

Handwritten Arabic calligraphy in a stylized, cursive script. The text is arranged in a roughly rectangular shape, with a diagonal line across the top. The characters are dense and interconnected, typical of a specific dialect or a highly decorative style. The overall appearance is that of a personal note or a signature.



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

بررسی تجربی و المان محدود پوسته مخروطی کامپوزیتی
تحت بارگذاری ترکیبی محوری و خمشی

ارائه شده برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

توسط

سجاد شقاقی

استادان راهنما

دکتر مجتبی صدیقی

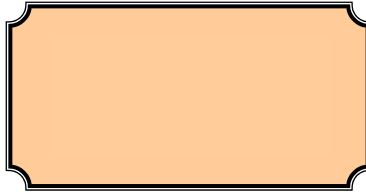
دکتر محمد محمدی اقدم

دانشکده مهندسی مکانیک

شهریور ۱۳۸۷



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)



:

:	:	:	
:	:	:	

تحلیل تجربی و المان محدود پوسته مخروطی جدارنازک کامپوزیتی تحت اثر بارگذاری ترکیبی محوری و خمشی

Title Experimnetal and Finite Element Investigation of Composite Conical Shells Undr Combined Axial and Bending Loads

	:			:	
	:			:	
	:			:	
	:			:	

:	○ ● ○	
---	-------	--

○ ○ ○ ●	
---------	--

● :	○ ● ● ● ●	
-----	-----------	--

● ●	○ ●	
-----	-----	--

--	--

--	--

-	-
---	---

Key word of English

Composite conical shell – buckling – fracture- finite element- combined loading

"
"
()
()
.

چکیده

رفتار پوسته‌های مخروطی ایزوتروپ و ارتوتروپ تحت بارهای فشاری محوری و ترکیبی بطور تجربی، تحلیلی و عددی توسط محققین زیادی مطالعه شده است. ولی برای پوسته‌های مخروطی چندلایه کامپوزیتی مقالات بسیار کمی در دسترس است؛ چراکه این پوسته‌ها که عمدتاً به روش رشته‌پیچی تولید می‌شوند، دارای ضخامت و زوایای الیاف متغیر در راستای طول خود هستند. در تحقیق حاضر، یک بررسی تجربی و المان محدود بر روی رفتار کمانش و واماندگی پوسته‌های مخروطی تولید شده به روش رشته‌پیچی، تحت بار محوری فشاری و نیز بار محوری خارج از مرکز که ترکیبی از بار محوری و ممان خمشی را ایجاد می‌کند، ارائه شده است. نمونه‌های مخروطی تولید شده از جنس کربن/اپوکسی و در سه ضخامت مختلف می‌باشند. خواص کامپوزیت کربن/اپوکسی با استفاده از آزمون‌های تعریف شده توسط استانداردهای ASTM تعیین شدند. نمونه‌ها بطور کامل و با احتساب ضرایب سفتی متغیر مشابه حالت واقعی در نرم‌افزار Abaqus مدل شده و مورد تحلیل استاتیک و کمانش خطی و غیرخطی قرار گرفتند. همچنین اثر پارامترهای مختلف از قبیل ابعاد هندسی، لایه‌چینی، ضخامت، نقص هندسی ناشی از ساخت و غیره روی بار کمانش مورد بررسی قرار گرفت. از تئوری استوانه معادل برای مقایسه بار کمانش حاصل از آزمایش و المان محدود در حالت بار گذاری محوری خالص استفاده شد. نتایج تحلیل المان محدود با نتایج آزمایشات کمانش مقایسه شده و تطابق خوبی بین آنها مشاهده گردید. برخی از نمونه‌ها دچار شکست شدند که برای مقایسه بهتر نتایج این آزمایشات، با استفاده از معیار هشین، مقایسه صورت پذیرفت.

کلید واژه

پوسته مخروط چندلایه کامپوزیتی - کمانش - شکست - المان محدود

فهرست مندرجات

فصل اول- مقدمه و مروری بر کارهای گذشته	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- بررسی مقالات و تحقیقات گذشته	۳
فصل دوم- روابط مورد استفاده برای مخروط کامپوزیتی	۸
۲-۱- محاسبه بار کمانش مخروط کامپوزیت از روی بار کمانش استوانه	۱۰
۲-۲- محاسبه بار کمانش استوانه کامپوزیتی	۱۲
۲-۲-۱- محاسبه بار کمانش استوانه کامپوزیتی تحت بار محوری فشاری	۱۲
۲-۲-۲- محاسبه بار کمانش استوانه کامپوزیتی تحت بار خمشی	۱۷
۲-۲-۳- محاسبه بار کمانش استوانه کامپوزیتی تحت بار ترکیبی محوری و خمشی	۱۸
۲-۳- روابط ساختاری پوسته مخروطی چندلایه	۲۰
۲-۳-۱- موقعیت الیاف روی پوسته مخروطی ناقص مدور رشته پیچی شده	۲۰
۲-۳-۲- ضخامت یک تک لایه	۲۲
۲-۳-۳- تغییر ضرایب سفتی	۲۴
۲-۴- تحلیل ابعادی	۲۶
فصل سوم- بررسی المان محدود مخروط کامپوزیتی با استفاده از Abaqus	۲۹
۳-۱- تحلیل کمانش به کمک المان محدود	۳۱
۳-۱-۱- تحلیل مقدار ویژه خطی کمانش (eigen value)	۳۱
۳-۱-۲- تحلیل غیر خطی (روش Riks)	۳۲
۳-۱-۳- بحث در مزایا و معایب دو روش	۳۴
۳-۲- نوع المان‌های مورد استفاده برای پوسته مخروطی کامپوزیتی	۳۵
۳-۳- همگرایی نتایج تحلیل و تعیین تعداد بهینه المانها	۳۶

- ۳۷-۳-۴- مقایسه نتایج نرم افزار با کارهای محققین پیشین.....
- ۳۸-۳-۴-۱- مقایسه بار و مود کماتش برای کار تجربی انجام شده توسط Tong [۱۵].....
- ۳۹-۳-۴-۲- مقایسه بار بحرانی استوانه کامپوزیتی تحت بار محوری و خمشی (Lou [۱۶]).....
- ۴۰-۳-۵- بررسی پارامترهای موثر در کماتش پوسته مخروطی کامپوزیتی.....
- ۴۳-۳-۵-۱- بررسی پارامتر α
- ۴۴-۳-۵-۲- بررسی پارامتر زاویه الیاف (θ).....
- ۴۵-۳-۵-۳- بررسی پارامتر طول به شعاع میانگین ($\frac{L}{R_{mean}}$).....
- ۴۶-۳-۵-۴- بررسی پارامتر ضخامت (تعداد لایه ها).....
- ۴۷-۳-۵-۵- تفاوت تحلیل با فرض ضرایب سفتی ثابت و اعمال سفتی دقیق.....
- ۵۰- فصل چهارم- تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت کربن / اپوکسی.....
- ۵۲-۴-۱- روش انجام آزمون ها.....
- ۵۳-۴-۱-۱- تست اندازه گیری خواص مکانیکی فشاری کامپوزیت در راستای عمود بر الیاف.....
- ۵۴-۴-۱-۱-۱- ساخت نمونه و نصب کرنش سنج.....
- ۵۵-۴-۱-۱-۲- نصب فیکسچر و بارگذاری.....
- ۵۷-۴-۱-۱-۳- محاسبه خواص.....
- ۵۸-۴-۱-۲- تست اندازه گیری خواص مکانیکی کششی کامپوزیت در راستای عمود بر الیاف.....
- ۵۸-۴-۱-۲-۱- ساخت نمونه و نصب کرنش سنج.....
- ۵۸-۴-۱-۲-۲- نصب فیکسچر و بارگذاری.....
- ۵۹-۴-۱-۲-۳- محاسبه خواص.....
- ۵۹-۴-۱-۳- تست اندازه گیری خواص مکانیکی کششی کامپوزیت در راستای الیاف (NOL).....
- ۶۰-۴-۱-۳-۱- ساخت نمونه و نصب کرنش سنج.....
- ۶۳-۴-۲- نتایج آزمون های کامپوزیت کربن / اپوکسی.....
- ۶۳-۴-۲-۱- مشخصات مواد اولیه.....
- ۶۴-۴-۲-۲- مشخصات نمونه های آزمایش.....
- ۶۵-۴-۲-۳- نتایج حاصل.....

فصل پنجم- آزمایش پوسته مخروطی کامپوزیتی تحت بار محوری و خمشی..... ۶۸

۷۰-۱-۵ ساخت ۷۰

۷۴-۲-۵ مواد مورد استفاده ۷۴

۷۷-۳-۵ مشخصات نمونه‌های تست ۷۷

۸۰-۴-۵ ملزومات آزمایش ۸۰

۸۳-۵-۵ آزمایشات ۸۳

۸۳-۱-۵-۵ آزمایش تحت بارگذاری محوری فشاری ۸۳

۸۳-۱-۱-۵-۵ آزمایش نمونه ۵ (3/1) ۸۳

۹۱-۲-۱-۵-۵ آزمایش نمونه ۲ (2/1) ۹۱

۹۴-۳-۱-۵-۵ آزمایش نمونه ۴ (6/1) ۹۴

۹۸-۴-۱-۵-۵ آزمایش نمونه ۷ (1/2) ۹۸

۱۰۳-۵-۱-۵-۵ آزمایش نمونه ۱۰ (4/2) ۱۰۳

۱۰۷-۶-۱-۵-۵ آزمایش نمونه ۹ (3/2) ۱۰۷

۱۰۹-۷-۱-۵-۵ آزمایش نمونه ۱ از مقیاس بزرگ ۱۰۹

۱۱۱-۲-۵-۵ آزمایش تحت بارگذاری محوری خارج از مرکز ۱۱۱

۱۱۱-۱-۲-۵-۵ آزمایش نمونه ۶ (4/1) ۱۱۱

۱۱۴-۲-۲-۵-۵ آزمایش نمونه ۱ (1/1) ۱۱۴

۱۱۸-۳-۲-۵-۵ آزمایش نمونه ۳ (5/1) ۱۱۸

۱۲۱-۴-۲-۵-۵ آزمایش نمونه ۸ (2/2) ۱۲۱

۱۲۳-۵-۲-۵-۵ آزمایش نمونه ۲ از مقیاس بزرگ ۱۲۳

۱۲۵-۶-۵ مقایسه نتایج آزمایش‌ها و جمع‌بندی ۱۲۵

فصل ششم- مقایسه نتایج و بحث ۱۲۷

۱۲۹-۱-۶ خواص اعمالی به نرم‌افزار برای مواد مورد آزمایش ۱۲۹

۱۳۰-۲-۶ نحوه اعمال بار و شرایط مرزی ۱۳۰

۱۳۱-۳-۶ مقایسه نتایج نرم‌افزار با آزمایشات ۱۳۱

۱۳۱.....	۳-۶-۱- مقایسه بار کمانش برای آزمایشات تحت بار محوری خالص
۱۳۳.....	۳-۶-۱-۱- نمونه 3/1
۱۳۶.....	۳-۶-۱-۲- نمونه 2/1
۱۳۸.....	۳-۶-۱-۳- نمونه 6/1
۱۳۹.....	۳-۶-۲- مقایسه بار کمانش برای آزمایشات تحت بار محوری خارج از مرکز
۱۴۱.....	۳-۶-۱-۲- نمونه 4/1
۱۴۴.....	۳-۶-۲-۲- نمونه 1/1
۱۴۶.....	۳-۶-۲-۳- نمونه 5/1
۱۴۷.....	۳-۶-۳- مقایسه بار و نحوه شکست نمونه‌های ضخیم
۱۴۸.....	۳-۶-۱-۳- معیار هشین
۱۵۰.....	۳-۶-۲- استفاده از معیار هشین و مقایسه با آزمایش‌ها
۱۵۳.....	۳-۶-۴- دلایل وجود خطا بین آزمایش و المان محدود
۱۵۵.....	۴-۶- مقایسه کلی
۱۵۸.....	فصل هفتم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۵۹.....	۷-۱- نتیجه‌گیری
۱۶۱.....	۷-۲- پیشنهادات
۱۶۲.....	فهرست مراجع
۱۶۶.....	پیوست‌ها

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲) مقایسه نتایج حاصل از دو روش برای دو نوع شرط مرزی و زاویه راس و چیدمان متفاوت [۹]..... ۱۱
- جدول ۱-۳) مقایسه نتایج تجربی و تئوری Tong [۱۵] با حل غیر خطی نرم افزار ۳۸
- جدول ۲-۳) مقایسه بار و ممان خمشی بحرانی برای نمونه استوانه‌ای کامپوزیتی مورد بررسی توسط Lou ۳۹
- جدول ۳-۳) مقایسه بار کمانش با اعمال ضرایب سفتی دقیق ۴۸
- جدول ۱-۴) مشخصات لوله‌ها و نمونه‌ها ۶۴
- جدول ۲-۴) مشخصات NOL-ring ها ۶۵
- جدول ۳-۴) نتایج محاسبه σ_{22}^{CU} ۶۵
- جدول ۴-۴) نتایج محاسبه E_{22} از آزمون فشاری ۶۵
- جدول ۵-۴) نتایج محاسبه σ_{22}^{TU} ۶۶
- جدول ۶-۴) نتایج محاسبه E_{22} از آزمون کشش ۶۶
- جدول ۷-۴) نتایج محاسبه σ_{11}^{TU} ۶۶
- جدول ۸-۴) نتایج محاسبه E_{11} از آزمون کشش ۶۷
- جدول ۱-۵) ابعاد هندسی نمونه‌های مخروطی ۷۸
- جدول ۲-۵) ضخامت، زوایای الیاف و وزن نمونه‌های مخروطی ۷۸
- جدول ۳-۵) مقایسه تغییر ضخامت و زاویه الیاف در راستای طول مخروط برای نمونه‌ها و روابط فصل ۲ ۷۹
- جدول ۴-۵) نتایج کلی آزمایشات صورت گرفته روی نمونه‌ها ۱۲۵
- جدول ۱-۶) خواص کامپوزیت کربن-اپوکسی بدست آمده از آزمون‌ها ۱۲۹
- جدول ۲-۶) خواص تصحیح شده برای مدل‌سازی مخروط کامپوزیتی ۱۳۰
- جدول ۳-۶) مقایسه نتایج برای آزمایشات کمانش تحت بار محوری خالص ۱۳۱
- جدول ۴-۶) مقایسه حداکثر کوتاه‌شدگی محوری در لحظه وقوع کمانش برای آزمایشات تحت بار محوری خالص ۱۳۲
- جدول ۵-۶) مقایسه نتایج برای آزمایشات کمانش تحت بار محوری خارج از مرکز ۱۴۰
- جدول ۶-۶) مقایسه حداکثر کوتاه‌شدگی محوری (در نیمه تحت فشار) در لحظه وقوع کمانش برای آزمایشات تحت بار محوری خارج از مرکز ۱۴۱
- جدول ۷-۶) مقایسه بار شکست و کمانش نمونه‌های ضخیم مورد آزمایش ۱۵۱

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲) نمای یک مخروط و پارامترهای تعریف کننده آن ۱۰
- شکل ۲-۲) جهت مولفه های جابجایی [۱۶] ۱۳
- شکل ۳-۲) هندسه و موقعیت یک رشته روی مخروط [۳] ۲۱
- شکل ۴-۲) تغییرات (a) انحنا الیاف (b) فاصله بین الیاف (c) ضخامت تک لایه، برحسب مختصات طولی مخروط رشته پیچی شده با زوایای راس متفاوت [۳] ۲۳
- شکل ۵-۲) تغییر نسبت های ضخامت برحسب زاویه راس [۳] ۲۳
- شکل ۶-۲) تغییر ضرایب سفتی برای پوسته مخروطی رشته پیچی شده [۳] ۲۵
- شکل ۷-۲) تغییر ضرایب پوسته مخروطی رشته پیچی شده با زوایای راس مختلف [۳] ۲۶
- شکل ۱-۳) روش Arc length (راست) در مقایسه با روش معمولی (چپ) [۲۷] ۳۳
- شکل ۲-۳) نمودار بار کمانش برحسب تعداد المان ها برای یکی از نمونه های مخروطی چندلایه کامپوزیتی ۳۷
- شکل ۳-۳) مود کمانش حاصل از تحلیل غیرخطی نرم افزار (b) شکل پس از کمانش رخ داده در کار تجربی Tong [۱۵] ۳۸
- شکل ۴-۳) نمای یک مخروط و پارامترهای تعریف کننده آن ۴۰
- شکل ۵-۳) اثر پارامتر α روی بار محوری کمانش مخروط کامپوزیتی نمونه ۴۴
- شکل ۶-۳) اثر پارامتر α روی ممان خمشی بحرانی مخروط کامپوزیتی نمونه ۴۴
- شکل ۷-۳) تاثیر زاویه لایه (θ) نسبت به محور مخروط روی بار محوری بحرانی ۴۵
- شکل ۸-۳) اثر نسبت طول به شعاع میانگین مخروط روی بار محوری بحرانی ۴۶
- شکل ۹-۳) منحنی بار محوری بحرانی برحسب تعداد لایه های ± 40 ۴۷
- شکل ۱-۴) لوله اولیه مورد استفاده در آزمونهای برش، کشش و فشار (عمود بر راستای الیاف) و یک نمونه بریده شده از آن ۵۴
- شکل ۲-۴) فیکسچر تست فشار در جهت عمود بر الیاف ۵۶
- شکل ۳-۴) فیکسچر تست کشش در جهت عمود بر الیاف ۵۸
- شکل ۴-۴) فیکسچر و نمونه NOL-Ring پاره شده مورد استفاده در آزمون کشش در راستای الیاف ۶۱
- شکل ۱-۵) شماتیک مندرل پیچش ۷۱

- شکل ۲-۵) شماتیک دو بعدی مخروط ۷۷
- شکل ۳-۵) شماتیک اعمال بار برای (a) تست بار محوری فشاری (b) تست ترکیب بار محوری و خمشی ۸۱
- شکل ۴-۵) دستگاه آزمایش و سایر ملزومات تست ۸۳
- شکل ۵-۵) الف) محل استقرار LVDT ها روی تختال بالایی ب) نمایش مولفه های کرنش سنج
 ج) محل استقرار LVDT ها روی ۱/۳ بالایی د) محل استقرار LVDT ها روی ۱/۳ پائینی
- و) محل استقرار کرنش سنجها روی سطح داخلی در ارتفاع میانی ۸۴
- شکل ۶-۵) منحنی نیرو برحسب جابجایی لبه بالایی مخروط ۸۴
- شکل ۷-۵) منحنی نیرو- جابجایی میانگین مخروط در راستای اعمال بار محوری ۸۵
- شکل ۸-۵) منحنی جابجایی محوری- زمان برای نمونه 3/1 ۸۶
- شکل ۹-۵) تغییرات نیرو برحسب جابجایی برای LVDT های قرار گرفته روی سطح مخروط
 در ارتفاع ۱/۳ بالایی ۸۶
- شکل ۱۰-۵) تغییرات نیرو برحسب جابجایی برای LVDT های قرار گرفته روی سطح مخروط
 در ارتفاع ۱/۳ پائینی ۸۷
- شکل ۱۱-۵) نمودار نیرو برحسب زمان برای نمونه ۵ ۸۸
- شکل ۱۲-۵) تغییر شکل نمونه 3/1 پس از کمانش ۸۹
- شکل ۱۳-۵) تغییرات نیرو برحسب زمان در مرحله دوم بارگذاری در مقایسه با مرحله اول ۹۰
- شکل ۱۴-۵) افت بار کمانش در سه مرحله بارگذاری ۹۰
- شکل ۱۵-۵) الف- محل استقرار LVDT ها روی تختال بالایی ب- نمایش مولفه های کرنش سنج
 د- محل استقرار LVDT ها روی ۱/۳ پائینی به فاصله ۴۵ درجه از هم
- و- محل استقرار کرنش سنجها روی سطح داخلی در ارتفاع میانی ۹۱
- شکل ۱۶-۵) تغییرات نیرو برحسب جابجایی تختال بالایی مخروط برای نمونه 2/1 ۹۲
- شکل ۱۷-۵) میانگین تغییرات نیرو برحسب جابجایی تختال بالایی مخروط برای نمونه 2/1 ۹۲
- شکل ۱۸-۵) تغییرات نیرو برحسب زمان برای نمونه 2/1 ۹۳
- شکل ۱۹-۵) تغییرات نیرو برحسب جابجایی سطح مخروط از LVDT های ۱، ۳، ۱۰ و ۱۲ برای نمونه 2/1 ۹۳
- شکل ۲۰-۵) نحوه تغییر شکل نمونه 2/1 ۹۴
- شکل ۲۱-۵) a- تغییرات نیرو برحسب جابجایی تختال بالایی ۹۵

- ۹۵.....b- میانگین تغییرات نیرو برحسب جابجایی تختال بالایی نمونه 6/1.....
- شکل ۵-۲۲) a- تغییرات نیرو برحسب زمان برای نمونه 6/1 b- تغییرات جابجایی محوری برحسب زمان برای نمونه 6/1.....
- ۹۶.....
- شکل ۵-۲۳) تغییرات نیرو برحسب جابجایی جانبی سطح مخروط برای نمونه 6/1.....
- شکل ۵-۲۴) نمودار نیرو برحسب زمان برای نمونه 1/2.....
- شکل ۵-۲۵) تغییرات نیرو برحسب جابجایی محوری نمونه 1/2.....
- شکل ۵-۲۶) تغییرات جابجایی محوری برحسب زمان برای نمونه 1/2.....
- شکل ۵-۲۷) تغییرات نیرو برحسب جابجایی جانبی سطح مخروط برای نمونه 1/2.....
- شکل ۵-۲۸) نمونه 1/2 پس از شکست.....
- شکل ۵-۲۹) الف) محل استقرار LVDT ها روی تختال بالایی ب) نمایش مولفه های کرنش سنج
د) محل استقرار LVDT ها روی ۱/۳ پائینی در هر ۶۰ درجه
- و) محل استقرار کرنش سنجها روی سطح داخلی در ارتفاع میانی.....
- شکل ۵-۳۰) نمودار نیرو برحسب زمان برای نمونه 4/2.....
- شکل ۵-۳۱) a) نمودار جابجایی برحسب زمان LVDT8 b) نمودار نیرو برحسب جابجایی LVDT8.....
- c) نمودار جابجایی برحسب زمان LVDT7 d) نمودار نیرو برحسب جابجایی LVDT7.....
- شکل ۵-۳۲) نمودار جابجایی جانبی - زمان برای نمونه 4/2.....
- شکل ۵-۳۳) شکست نمونه 4/2.....
- شکل ۵-۳۴) نمودار نیرو برحسب زمان برای نمونه 3/2.....
- شکل ۵-۳۵) شکست نمونه 3/2.....
- شکل ۵-۳۶) a- نمودار میانگین نیرو برحسب جابجایی محوری برای نمونه ۱ از مقیاس بزرگ
b- نمودار میانگین جابجایی محوری برحسب زمان برای نمونه ۱ از مقیاس بزرگ.....
- شکل ۵-۳۷) نمودار نیرو برحسب زمان برای نمونه ۱ از مقیاس بزرگ.....
- شکل ۵-۳۸) تغییرات نیرو برحسب جابجایی جانبی سطح مخروط برای نمونه ۱ از مقیاس بزرگ.....
- شکل ۵-۳۹) تغییرات نیرو برحسب زمان برای نمونه 4/1.....
- شکل ۵-۴۰) نمودار نیرو - جابجایی محوری برای LVDT های روی تختال بالایی نمونه 4/1.....
- شکل ۵-۴۱) نمودار جابجایی محوری برحسب زمان برای LVDT های روی تختال بالایی نمونه 4/1.....

- شکل ۵-۴۲) تغییرات نیرو برحسب جابجایی جانبی برای $1/3$ پایینی نمونه $4/1$ ۱۱۳
- شکل ۵-۴۳) نمایی از مود کمانش نمونه $4/1$ ۱۱۴
- شکل ۵-۴۴) نمودار نیرو - زمان برای نمونه $1/1$ ۱۱۵
- شکل ۵-۴۵) نمودار نیرو - جابجایی محوری برای نمونه $1/1$ ۱۱۵
- شکل ۵-۴۶) نمودار نیرو - جابجایی جانبی برای $1/3$ پایینی نمونه $1/1$ ۱۱۶
- شکل ۵-۴۷) نمودار نیرو - جابجایی جانبی برای $1/3$ پایینی نمونه $1/1$ ۱۱۶
- شکل ۵-۴۸) نمایی از نمونه $1/1$ پس از کمانش..... ۱۱۷
- شکل ۵-۴۹) نمودار نیرو - زمان در مرحله دوم آزمایش نمونه $1/1$ ۱۱۸
- شکل ۵-۵۰) نمودار میانگین نیرو - جابجایی محوری برای LVDT های سمت اعمال بار در مرحله دوم آزمایش
نمونه $1/1$ ۱۱۸
- شکل ۵-۵۱) نمودار نیرو - زمان برای نمونه $5/1$ ۱۱۹
- شکل ۵-۵۲) نمودار نیرو - جابجایی محوری برای LVDT های روی تختال بالایی نمونه $5/1$ ۱۱۹
- شکل ۵-۵۳) تغییر شکل نمونه $5/1$ پس از کمانش..... ۱۲۰
- شکل ۵-۵۴) نمودار نیرو - زمان برای نمونه $2/2$ ۱۲۱
- شکل ۵-۵۵) نحوه شکست نمونه $2/2$ ۱۲۲
- شکل ۵-۵۶) نمودار نیرو برحسب زمان برای نمونه ۲ از مقیاس بزرگ..... ۱۲۳
- شکل ۵-۵۷) منحنی نیرو برحسب جابجایی محوری برای نمونه ۲ از مقیاس بزرگ..... ۱۲۴
- شکل ۵-۵۸) منحنی میانگین جابجایی محوری برحسب زمان برای نمونه ۲ از مقیاس بزرگ..... ۱۲۴
- شکل ۶-۱) همگرایی نتایج حل کمانش خطی برای نمونه $3/1$ ۱۳۳
- شکل ۶-۲) تاثیر شدت نقص روی بار کمانش نمونه $3/1$ ۱۳۴
- شکل ۶-۳) نحوه تغییر شکل پس از کمانش (a) Abaqus (b) آزمایش..... ۱۳۵
- شکل ۶-۴) نمودار مقایسه ای نیرو برحسب جابجایی محوری برای نمونه $3/1$ ۱۳۶
- شکل ۶-۵) همگرایی نتایج حل کمانش خطی برای نمونه $2/1$ ۱۳۶
- شکل ۶-۶) تاثیر شدت نقص روی بار کمانش نمونه $2/1$ ۱۳۷
- شکل ۶-۷) مقایسه منحنی نیرو برحسب جابجایی محوری نمونه $2/1$ ۱۳۷
- شکل ۶-۸) همگرایی نتایج حل کمانش خطی برای نمونه $6/1$ ۱۳۸

- شکل ۶-۹) تاثیر شدت نقص روی بار کمانش نمونه 6/1..... ۱۳۸
- شکل ۶-۱۰) مقایسه منحنی نیرو برحسب جابجایی محوری نمونه 6/1..... ۱۳۹
- شکل ۶-۱۱) همگرایی نتایج حل کمانش خطی برای نمونه 4/1..... ۱۴۱
- شکل ۶-۱۲) تاثیر شدت نقص روی بار کمانش نمونه 4/1..... ۱۴۲
- شکل ۶-۱۳) مقایسه منحنی نیرو برحسب جابجایی محوری در نیمه تحت فشار، برای نمونه 4/1..... ۱۴۳
- شکل ۶-۱۴) نحوه تغییر شکل پس از کمانش (a) Abaqus (b) آزمایش ۱۴۴
- شکل ۶-۱۵) همگرایی نتایج حل کمانش خطی برای نمونه 1/1..... ۱۴۵
- شکل ۶-۱۶) تاثیر شدت نقص روی بار کمانش نمونه 1/1..... ۱۴۵
- شکل ۶-۱۷) همگرایی نتایج حل کمانش خطی برای نمونه 5/1..... ۱۴۶
- شکل ۶-۱۸) تاثیر شدت نقص روی بار کمانش نمونه 5/1..... ۱۴۶
- شکل ۶-۱۹) مقایسه منحنی نیرو برحسب جابجایی محوری در نیمه تحت فشار، برای نمونه 5/1..... ۱۴۷
- شکل ۶-۲۰) محل شکست نمونه‌های آزمایش در مقایسه با محل پیش‌بینی شده شکست فشاری الیاف
از Abaqus..... ۱۵۳
- شکل ۶-۲۱) بار بحرانی کمانش برحسب ضخامت میانگین نمونه‌های با ابعاد
 $\Phi_1 = 214.05, \Phi_2 = 308.9, h = 154.25$ ۱۵۵
- تحت بار محوری خالص ۱۵۵
- شکل ۶-۲۲) بار بحرانی کمانش برحسب ضخامت میانگین نمونه‌های با ابعاد
 $\Phi_1 = 214.05, \Phi_2 = 308.9, h = 154.25mm$ ۱۵۶
- تحت بار محوری خارج از مرکز به میزان 46 mm ۱۵۶
- شکل ۶-۲۳) تاثیر درصد خروج از مرکز بار برای نمونه نازک با ضخامت میانگین 1.6 mm ۱۵۷

فهرست علائم

ρ_c	نسبت بار
$K(\alpha)$	ضریب تصحیح
ε	تانسور کرنش
k	تانسور انحنا
δU^T	تابع وزنی در دستگاه معادله
$[L]$	ماتریس ضرایب جابجایی در حالت بار محوری
$[B]$	ماتریس ضرایب جابجایی در حالت بار خمشی
R_a, R_b	دو متغیر تعریف شده برای ترکیب بارگذاری
σ_{22}^{cu}	تنش فشاری نهایی در راستای عمود بر الیاف
σ_{22}^{tu}	تنش کششی نهایی در راستای عمود بر الیاف
σ_{11}^{cu}	تنش فشاری نهایی در راستای الیاف
σ_{11}^{tu}	تنش کششی نهایی در راستای الیاف
E_{11}	مدول الاستیسیته در راستای الیاف
E_{22}	مدول الاستیسیته در راستای عمود بر الیاف

فصل اول

مقدمه

و

مروری بر کارهای گذشته

۱-۱- مقدمه

استفاده از سازه‌های مرکب^۱ به علت نسبت سفتی به وزن بالا در مقابل سازه‌های فلزی مشابه، در بسیاری از موارد به خصوص در جاهایی که کاهش وزن سازه مهم باشد، مناسب است. یکی از پرکاربردترین انواع این سازه‌ها، پوسته‌های چندلایه کامپوزیتی^۲ هستند؛ که می‌توانند به شکل استوانه، مخروط و اشکال دیگر باشند. استفاده از این سازه‌ها به دلیل سبکی، جهت‌گیری خواص مکانیکی، مقاومت بالا و ساخت نسبتاً آسان در بسیاری از صنایع از جمله صنعت هوافضا رایج است.

در پروژه حاضر پوسته‌های مخروطی چندلایه کامپوزیتی، تحت بارگذاری محوری و نیز بارگذاری ترکیبی محوری و خمشی بررسی شده‌اند. این پوسته‌ها از انواع کامپوزیت‌های الیافی بوده و متشکل از الیاف و رزین هستند و جزء مواد غیرایزوتروپ^۳ محسوب می‌شوند. بهترین روش تولید پوسته‌های دورانی که پوسته مخروطی یکی از مهمترین آنهاست، رشته‌پیچی^۴ است. برخلاف پوسته‌های استوانه‌ای تولید شده به این روش، و نیز پوسته‌های مخروطی ایزوتروپ، پوسته‌های مخروطی تولیدشده به روش رشته‌پیچی دارای ضخامت و زوایای الیاف متغیر در راستای طولی مخروط هستند. این عدم یکسانی ضخامت و زوایای الیاف در قسمت‌های مختلف مخروط، منجر به ضرایب سفتی متغیر در پوسته می‌شوند؛ چراکه ضرایب سفتی در کامپوزیتها تابعی از این کمیتها هستند. این امر تحلیل دقیق این پوسته‌ها را بسیار مشکل می‌کند. در کار حاضر این تغییرات به کمک المان محدود لحاظ شده‌اند.

از طرفی با توجه به هزینه‌بر بودن ساخت نمونه‌های بزرگ، یکی از راه‌های مناسب برای تحلیل صحیح این نمونه‌ها، ساخت نمونه‌های کوچکتر و تعمیم نتایج تست آنها به نمونه‌های بزرگ مورد

1 . composite

2 . laminated composite shells

3 . anisotropic

4 . filament winding