر ابعاد گشودگی. ۱۱۹
شکل ۶-۱۲: شمای قاب‌دریچه‌ی کامل. ۱۲۰
شکل ۶-۱۳: تأثیر تغییرات پارامتر γ بر بار کمانش سازه‌ی دارای قاب‌دریچه‌ی کامل. ۱۲۱
شکل ۶-۱۴: کانتور تغییرات مولفه‌ی شعاعی جابجایی کمانشی؛ تقویت با قاب ۱ میلی‌متری. ۱۲۲

شکل ۶-۱۵: ساختارهای درنظرگرفته‌شده برای قاب‌دریچه. ۱۲۲
شکل ۶-۱۶: میزان کارآمدی ساختارهای مختلف قاب در تقویت گشودگی. ۱۲۴
شکل ۶-۱۷: شمای جزء تقویت‌کننده‌ی پنل حاوی گشودگی (قاب‌دریچه). ۱۲۴
شکل ۶-۱۸: تغییرات بار کمانش سازه برای مقادیر متفاوت از مساحت و ضخامت قاب‌دریچه. ۱۲۶
شکل ۶-۱۹: تغییرات مقدار پارامتر $P\times\gamma$ بر حسب تغییرات γ. ۱۲۸
شکل ۶-۲۰: تغییرات مقدار پارامتر $(P_{WCR}/P_{WOC})\times\gamma$ بر حسب تغییرات γ ۱۲۹
شکل ۶-۲۱: تغییرات شیب و عرض از مبدأ خطوط برازش‌شده. ۱۳۰
شکل ۶-۲۲: شمای قاب‌دریچه با پهنای متفاوت در امتداد طولی و محیطی. ۱۳۱
شکل ۶-۲۳: تغییرات مقدار پارامتر $P\times(W_1/W_2)$ بر حسب تغییرات (W_1/W_2). ۱۳۲
شکل ۶-۲۴: الگوهای درنظرگرفته‌شده برای تقویت سازه. ۱۳۳
شکل ۶-۲۵: کانتورهای جابجایی شعاعی در لحظه‌ی وقوع ناپایداری؛ الگوهای تقویت (۱) تا (۴). ۱۳۴
شکل أ- ۱: فرم کلی A از مقاطع تقویت‌کننده ۱۳۷
شکل أ- ۲: فرم کلی B از مقاطع تقویت‌کننده ۱۳۸
شکل أ- ۳: حالتی خاص از مقطع تقویت‌کننده A (ابعاد بر حسب mm). ۱۳۸
شکل أ- ۴: حالتی خاص از مقطع تقویت‌کننده A (ابعاد بر حسب mm). ۱۳۹
شکل أ- ۵: حالتی خاص از مقطع تقویت‌کننده B (ابعاد بر حسب mm). ۱۴۰
شکل أ- ۶: حالتی خاص از مقطع تقویت‌کننده B (ابعاد بر حسب mm). ۱۴۱

فصل ۱– جستجوی مراجع و مطالعه‌ی پیشینه‌ی تحقیق

پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده یکی از المان‌های پرکاربرد در سازه‌های مهندسی هستند که بطور گسترده‌ای در مجموعه‌ی وسیعی از سازه‌های فضایی و زیر آبی نظیر موشک‌ها، راکت‌های پیشران شاتل، زیر دریایی‌ها و ... کاربرد دارند. بر این اساس، اطلاع از رفتار استحکامی (نحوه‌ی توزیع تنش بین اجزای مختلف سازه) و کمانشی پوسته‌ی تقویت‌نشده و همچنین تأثیرات تقویت‌کننده‌ها و گشودگی‌ها بر رفتار یادشده، برای طراحی صحیح و بهینه‌ی چنین سازه‌هایی، به‌جهت اطمینان از عملکرد و استحکام آنها، بسیار ضروری می‌نماید. در طراحی سازه‌های فضایی تأثیر گشودگی‌ها بر توزیع تنش و بارهای کمانش یکی از با اهمیت‌ترین مسائل مورد مطالعه می‌باشد.

مرجع [۱] با ارائه‌ی تعاریفی کلی از سازه‌های پوسته‌ای، به معرفی انواع آنها (پوسته‌های استوانه‌ای، پوسته‌های ضخیم و نازک، پوسته‌های کم‌عمق) پرداخته است.

نخستین گام جهت تحلیل این سازه‌ها، بررسی ملاحظات استحکامی (توزیع تنش‌های غشایی قبل از وقوع کمانش) و استخراج روابط مربوطه می‌باشد. Singer و همکاران وی [۲] با انجام بحثی در این زمینه، به ارائه‌ی روابط توزیع تنش ناشی از اعمال یک نیروی فشاری محوری در دو انتهای پوسته‌های تقویت‌نشده‌ی بدون گشودگی پرداخته‌اند. Amdahl [۳] و Block [۴] روابط توزیع تنش در تقویت‌کننده‌ها و پوسته را به ترتیب برای حالتیکه پوسته توسط استرینگر تنها یا ریب[1] و استرینگر[2] به همراه یکدیگر تقویت شده باشد، ارائه نموده‌اند.

از آنجا که پوسته‌های استوانه‌ای عمدتاً سازه‌هایی بسیار نازکند، لذا در طراحی آنها لزوم توجه به ملاحظات پایداری (مقاومت در برابر وقوع کمانش) موضوعی بسیار مهم بوده و اهمیت بالاتری در مقایسه با پرداختن به ملاحظات استحکامی خواهد داشت [۵]. مفاهیم پایداری پوسته‌های نازک و روش‌های تعیین بار کمانش الاستیک در پوسته‌های استوانه‌ای (روش تعادل و روش انرژی) در مرجع

[1] Ring
[2] Stringer

[۱] تشریح شده‌اند. علاوه بر این، روند دست‌یابی به بارهای کمانش کلاسیک پوسته‌های استوانه‌ای (تقویت‌نشده) تحت نیروی فشاری محوری، در دو مود متقارن و نامتقارن به همراه روابط دست‌یابی به مقادیر بحرانی هر یک و توضیحات مربوطه (تأثیرات شرایط مرزی لبه‌ها، پارامترهای موثر بر بار کمانش و ...) بنابر مراجع [۶] و [۷] ارائه گردیده‌اند.

بر مبنای نتایج تست‌های صورت‌گرفته، استوانه‌های واقعی در بارهایی که بطور قابل ملاحظه‌ای از مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط تئوری پایداری خطی کوچک‌ترند، کمانش می‌نمایند. این مشاهده که بروز آن بطور عمده ناشی از وجود نواقص اولیه (انحرافات کوچک از فرم مدوّر ایدآل) در پوسته می‌باشد، در مبحثی با عنوان رفتار پس‌کمانش مطالعه شده و الگوی کمانشی متناظر با آن، نحوه‌ی معرّفی تأثیرات نواقص به تئوری و روابط طراحی پوسته‌های استوانه‌ای واقعی (دارای نواقص اولیه) در مراجع [۱] و [۷] ارائه گردیده‌اند. Smith و همکاران وی در مراجع [۸] و [۹] و همچنین Jawad در مرجع [۱۰]، روابط تجربی و منحنی‌های طراحی را برای پوسته‌های تقویت‌نشده، بر اساس داده‌های تست ارائه نموده‌اند.

با معرّفی راهکارهای مقاوم‌سازی پوسته‌ها در برابر کمانش از دو طریق افزایش ضخامت پوسته و یا استفاده از تقویت‌کننده‌ها، مطالبی در خصوص پوسته‌های تقویت‌شده نظیر حوزه‌ی کاربرد، اهمیت مطالعه‌ی رفتار کمانشی و تفاوت‌های کلی کمانش آنها با ناپایداری پوسته‌های تقویت‌نشده تحت نیروی فشاری محوری توسط Reddy و همکاران، Chen و همکاران و همچنین Hall و Hedgepeth بترتیب در مراجع [۱۱]، [۱۲] و [۱۳] بیان گردیده است. از جمله تفاوت‌های یادشده می‌توان به حساسیت بسیار کمتر پوسته‌های تقویت‌شده به نواقص و همچنین مقبولیت بار کمانش بدست‌آمده از تئوری کلاسیک خطی بعنوان تقریب بسیار خوبی از بار واقعی فروریزش آنها، اشاره نمود.

روش‌های تحلیل کمانش پوسته‌های تقویت‌شده (تئوری‌های تقویت‌کننده‌ی سربارشده[1] و تقویت‌کننده‌ی سربارنشده[1]) بر مبنای میزان تقویت صورت‌گرفته (فواصل بین استرینگرها) توسط Reddy و همکاران وی در مرجع [۱۱] و Smith و همکاران در مرجع [۱۴] معرفی گردیده‌اند.

[1] Smeared

مجموعه‌ی مودهای ممکن برای بروز واماندگی ناشی از ناپایداری در پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده با ریب و استرینگر که گام‌های کلی تحلیل کمانش بر اساس آن مشخص می‌گردند، توسط مرجع [۱] ارائه شده و سپس هر کدام از گام‌های یادشده همراه با تعاریف مودهای نامبرده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

Allen و همکار وی در مرجع [۶] رابطه‌ی تنش فشاری بحرانی کمانش در مود متقارن را بر مبنای روابط سینماتیک حاصل از فرضیات Sander، با کاربرد تئوری ارتوتروپیک و صرفنظر از سفتی خمشی و پیچشی[۲] پوسته و سفتی پیچشی استرینگرها برای پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده توسط استرینگر ارائه نموده‌اند. همچنین مطالعه‌ی پیش‌بینی بار بحرانی کمانش شطرنجی در پوسته‌ای با شرایط فوق و با صرفنظر از سفتی خمشی ورق، توسط Reddy و همکاران در مرجع [۱۳] صورت پذیرفته است.

رابطه‌ی محاسبه‌ی بار ناپایداری کلی یک پوسته‌ی تقویت‌شده توسط ریب و استرینگر تحت نیروی فشاری محوری بر مبنای مطالعه‌ی صورت‌گرفته در مرجع [۸] توسط Smith و همکاران وی ارائه گردیده است. از آنجا که مقادیر تنش‌های ناپایداری کلی محاسبه‌شده بنابر مرجع اخیر بر مبنای تئوری کلاسیک هستند، لذا وی و همکاران او در مرجع [۹] منحنی‌های طراحی عملی‌ای را برای دست‌یابی به ضرایب کاهنده‌ی تجربی[۳] ارائه نموده‌اند که از آنها جهت کاهش مقادیر پیش‌بینی‌های استحکام تئوریک کلاسیک به منظور اهداف طراحی ایمن استفاده می‌شود.

McElman و همکارش در مرجع [۱۵] با استخراج معادلات تعادل و شرایط‌مرزی غیرخطی برای پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده، به مطالعه‌ی آثار استاتیک و دینامیک تقویت خارج از مرکز بر صفحات و پوسته‌های استوانه‌ای پرداخته‌اند. استخراج معادلات توسط تعریف روابط کرنش- جابجایی غیرخطی نوع Donnell برای پوسته صورت گرفته است. با تقویت‌کننده‌ها بعنوان المان‌های تیر برخورد شده و روابط کرنش- جابجایی آنها نیز بصورت غیرخطی در نظر گرفته شده است. معادلات خطی که

[1] Not Smeared
[2] Bending and Twisting Stiffness
[3] Empirical

بر ارتعاشات کوچک یک استوانه‌ی تقویت‌شده بصورت خارج از مرکز حاکمند، نیز بعنوان حالت خاصی از معادلات غیرخطی استخراج شده‌اند.

با کاربرد روش Bifurcation به‌کمک اصول انرژی، رابطه‌ی بار ناپایداری کلی یک پوسته‌ی ارتوتروپیک تقویت‌شده توسط ریب و استرینگر تحت نیروی فشاری محوری بر مبنای مطالعه‌ی صورت‌گرفته توسط Block و همکاران، در مرجع [۱۶] ارائه گردیده است. این تحلیل بر مبنای روابط کرنش- جابجایی از نوع Donnell، با استفاده از تئوری ارتوتروپیک و کاربرد اصل مینیمم انرژی پتانسیل صورت گرفته است.

در مرجع [۱۷] Peterson بر مبنای تست‌های صورت‌گرفته، با توجه به پراکندگی داده‌ها که بطور عمده به‌دلیل نواقص هندسی اندازه‌گیری‌نشده و تنش‌های پسماند پدید می‌آیند، دو روش جهت دست‌یابی به بار فروریزش برای یک طراحی محافظه‌کارانه را ارائه نموده است. همچنین این مرجع یک منحنی که سفتی کاهش‌یافته‌ی[1] پوسته‌ی کمانش‌کرده را برای محاسبه‌ی بارهای کمانش کلی پوسته‌هایی که قبل از وقوع کمانش کلی، کمانش پنل پوسته را تجربه می‌کنند، نیز ارائه می‌نماید.

علیرغم آنکه در مطالعات قبلی تأثیر خروج از مرکز تقویت‌کننده‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است، لکن اختلاف میان نتایج تئوری و تست‌ها بیان‌گر نیاز به تحلیل مسئله با در نظر گرفتن سایر آثار از جمله تغییر شکل‌های پیش از کمانش، تقویت‌کننده‌های مجزّا[2] (سربارنشده)، نواقص اولیه و شرایط مرزی می‌باشد. در مرجع [۱۸] که بنوعی مکمل کار صورت‌گرفته در مرجع [۱۶] می‌باشد، Block تأثیر تقویت‌کننده‌های ریب مجزّا و تغییر شکل‌های پیش از کمانش را بر کمانش استوانه‌های ارتوتروپیک بدون نقصِ تقویت‌شده بصورت خارج از مرکز دارای شرایط تکیه‌گاهی ساده و گیردار مورد مطالعه قرار داده است. نتایج این مرجع نشان می‌دهند که برای تئوری کلاسیک ($w_A = const.$) در نظر گرفتن ریب‌ها بصورت سربارشده یا مجزّا تفاوت بسیار ناچیزی در بار کمانش پدید می آورد.

[1] Reduced Stiffness
[2] Discrete

در مرجع [۱۹] مطالعه‌ای جهت بهینه‌سازی وزن و بار محوری کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شـده با ریب و استرینگر توسط جعفری و همکاران وی صـورت پذیرفته است. مبنای این بهینه‌سازی آنست که پوسته‌ی تقویت‌شده در مقایسه با پوسته‌ی تقویت‌نشده، افزایشی در وزن و کاهشی در بار کمانش نداشته باشد. چهار سطح مقطع مختلف برای تقویت‌کننده‌ها بصورت مستطیلی، C شکل، I شکل و کلاه‌شکل در نظر گرفته شده و وزن پوسته به‌همراه ریب و استرینگرها محاسبه گردیده است. نهایتاً توسط الگوریتم وراثت[1]، بهینه‌سازی وزن کل و بار کمانش صورت پذیرفته است.

مطالعه‌ی کمانش یک پنل استوانه‌ای تحت نیروی فشاری محوری در مرجع [۶] مورد بررسی قرار گرفته است. این مرجع بیان می‌دارد که زاویه‌ی مرکزی پنل و نسبت شعاع به طول آن تعیین‌کننده‌ی مـود کمانش بوده و بر این‌اساس تشریح کامل رفتار کمانشی و روابط دست‌یابی به بارهای بحرانی متناظر، برای گستره‌ی متفاوت مقادیر زاویه‌ی مرکزی و نسبت شعاع به طول پنل را ارائه می‌نماید. Block در مرجع [۴] و همچنین Gerard و همکاران وی در مرجع [۲۰] نیز با در نظر گرفتن ورق بین تقویت‌کننده‌ها (در یک سیستم تقویت‌کننده‌ی Grid)، بصورت پنلی دارای چهار تکیه‌گاه ساده در لبه‌ها که روی دو لبه‌ی مخالف تحت فشار محوری قرار گرفته است، تنش کمانش موضعی آنرا با صرفنظر از انحنای استوانه، مطابق معادله‌ی کمانش یک صفحه‌ی تخت ارائه نموده‌اند. در مرجع [۲۱] مطالعه‌ی کمانش موضعی پوسته توسط Katz صورت پذیرفته و چندین رابطه‌ی تئوری مختلف برای محاسبه‌ی بار کمانش آن ارائه گردیده است. همچنین با مقایسه‌ی نتایج حاصل با داده‌های تست، روابط ارائه‌کننده‌ی بهترین حدود بالایی و پایینی بارهای کمانش معرّفی شده‌اند.

Smith و همکاران او نیز در مرجع [۲۲] معیاری را جهت مطالعه‌ی کمانش پنل خمیده‌ی پوسته‌ی ایزوتروپیک ارائه نموده‌اند که در آن جهت دسـت‌یابی به مقادیر محافظه‌کارانه فرض شده است که لبه‌های بارگذاری‌شده دارای شرایط تکیه‌گاهی ساده هستند و برای لبه‌های طولی هر دوی شرایط تکیه‌گاهی ساده و گیردار کامل را در نظر گرفته‌اند.

[1] Genetic Algorithm

در مرجع [۲۳] تحلیل تنش‌های استرینگر در یک پنل تقویت‌شده که دارای گشودگی مستطیلی شکل بوده و تحت نیروی محوری فشاری قرار دارد، توسط Kuhn و بکمک تئوری Shear-Lag مورد مطالعه قرار گرفته است. در مرجع [۲۴] نیز روشی با عنوان تکنیک بار اختلال برای تحلیل تنش‌های اطراف یک گشودگی در استوانه‌ی مدوّر دارای ساختار تقویت‌شده، توسط McComb توسعه یافته است. این تکنیک در واقع متشکل از اعمال بارهای اختلال بر استوانه‌ی بدون گشودگی می‌باشد. تنش‌های ناشی از این بارهای اختلال به تنش‌های درون استوانه‌ی بدون گشودگی اضافه می‌شوند تا توزیع تنش در استوانه‌ی دارای گشودگی را بدست دهند.

در مرجع [۲۵] McComb و همکارش Low به منظور تسهیل تحلیل تنش استوانه‌های مدوّر تقویت‌شده‌ی دارای گشودگی بنابر تکنیک بار اختلال، ضرایب مربوطه را در جداولی ارائه نموده‌اند. زمانیکه مقادیر دو پارامتر سازه‌ای ساده مشخص باشد، استفاده از این ضرایب امکان محاسبه‌ی جریان‌های برش و بارهای استرینگر در اطراف گشودگی را فراهم می‌آورد.

در ادامه Martin [۲۶] با انجام تست‌هایی روی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده به‌وسیله‌ی ریب و استرینگر دارای یک گشودگی تحت نیروی فشاری محوری به بررسی صحت پیش‌بینی‌های تکنیک بار اختلال پرداخته است. وی همچنین، پس از ارائه‌ی نتایج و بحث بر روی دقت تکنیک یادشده، بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی[1] بدست‌آمده از تست‌ها، رابطه‌ای تجربی را جهت محاسبه‌ی دقیق مقدار بار کل تحمل‌شده توسط پوسته بصورت تنش مستقیم (غشایی) ارائه نموده است.

کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌نشده‌یِ دارای گشودگی بنابر مراجع [۲۷] و [۲۸] که بترتیب توسط Tuda و Almroth صورت پذیرفته، مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعات تأثیر گشودگی‌های بیضی‌شکل و مستطیلی بر بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای نازک دارای دو گشودگی مقابل به قطر تحت نیروی فشاری محوری را بنابر تحقیقات آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که برای یک هندسه‌ی مشخص از پوسته، مساحت گشودگی تعیین‌کننده‌ی رفتار کمانشی آن بوده و شکل گشودگی تأثیر ناچیزی بر بار کمانش سازه خواهد داشت.

[1] Experimental Data