

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
دانشکده مهندسی مکانیک

جلسه دفاعیه پروژه کارشناسی ارشد  
گرایش طراحی کاربردی

عنوان:

# ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده

استاد راهنما:

دکتر جعفری

اساتید ممتحن:

دکتر قاجار ، دکتر مهدیقلی

ارائه دهنده:

مهدی پوررفعتی

زمان:

دوشنبه ۸۱/۱۰/۲۳

ساعت ۱/۵ بعد از ظهر

در ابتدا لازم است از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر علی اصغر جعفری که در طول انجام این پروژه با راهنمایی‌های مفید خود اسباب انجام این تحقیق را فراهم نمودند تقدیر و تشکر نمایم. همچنین از کلیه دوستان عزیزم (به خصوص آقایان داور و تیز فهم) که در مدت انجام این پروژه، با ارائه راهکارهای مناسب باعث پیشرفت کارم شدند، نیز تشکر و قدر دانی می‌کنم.

تقديم به:

پدر و مادر عزيزم

## چکیده:

در این پروژه ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا به منظور آشنایی با بسیاری از رفتارهای ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای، ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای ساده مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرحله ابتدا تئوری غشا و سپس تئوری خمش بررسی شده است. در بررسی ارتعاشات پوسته به کمک تئوری غشا علاوه بر شناساندن انواع مودهای ارتعاشی ممکن برای پوسته استوانه‌ای، فرکانس‌های ظاهر شده در مودهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در بررسی ارتعاشات پوسته به کمک تئوری خمش ضمن نشان دادن کاستی‌های تئوری غشا، رفتار ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای با دقت بالاتری مورد بررسی قرار گرفته است.

در مرحله بعدی گزارش با توجه به اینکه استوانه‌های تقویت‌شده با تعداد تقویت‌کننده زیاد را می‌توان با پوسته معادل از جنس ارتوتروپیک تقریب زد ارتعاشات این نوع استوانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه به بررسی یکی از روشهای بدست آوردن معادل ارتوتروپیک برای پوسته تقویت‌شده پرداخته شده است. در این مرحله نتایج بدست آمده برای یک نمونه خاص با نتایج بدست آمده برای معادل ارتوتروپیک آن مقایسه شده است.

در ادامه گزارش روش حل مسأله با تأثیر دادن مستقیم اثر تقویت‌کننده‌ها روی نیروها و ممانهای گسترده ایجاد شده روی لبه‌های المان پوسته استوانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرحله در حقیقت اثر تقویت‌کننده‌ها روی سطح پوسته متوسط‌گیری شده است. بر اساس نتایج بدست آمده در این مرحله یک روش برای بدست آوردن خواص پوسته ارتوتروپیک معادل پوسته تقویت‌شده معرفی شده است.

در ادامه به بررسی ارتعاشات اجباری پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده پرداخته شده است. در این مرحله ارتعاشات اجباری پوسته ساده و پوسته تقویت‌شده برای حالت‌های مختلف تقویت پوسته و بارگذاریهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

در نهایت روی نتایج بدست آمده بحث شده و در مورد کارهایی که در ادامه این کار می‌توان انجام داد پیشنهاداتی داده شده است.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۳	فصل دوم: تئوری غشا در تحلیل پوسته‌های استوانه‌ای
۳	۱-۲- مقدمه
۳	۲-۲- معادلات تعادل
۵	۳-۲- معادلات حرکت
۶	۴-۲- روش انرژی
۷	۵-۲- حل معادلات حرکت
۹	۶-۲- بررسی نتایج
۱۲	فصل سوم: تئوری تغییر شکل کلی پوسته‌های استوانه‌ای
۱۲	۱-۳- مقدمه
۱۲	۲-۳- معادلات تعادل
۱۴	۳-۳- معادلات حرکت
۱۷	۴-۳- شرایط مرزی
۱۹	۵-۳- حل معادلات حرکت
۱۹	۶-۳- بررسی نتایج
۲۳	فصل چهارم: پوسته‌های استوانه‌ای ارتوتروپیک
۲۳	۱-۴- مقدمه
۲۳	۲-۴- روابط تنش- کرنش
۲۴	۳-۴- نیروها و ممانهای گسترده
۲۵	۴-۴- معادلات حرکت
۲۶	۵-۴- حل معادلات حرکت
۲۸	۶-۴- بررسی نتایج
۳۳	فصل پنجم: پوسته ارتوتروپیک معادل پوسته تقویت شده
۳۳	۱-۵- مقدمه

۳۳	۲-۵- معادلات حرکت پوسته استوانه‌ای ارتوتروپیک بر اساس ثوابت سختی توسعه یافته و ثوابت سختی خمشی
۳۶	۳-۵- بدست آوردن ثوابت سختی توسعه یافته و ثوابت سختی خمشی
۳۹	۴-۵- بررسی نتایج
۴۴	فصل ششم: متوسط‌گیری اثر تقویت‌کننده‌ها روی پوسته
۴۴	۱-۶- مقدمه
۴۴	۲-۶- نیروها و ممانهای ایجاد شده روی لبه‌های پوسته استوانه‌ای تقویت‌شده
۴۹	۳-۶- بدست آوردن معادلات حرکت
۵۱	۴-۶- حل معادلات حرکت
۵۳	۵-۶- بررسی نتایج
۵۸	۶-۶- بررسی اثر خارج از مرکزی و ابعاد تقویت‌کننده‌ها
۵۸	۱-۶-۶- اثر خارج از مرکزی تقویت‌کننده‌ها
۶۱	۲-۶-۶- اثر ابعاد تقویت‌کننده‌ها
۶۳	۷-۶- بررسی روش ارتوتروپیک معادل
۶۳	۱-۷-۶- ضرایب سختی توسعه یافته
۶۴	۲-۷-۶- نتایج
۶۶	۸-۶- نحوه محاسبه نتایج
۶۶	۱-۸-۶- برنامه کامپیوتری
۶۸	۲-۸-۶- نرم‌افزار ANSYS
۷۱	فصل هفتم: ارتعاشات اجباری
۷۱	۱-۷- مقدمه
۷۲	۲-۷- بارگذاری شعاعی
۷۲	۱-۲-۷- استوانه ساده
۷۶	۲-۲-۷- استوانه تقویت شده با استرینگر و رینگ
۷۹	۳-۲-۷- استوانه تقویت شده با استرینگر
۸۲	۴-۲-۷- استوانه تقویت شده با رینگ
۸۵	۳-۷- بارگذاری محوری

۸۵	۱-۳-۷- استوانه ساده
۸۹	۲-۳-۷- استوانه تقویت شده با استرینگر و رینگ
۹۲	۳-۳-۷- استوانه تقویت شده با استرینگر
۹۵	۴-۳-۷- استوانه تقویت شده با رینگ
۹۸	۴-۷- بررسی نتایج
۱۰۰	فصل هشتم: جمع بندی و پیشنهادات
۱۰۰	۱-۸- بحث روی نتایج
۱۰۲	۲-۸- پیشنهادات
۱۰۴	منابع

## فهرست اشکال

شکل	صفحه
شکل (۱-۲): نیروهای گسترده وارد شده روی لبه‌های یک المان پوسته استوانه‌ای	۳
شکل (۲-۲): بعضی از مودهای طولی و محیطی پوسته‌های استوانه‌ای	۱۰
شکل (۳-۲): بعضی از مودهای متقارن و نامتقارن محوری پوسته‌های استوانه‌ای	۱۰
شکل (۴-۲): نمودار تغییرات پارامتر فرکانسی بر حسب $\lambda$	۱۱
شکل (۱-۳): نیروها و ممانهای گسترده وارد شده روی لبه‌های یک المان از پوسته استوانه‌ای	۱۳
شکل (۲-۳): تاثیر ضخامت پوسته بر روی ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای	۱۹
شکل (۳-۳): تاثیر نسبت $\frac{h}{R}$ و $\lambda$ روی فرکانسهای شعاعی برای $n=2,3,4,5$	۲۰
شکل (۴-۳): المان Shell-41	۲۲
شکل (۱-۴): تغییرات پارامتر فرکانسی بر حسب $\frac{\lambda}{\pi}$ (تقویت محیطی)	۲۹
شکل (۲-۴): تغییرات پارامتر فرکانسی بر حسب $\frac{\lambda}{\pi}$ (تقویت طولی)	۲۹
شکل (۳-۴): تغییرات کمترین پارامتر فرکانسی بر حسب $\frac{\lambda}{\pi}$ (تقویت محیطی)	۳۱
شکل (۴-۴): تغییرات کمترین پارامتر فرکانسی بر حسب $\frac{\lambda}{\pi}$ (تقویت طولی)	۳۱
شکل (۵-۴): مقایسه فرکانسهای تیر مانند پوسته ارتوتروپیک	۳۲
شکل (۱-۵): پوسته استوانه‌ای تقویت شده	۳۶
شکل (۲-۵): مقطع تکرار شونده در استوانه تقویت شده	۳۷
شکل (۳-۵): پارامترهای فرکانسی متقارن پوسته‌های تقویت شده	۴۱
شکل (۴-۵): کمترین پارامترهای فرکانسی پوسته‌های تقویت شده	۴۱
شکل (۱-۶): تقویت‌کننده‌ها بر روی مقطع محیطی و طولی یک استوانه تقویت شده	۴۴
شکل (۲-۶): تقویت‌کننده‌ها و پارامترهای مربوط به آنها	۴۵
شکل (۳-۶): نمودار تغییرات پارامتر فرکانسی بر حسب $\frac{\lambda}{\pi}$	۵۴
شکل (۴-۶): نمودار تغییرات فرکانس طبیعی بر حسب $\frac{\lambda}{\pi}$	۵۵
شکل (۵-۶): نمودار تغییرات فرکانس طبیعی پوسته تقویت شده با استرینگر	۵۹
شکل (۶-۶): نمودار تغییرات فرکانس طبیعی پوسته تقویت شده با رینگ	۵۹



- شکل (۶-۷): نمودار تغییرات فرکانس طبیعی پوسته تقویت شده با استرینگر و رینگ ۶۰
- شکل (۶-۸): نمودار تغییرات فرکانس طبیعی پوسته تقویت شده با استرینگر ۶۱
- شکل (۶-۹): نمودار تغییرات فرکانس طبیعی پوسته تقویت شده با رینگ ۶۲
- شکل (۶-۱۰): نمودار تغییرات فرکانس طبیعی پوسته تقویت شده با استرینگر و رینگ ۶۳
- شکل (۶-۱۱): نمودار نتایج حاصل از روشهای مختلف به ازای شکل مودهای مختلف ۶۶
- شکل (۶-۱۲): مشخصات المان **Shell-93** ۶۸
- شکل (۶-۱۳): مشخصات المان **Beam-44** ۶۹
- شکل (۶-۱۴): حالت‌های مختلف تقویت پوسته مدل شده در نرم افزار **ANSYS** ۷۰
- شکل (۷-۱): ارتعاشات ایجاد شده در اثر تحریک هارمونیک ۷۱
- شکل (۷-۲): بارگذاری شعاعی پوسته استوانه‌ای ۷۳
- شکل (۷-۳): نمودار فرکانسی پوسته ساده در اثر بارگذاری شعاعی ۷۴
- شکل (۷-۴): کانتور UX پوسته ساده در تحلیل استاتیکی تحت بار شعاعی ۷۴
- شکل (۷-۵): کانتور UX پوسته ساده در بارگذاری شعاعی با فرکانس ۱۱۱۲HZ ۷۵
- شکل (۷-۶): کانتور UX پوسته ساده در بارگذاری شعاعی با فرکانس ۳۰۷۹HZ ۷۵
- شکل (۷-۷): نمودار فرکانسی پوسته تقویت شده با استرینگر و رینگ تحت بار شعاعی ۷۷
- شکل (۷-۸): کانتور UX پوسته تقویت شده با استرینگر و رینگ در تحلیل استاتیکی تحت بار شعاعی ۷۷
- شکل (۷-۹): کانتور UX پوسته تقویت شده با استرینگر و رینگ تحت بار شعاعی با فرکانس ۹۴۰HZ ۷۸
- شکل (۷-۱۰): کانتور UX پوسته تقویت شده با استرینگر و رینگ تحت بار شعاعی با فرکانس ۲۸۹۷HZ ۷۸
- شکل (۷-۱۱): نمودار فرکانسی پوسته تقویت شده با استرینگر تحت بار شعاعی ۸۰
- شکل (۷-۱۲): کانتور UX پوسته تقویت شده با استرینگر در تحلیل استاتیکی تحت بار شعاعی ۸۰
- شکل (۷-۱۳): کانتور UX پوسته تقویت شده با استرینگر تحت بار شعاعی با فرکانس ۹۹۵HZ ۸۱
- شکل (۷-۱۴): کانتور UX پوسته تقویت شده با استرینگر تحت بار شعاعی با فرکانس ۲۹۳۱HZ ۸۱
- شکل (۷-۱۵): نمودار فرکانسی پوسته تقویت شده با رینگ تحت بار شعاعی ۸۳
- شکل (۷-۱۶): کانتور UX پوسته تقویت شده با رینگ در تحلیل استاتیکی تحت بار شعاعی ۸۳
- شکل (۷-۱۷): کانتور UX پوسته تقویت شده با رینگ تحت بار شعاعی با فرکانس ۱۰۲۷HZ ۸۴
- شکل (۷-۱۸): کانتور UX پوسته تقویت شده با رینگ تحت بار شعاعی با فرکانس ۲۸۶۲HZ ۸۴
- شکل (۷-۱۹): بارگذاری طولی پوسته استوانه‌ای ۸۶
- شکل (۷-۲۰): نمودار فرکانسی پوسته ساده در اثر بار محوری ۶۰۰۰N ۸۶
- شکل (۷-۲۱): کانتور UZ پوسته ساده در تحلیل استاتیکی تحت بار محوری ۶۰۰۰N ۸۷

- ۸۷ شکل (۷-۲۲): کانتور UZ پوسته ساده تحت بار محوری  $6000N$  با فرکانس  $1112\text{HZ}$
- ۸۸ شکل (۷-۲۳): کانتور UZ پوسته ساده تحت بار محوری  $6000N$  و بار جانبی  $100N$  با فرکانس  $1112\text{HZ}$
- ۸۸ شکل (۷-۲۴): کانتور UZ پوسته ساده تحت بار محوری  $6000N$  با فرکانس  $3079\text{HZ}$
- ۸۹ شکل (۷-۲۵): نمودار فرکانسی پوسته تقویت شده با استرینگر و رینگ در اثر بار محوری  $6000N$
- ۹۰ شکل (۷-۲۶): کانتور UZ پوسته تقویت شده با استرینگر و رینگ در تحلیل استاتیکی تحت بار محوری  $6000N$
- ۹۰ شکل (۷-۲۷): کانتور UZ پوسته تقویت شده با استرینگر و رینگ تحت بار محوری  $6000N$  با فرکانس  $940\text{HZ}$
- ۹۱ شکل (۷-۲۸): کانتور UZ پوسته تقویت شده با استرینگر و رینگ تحت بار محوری  $6000N$  و بار جانبی  $100N$  با فرکانس  $940\text{HZ}$
- ۹۱ شکل (۷-۲۹): کانتور UZ پوسته تقویت شده با استرینگر و رینگ تحت بار محوری  $6000N$  با فرکانس  $2897\text{HZ}$
- ۹۲ شکل (۷-۳۰): نمودار فرکانسی پوسته تقویت شده با استرینگر تحت بار محوری  $6000N$
- ۹۳ شکل (۷-۳۱): کانتور UZ پوسته تقویت شده با استرینگر در تحلیل استاتیکی تحت بار محوری  $6000N$
- ۹۳ شکل (۷-۳۲): کانتور UZ پوسته تقویت شده با استرینگر تحت بار محوری  $6000N$  با فرکانس  $995\text{HZ}$
- ۹۴ شکل (۷-۳۳): کانتور UZ پوسته تقویت شده با استرینگر تحت بار محوری  $6000N$  و بار جانبی  $100N$  با فرکانس  $995\text{HZ}$
- ۹۴ شکل (۷-۳۴): کانتور UZ پوسته تقویت شده با استرینگر تحت بار محوری  $6000N$  با فرکانس  $2931\text{HZ}$
- ۹۵ شکل (۷-۳۵): نمودار فرکانسی پوسته تقویت شده با رینگ تحت بار محوری  $6000N$
- ۹۶ شکل (۷-۳۶): کانتور UZ پوسته تقویت شده با رینگ در تحلیل استاتیکی تحت بار محوری  $6000N$
- ۹۶ شکل (۷-۳۷): کانتور UZ پوسته تقویت شده با رینگ تحت بار محوری  $6000N$  با فرکانس  $1027\text{HZ}$
- ۹۷ شکل (۷-۳۸): کانتور UZ پوسته تقویت شده با رینگ تحت بار محوری  $6000N$  و بار جانبی  $100N$  با فرکانس  $1027\text{HZ}$
- ۹۷ شکل (۷-۳۹): کانتور UZ پوسته تقویت شده با رینگ تحت بار محوری  $6000N$  با فرکانس  $2862\text{HZ}$
- ۱۰۱ شکل (۸-۱): شکل مودهای مختلف مربوط به ( $n=10$  و  $m=1$ )
- ۱۰۲ شکل (۸-۲): منحنی‌های جابجایی نرمالیزه شده مربوط به ( $n=10$  و  $m=1$ )

## فهرست جداول

صفحه	جدول
۱۶	جدول (۱-۳): مقایسه تئوریهای مختلف کرنش - جابجایی
۲۱	جدول (۲-۳): مشخصات پوسته استوانه‌ای
۲۱	جدول (۳-۳): مقایسه تئوری غشا و تئوری خمش برای پوسته ساده
۴۲	جدول (۱-۵): مشخصات پوسته استوانه‌ای تقویت شده
۴۲	جدول (۲-۵): نتایج مراجع و نرم افزار ANSYS
۴۳	جدول (۳-۵): مشخصات حاصل از مدل‌سازی ارتوتروپیک پوسته با مشخصات جدول (۱-۵)
۴۳	جدول (۴-۵): نتایج بدست آمده برای حالت‌های مختلف تقویت استوانه
۵۶	جدول (۱-۶): نتایج بدست آمده برای استوانه تقویت شده با استرینگر
۵۶	جدول (۲-۶): نتایج بدست آمده برای استوانه تقویت شده با رینگ
۵۷	جدول (۳-۶): نتایج بدست آمده برای استوانه تقویت شده با استرینگر و رینگ
۵۸	جدول (۴-۶): مشخصات پوسته استوانه‌ای تقویت شده
۶۴	جدول (۵-۶): مشخصات حاصل از مدل‌سازی ارتوتروپیک پوسته با مشخصات جدول (۱-۵)
۶۵	جدول (۶-۶): نتایج بدست آمده برای استوانه تقویت شده در حالت‌های مختلف
۶۵	جدول (۷-۶): فرکانسهای بدست آمده از روش متوسط‌گیری با صرف‌نظر از پارامترهای $\chi$ و $\kappa$
۷۳	جدول (۱-۷): شکل مودهای پوسته استوانه‌ای ساده به ترتیب فرکانس
۷۶	جدول (۲-۷): شکل مودهای پوسته استوانه‌ای تقویت شده با استرینگر و رینگ به ترتیب فرکانس
۷۹	جدول (۳-۷): شکل مودهای پوسته استوانه‌ای تقویت شده با استرینگر به ترتیب فرکانس
۸۲	جدول (۴-۷): شکل مودهای مختلف پوسته استوانه‌ای تقویت شده با رینگ
۹۸	جدول (۵-۷): بیشترین جابجایی پوسته برای حالت‌های مختلف تقویت پوسته در بارگذاری شعاعی
۹۹	جدول (۶-۷): بیشترین جابجایی پوسته برای حالت‌های مختلف تقویت پوسته در بارگذاری محوری

## فهرست علائم

### توضیحات

### علامت

مدول یانگ پوسته	$E$
مدول یانگ پوسته ارتوتروپیک در جهتهای اصلی آن	$E_\phi$ و $E_x$
ضریب پواسون پوسته	$\nu$
ضریب پواسون پوسته ارتوتروپیک در جهتهای اصلی آن	$\nu_\phi$ و $\nu_x$
مدول برشی پوسته	$G$
ثوابت سختی توسعه یافته پوسته ارتوتروپیک	$C_{66}$ و $C_2$ ، $C_{22}$ ، $C_{11}$
ثوابت سختی خمشی پوسته ارتوتروپیک	$D_{66}$ و $D_2$ ، $D_{22}$ ، $D_{11}$
محور مختصات در امتداد طول پوسته استوانه‌ای	$x$
محور مختصات در امتداد محیط پوسته استوانه‌ای	$y$
محور مختصات در امتداد ضخامت پوسته استوانه‌ای	$z$
شعاع پوسته استوانه‌ای	$R$
طول پوسته استوانه‌ای	$L$
ضخامت پوسته استوانه‌ای	$h$
جابجایی پوسته در جهت محور $x$	$u$
جابجایی پوسته در جهت محور $y$	$v$
جابجایی پوسته در جهت محور $z$	$w$
نیروهای تحریک کننده خارجی در جهت محور $x$	$q_x$
نیروهای تحریک کننده خارجی در جهت محور $y$	$q_y$
نیروهای تحریک کننده خارجی در جهت محور $z$	$q_z$
تعداد نیمه موجهای طولی	$m$
تعداد موجهای محیطی	$n$
فرکانس زاویه‌ای ارتعاش	$\omega$
زمان	$t$
ضرایب ثابت	$A$ و $B$ و $C$
پارامتر فرکانسی	$\Omega$
انرژی جنبشی	$T$

انرژی کرنشی	$V$
چگالی پوسته	$\rho_s$
چگالی استرینگر	$\rho_l$
چگالی رینگ	$\rho_r$
چگالی معادل پوسته تقویت شده	$\rho$
ضخامت استرینگر	$h_{wl}$
ضخامت رینگ	$h_{wr}$
ارتفاع استرینگر	$b_{wl}$
ارتفاع رینگ	$b_w$
فاصله تکرار شونده استرینگر بر روی پوسته	$b_{sl}$ یا (s)
فاصله تکرار شونده رینگ بر روی پوسته	$b_{sr}$ یا (r)
فاصله بین مرکز سطح استرینگر و سطح میانی پوسته	$e_1$
فاصله بین مرکز سطح رینگ و سطح میانی پوسته	$e_2$
مدول یانگ استرینگر	$E_1$
مدول برشی استرینگر	$G_1$
مساحت سطح مقطع استرینگر	$A_1$
مدول یانگ رینگ	$E_2$
مدول برشی رینگ	$G_2$
مساحت سطح مقطع رینگ	$A_2$
ممان اینرسی سطح مقطع استرینگر حول سطح میانی پوسته	$I_{01}$
ثابت پیچشی سطح مقطع استرینگر	$I_{t1}$
ممان اینرسی سطح مقطع رینگ حول سطح میانی پوسته	$I_{02}$
ثابت پیچشی سطح مقطع رینگ	$I_{t2}$
مدول برشی رینگ	$G_2$

# فصل اول

مقدمه

پوسته‌های استوانه‌ای یکی از پر کاربردترین اشکال هندسی به کار رفته در قطعات صنعتی می‌باشند. این پوسته‌ها ممکن است در توربین‌های گاز، کوره‌های دوار و بدنه هواپیماها، موشکها، زیردریایی‌ها و تانکرها مورد استفاده قرار گیرند.

در اکثر موارد گفته شده پوسته تحت بارهای دینامیکی قرار دارد و ممکن است دچار ارتعاش، کماتش و خستگی شود. همچنین لازم است که نسبت استحکام به وزن پوسته تا حد امکان بالا باشد تا سازه طراحی شده به لحاظ صرفه‌جویی در مصرف مواد، انرژی و هزینه بهینه باشد.

به منظور بالا بردن نسبت استحکام به وزن پوسته راههای متعددی وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. انتخاب جنس پوسته از موادی که این شرایط را دارا می‌باشند مانند آلیاژهای با نسبت استحکام

به وزن بالا

۲. استفاده از مواد مرکب (Composite)

۳. تقویت کردن پوسته توسط المانهای تیر مانند

۴. استفاده از سه روش فوق به صورت همزمان

روشی که در این گزارش مورد بررسی قرار گرفته است، مورد سوم از موارد فوق است. تقویت پوسته توسط المانهای تیر مانند ممکن است به چند روش انجام شود. ممکن است پوسته توسط تیرهای طولی که استرینگر نامیده می‌شوند یا توسط حلقه‌های دایره‌ای که رینگ نامیده می‌شوند و یا توسط هر دو مورد تقویت شود. نحوه اتصال تقویت‌کننده‌ها به پوسته نیز بر روی جوابهای بدست آمده موثر است. هرکدام از تقویت‌کننده‌ها ممکن است از داخل، خارج یا هر دو طرف به پوسته متصل شوند که جوابهای هر حالت با حالت دیگر فرق می‌کند. باید توجه داشت که در تمام حالتها نمی‌توان تقویت‌کننده‌ها را به هرکدام از طرفین پوسته اضافه کرد. در موشکها به دلیل لزوم داشتن یک سطح آیرودینامیک در قسمت بیرونی بدنه، تقویت‌کننده‌ها را به سطح داخلی بدنه اضافه می‌کنند. در بعضی دستگاههای صنعتی مثلاً کوره‌های دوار این موضوع به صورت معکوس ظاهر می‌شود.

در صورتیکه تقویت‌کننده‌ها با فواصل کم و به طور منظم چیده شده باشند می‌توان اثر آنها را با در نظر گرفتن جنس پوسته از ماده ارتوتروپیک معادل مدل کرد. در صورتیکه فاصله تقویت‌کننده‌ها زیاد باشد یا طول موج ارتعاش نسبت به فاصله آنها کوتاه باشد سازه را باید به صورت ترکیبی از المانهای پوسته و تقویت‌کننده که هرکدام دارای معادلات حرکت مخصوص به خود می‌باشند و توسط معادلات پیوستگی به هم مربوطند مدل کرد.

ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده از سال ۱۹۶۰ مورد توجه دانشمندان و محققان قرار گرفته است. در مرجع [۱۱] ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده با متوسط‌گیری اثر تقویت‌کننده‌ها بر

روی سطح پوسته مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این مرجع و از معادلات کرنش - جابجایی *Donnel* استفاده شده است و نحوه استخراج معادلات تعادل به روش انرژی بوده است. در این مرجع نشان داده شده است که خارج از مرکزی تقویت‌کننده‌ها می‌تواند تأثیر قابل توجهی روی فرکانسهای طبیعی پوسته‌های استوانه‌ای داشته باشد.

در مرجع [۱۲] این مطالعه برای حالتی که تقویت‌کننده‌ها به صورت المانهای جداگانه در نظر گرفته شوند توسعه داده شده است. در این مرجع برای استخراج توابع جابجایی از روش ریلی ریتز استفاده شده است. توابع جابجایی به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که در آنها امکان ایجاد ارتباط بین موده‌های طولی و شعاعی وجود داشته باشد.

در مرجع [۱۴] ارتعاشات آزاد پوسته‌های تقویت‌شده با در نظر گرفتن تأثیر اینرسیهای در صفحه و چرخشی مورد بررسی قرار گرفته است.

در مرجع [۱۵] ارتعاشات آزاد پوسته‌های تقویت‌شده با استرینگر مورد بررسی قرار گرفته است.

در مرجع [۱۶] ارتعاشات آزاد پوسته‌های تقویت‌شده با استرینگر و تحت بار محوری مورد بررسی قرار گرفته است.

در مرجع [۳] ارتعاشات پوسته‌های ارتوتروپیک مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله نحوه معادل سازی پوسته تقویت‌شده با پوسته ارتوتروپیک معادل مورد بررسی قرار گرفته است.

در مرجع [۴] ارتعاشات پوسته‌های ارتوتروپیک و تقویت‌شده دوار به روش انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

در مراجع [۵] و [۶] ارتعاشات پوسته‌های تقویت‌شده به روش انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. در این گزارش پس از بررسی ارتعاشات پوسته‌های تقویت‌نشده با تئوری غشا و تئوری خمش ابتدا رفتار ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای ارتوتروپیک بررسی شده است. سپس روش ارائه شده برای معادل‌سازی اثر تقویت‌کننده‌ها با پوسته ارتوتروپیک معادل در مرجع [۳] مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه روش حل مسأله با تأثیر دادن اثر تقویت‌کننده‌ها روی نیروها و ممانهای گسترده ایجاد شده روی لبه‌های المان پوسته استوانه‌ای بررسی شده است. در این مرحله در حقیقت اثر تقویت‌کننده‌ها روی سطح پوسته متوسط‌گیری شده است. در این مرحله یک روش برای معادل‌سازی اثر تقویت‌کننده‌ها با پوسته ارتوتروپیک معادل نیز پیشنهاد گردیده است. در نهایت ارتعاشات اجباری پوسته ساده و پوسته تقویت‌شده برای حالت‌های مختلف تقویت پوسته و بارگذارهای شعاعی و طولی هارمونیک مورد بررسی قرار گرفته است.



## فصل دوم

تئوری غشا در تحلیل

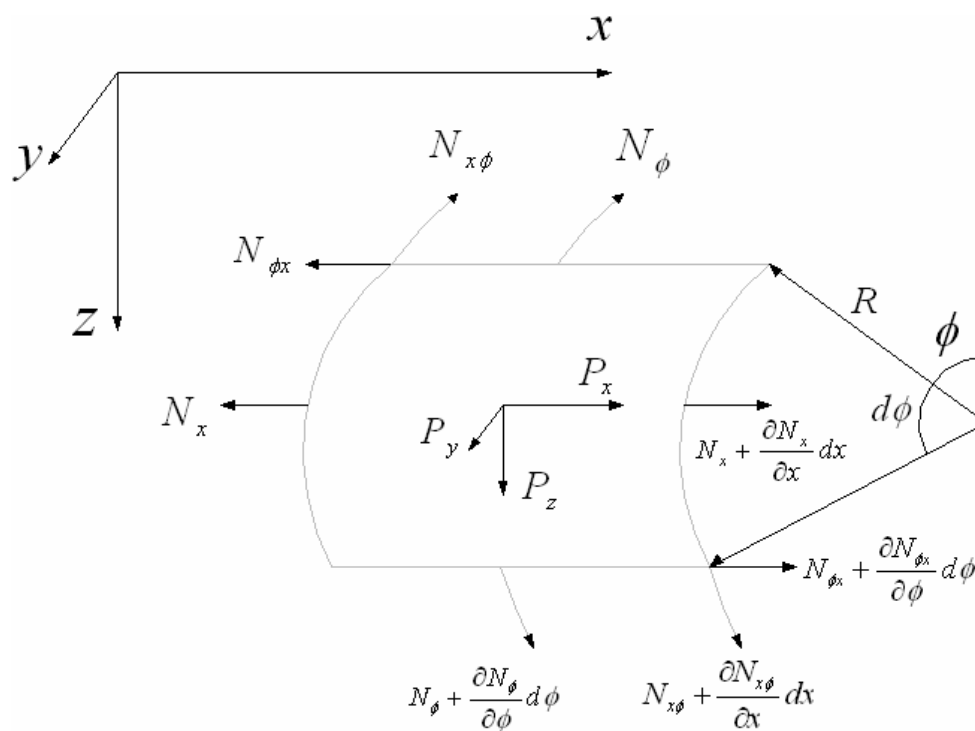
پوسته‌های استوانه‌ای

## ۲-۱- مقدمه

تئوری غشا یکی از مهمترین و ساده‌ترین تئوری‌هایی است که در تحلیل پوسته‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تئوری در حقیقت حالت توسعه یافته تئوری تار در مورد تیرها می‌باشد که برای پوسته‌ها به صورت سه بعدی استخراج شده است. در این تئوری فقط نیروهای گسترده ایجاد شده روی لبه‌های یک المان از پوسته در نظر گرفته می‌شود و از نیروهای جانبی و ممانهای روی لبه‌ها صرف‌نظر می‌شود. این تئوری در پوسته‌هایی که ضخامت آنها نسبت به ابعاد دیگرشان به اندازه کافی کوچک باشد جوابهای خوبی می‌دهد و برای دستیابی به جوابهای دقیق‌تر باید به تئوریهای پیشرفته‌تر مراجعه شود. در این فصل ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای با تئوری غشا مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲-۲- معادلات تعادل

یک پوسته استوانه‌ای به لحاظ هندسی یک جسم متقارن حول یک محور است که می‌توان آن را از دوران یک خط موازی محور  $x$  حول آن به وجود آورد. هر نقطه دلخواه بر روی استوانه توسط مختصات نشان داده شده در شکل (۱-۲) (با دو مشخصه  $x$  و  $y = R\phi$ ) قابل تعیین است که  $R$  شعاع استوانه و  $\phi$  زاویه‌ای است که از محور عمودی سنجیده می‌شود.



شکل (۱-۲): نیروهای گسترده وارد شده روی لبه‌های یک المان پوسته استوانه‌ای

در پوسته‌های استوانه‌ای،  $R$  مقدار ثابتی می‌باشد. در این صورت مساحت المان با رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$A = dx dy = R d\phi dx \quad (1-2)$$

برای بدست آوردن معادلات تعادل کافیتست معادلات تعادل نیروها و ممانها را در جهت محورهای مختصات و حول آنها بدست آوریم.

الف: تعادل نیروها

در جهت  $x$ :

$$\begin{aligned} (N_x + \frac{\partial N_x}{\partial x} dx) R d\phi - N_x R d\phi + (N_{\phi x} + \frac{\partial N_{\phi x}}{\partial \phi} d\phi) dx - N_{\phi x} dx + p_x R d\phi dx = 0 \\ \Rightarrow \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{\phi x}}{R \partial \phi} + p_x = 0 \end{aligned} \quad (2-2)$$

به همین ترتیب می‌توان معادلات تعادل نیروها را در جهت‌های  $y$  و  $z$  نیز محاسبه کرد.

در جهت  $y$ :

$$\frac{\partial N_{x\phi}}{\partial x} + \frac{\partial N_{\phi}}{R \partial \phi} + p_y = 0 \quad (3-2)$$

در جهت  $z$ :

$$N_{\phi} + R p_z = 0 \quad (4-2)$$

ب: تعادل ممانها

با محاسبه تعادل ممانها حول محور  $z$  داریم:

$$N_{x\phi} R d\phi dx - N_{\phi x} dx R d\phi = 0 \Rightarrow N_{x\phi} = N_{\phi x} \quad (5-2)$$

بنابراین معادلات تعادل به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{\phi x}}{R \partial \phi} + p_x = 0 \\ \frac{\partial N_{\phi x}}{\partial x} + \frac{\partial N_{\phi}}{R \partial \phi} + p_y = 0 \end{aligned} \quad (6-2)$$

$$\frac{N_{\phi}}{R} + p_z = 0$$

## ۲-۳- معادلات حرکت

بر اساس اصل دالامبر نیروهای خارجی عبارتند از:

$$P_x = -\rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + q_x(x, \phi, t)$$

$$P_y = -\rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + q_y(x, \phi, t) \quad (7-2)$$

$$P_z = -\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + q_z(x, \phi, t)$$

در روابط فوق  $u$  و  $v$  و  $w$  جابجایی پوسته در جهت محورهای  $x$  و  $y$  و  $z$  جرم واحد سطح آن و  $q_x, q_y, q_z$  نیروهای تحریک کننده خارجی می‌باشند.  
روابط تنش- کرنش در پوسته‌ها عبارتند از:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_\phi)$$

$$\sigma_\phi = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_\phi + \nu \varepsilon_x) \quad (8-2)$$

$$\tau_{x\phi} = G \gamma_{x\phi}$$

به منظور نوشتن روابط فوق بر حسب جابجایی‌ها باید روابط کرنش- جابجایی را نیز بدست آوریم  
داریم:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\varepsilon_\phi = \frac{\partial v}{R \partial \phi} - \frac{w}{R} \quad (9-2)$$

$$\gamma_{x\phi} = \frac{\partial u}{R \partial \phi} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

نیروهای واحد وارد شده روی لبه‌های پوسته عبارتند از:

$$N_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x dz = \frac{Eh}{1-\nu^2} \left[ \frac{\partial u}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial v}{R \partial \phi} - \frac{w}{R} \right) \right]$$