

بررسی ارتعاشات آزاد و کمانش پوسته های استوانه‌ای ساده و تقویت شده با روش تجربی و عددی

رضا آذرافزا^{*}، علی داور، مجید قدیمی، پویا پیرعلی

مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

*رضا آذرافزا: azarmut@mut.ac.ir، azarkntu@yahoo.com

چکیده

پوسته‌های استوانه‌ای یکی از پرکاربردترین اشکال بکار رفته در قطعات صنعتی می‌باشند. این پوسته‌ها ممکن است در توربین‌های گاز، کوره‌های دوار، بدنه هواپیماها، موشکها، زیردریایی‌ها و تانکرها مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین توسعه کاربرد این سازه‌ها در زمینه‌های مختلف صنعتی باعث شده که رفتار مکانیکی آنها به دقت مورد بررسی قرار گیرد. در بسیاری از مواقع پوسته‌ها تحت بارهای محوری هستند، به همین علت بررسی کمانش و ارتعاشات در آنها بسیار مهم می‌باشد. در این مقاله کمانش و ارتعاشات پوسته های استوانه ای تقویت شده با رینگ و استرینگر از جنس فولاد به صورت تجربی و شبیه سازی عددی انجام شده و نتایج با هم مقایسه شده اند. شرایط مرزی پوسته دو سر ساده بوده مشاهده شد که نتایج با هم تطابق خوبی دارند. پس از صحت سنجی نتایج عددی، اثر تعداد رینگ و استرینگر و موقعیت قرار گرفتن آنها بر فرکانسهای طبیعی بررسی شده است.

واژه های کلیدی: کمانش- ارتعاشات- پوسته های استوانه ای تقویت شده- رینگ و استرینگر- فرکانس طبیعی

۱- مقدمه

پوسته‌ها یکی از فراوانترین و متنوع ترین سازه‌ها هستند که کاربرد وسیعی در صنایع مختلف از جمله: صنایع هوافضا، بدنه زیردریاییها، لوله‌های انتقال نفت، مخازن تحت فشار و سازه های حمل و نگهداری سیالات پیدا کرده اند. در بسیار از موارد این پوسته‌ها تحت بارهای دینامیکی قرار دارند و ممکن است دچار ارتعاش، کمانش و خستگی شود. به همین علت رفتار مکانیکی آنها باید به دقت مورد بررسی قرار گیرد. در خصوص کمانش و ارتعاش آزاد پوسته‌ها مطالعات فراوانی انجام شده که به تعدادی از آنها اشاره خواهد شد. نظری و ملکزاده [۱] تحلیل کمانش پوسته استوانه ای فلز - کامپوزیت طراحی شده بر اساس معیار شکست تنش ماکزیمم را بررسی نمودند. عباس هادی و همکاران [۲]، ارتعاشات آزاد پوسته های استوانه ای از جنس مواد هدفمند بر روی بستر الاستیک تحت نیروی محوری، فشار جانبی و شرایط مرزی مختلف را بررسی نمودند. آذرافزا و همکاران [۳]، ارتعاشات آزاد پوسته‌های ساندویچی استوانه‌ای به روش تحلیلی و تجربی انجام دادند. آذرافزا و همکاران [۴]، به بررسی کمانش پوسته‌های ساندویچی استوانه‌ای به روش تحلیلی و تجربی پرداختند. رستمی و شهر- جردی [۵]، کمانش استوانه مشبک کامپوزیتی با پوسته درونی و بیرونی تحت فشار خارجی را مطالعه نمودند. باقری [۶]، ارتعاشات آزاد پوسته- های استوانه‌ای تقویت شده طولی با شرایط مرزی مختلف به روشهای تحلیلی و تجربی را بررسی نمودند. لوپاتین و مرووف [۷] کمانش پوسته ساندویچی استوانه‌ای با طول محدود با شرایط مرزی گیردار در انتها را

تحت فشار خارجی یکنواخت مورد مطالعه قرار داده‌اند. سعیدی و خلیلی [۸] برای تحلیل کمانش پوسته‌های مخروطی ناقص ساندویچی با هسته ضخیم و صفحات رویه با ماده مدرج تابعی و هسته همگن و با خواص وابسته به دما از یک تئوری بهبود یافته استفاده کردند. هاشمی و همکاران [۹] تحلیل کمانش مکانیکی پانل‌های استوانه ای مدرج تابعی تقویت شده با نانو لوله های کربنی تحت بار فشاری انجام دادند و تاثیر پارامترهای مختلف را بر میزان بار بحرانی کمانش بررسی کردند. پور موید و ملک زاده [۱۰] تحلیل کمانش و پس کمانش پانل ساندویچی با هسته انعطاف پذیر تقویت شده با سیم های آلایژ حافظه دار مطالعه نمودند. شاهقلیان و همکاران [۱۱] ارتعاشات آزاد پوسته استوانه ای ساندویچی با هسته مشبک را به شیوه عددی و آزمایشگاهی بدست آوردند. شاهقلیان و همکاران [۱۲]، تحلیل تجربی و عددی ارتعاشات آزاد پوسته استوانه ای کامپوزیتی ساندویچی با هسته لوزی شکل را انجام دادند. اسکندری جم و نیکجو [۱۳]، به مطالعه کمانش و ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت و تحت مایع داخلی پرداختند. شنگ و وانگ [۱۴]، اثر بار حرارتی بر کمانش و ارتعاشات مدرج تابعی تقویت شده با رینگ را بررسی کردند.

۲- روش تهیه پوسته و مواد

چون کار به صورت آزمایشگاهی و نرم افزاری انجام خواهد شد، لازم است ۲ نمونه پوسته، یک پوسته ساده و یک پوسته تقویت شده با رینگ و استرینگر ساخته شود. جنس پوسته ها فولادی بوده که خواص مکانیکی و هندسی آنها به ترتیب در جدول ۱ و ۲ آمده است. برای ساخت پوسته ها از لوله آماده استفاده شده که با دستگاه رول برش دو نمونه با طول ۲۰۰ میلیمتر از لوله اصلی بریده شده و آماده گردیدند. یکی از پوسته ها بایستی با رینگ و استرینگر تقویت شود. جنس رینگ و استرینگرها نیز فولادی بوده (جدول ۱) و خواص هندسی آنها نیز به صورت جدول ۳ می- باشد. پوسته از داخل تقویت شده و برای تقویت آن از چهار عدد استرینگر و سه عدد رینگ استفاده شده است. برای این منظور استرینگرها در داخل پوسته به صورت متقارن جوش داده شده و رینگها با استفاده از دستگاه رول فرمینگ به صورت چهار تکه به شکل ربع دایره با طول ۱۸۸ میلیمتر درآمده و در ابتدا، وسط و انتهای پوسته در میان استرینگرها به پوسته و استرینگرها جوش شدند. شکل ۱ پوسته در حالت ساخت را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خواص مکانیکی فولاد

چگالی (kg/m ³)	مدول یانگ (Gpa)	نسبت پواسون
۷۸۰۰	۲۱۰	۰٫۳

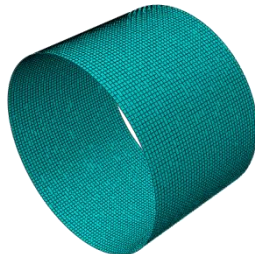
سپس فک بالا که متحرک می‌باشد پایین آورده شده تا با صفحه صلب مماس شود. مقدار سرعت حرکت فک متحرک دستگاه بر روی ۵ میلیمتر بر دقیقه تنظیم گشته، و از طریق کامپیوتر فرمان شروع آزمایش داده شده است. شکل ۴ چیدمان تست نمونه کمانش را نشان می‌دهند.

جدول ۲- خواص هندسی پوسته

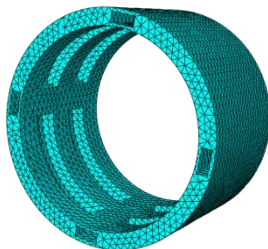
نام قطعه	قطر داخلی (mm)	قطر خارجی (mm)	طول (mm)
پوسته	۳۱۰	۳۱۶	۲۰۰

جدول ۳- خواص هندسی استرینگر و رینگ

نام قطعه	مقطع پروفیل	اندازه مقطع (mm × mm)	ضخامت (mm)	طول (mm)
استرینگر	مربعی	۴۰×۲۰	۳	۲۰۰
رینگها	ناودانی	۴۰×۲۰	۳	۷۵۱



(الف)



(ب)

شکل ۲- مش بندی پوسته: (الف) پوسته ساده، (ب) پوسته تقویت شده



شکل ۱- پوسته در حال ساخت

۳- شبیه سازی پوسته در نرم افزار آباکوس

مدلسازی، آنالیز کمانش و آنالیز مودال در نرم‌افزار آباکوس انجام گردیده است و بار بحرانی کمانش و فرکانسهای پوسته ساندویچی، بدست آمده اند. المان C3D20R برای پوسته و رینگ و استرینگر در نظر گرفته شده و از تکنیک تماسی تای در سطح مشترک آنها استفاده شده است. برای تحلیل بار کمانشی، یک طرف پوسته را گیردار نموده و برای آنکه بار بطور یکنواخت بر کل پوسته وارد گردد، روی سر آزاد آن یک صفحه صلب قرار داده و بار به صفحه صلب وارد شده و نمودار بار بر حسب زمان را تا هنگامی که قطعه به شکست رسیده، رسم شده است. برای تحلیل مودال نیز شرایط مرزی به صورت دو سر آزاد در نظر گرفته شده و از حل گر لانکروس استفاده شده است. شکل ۲ مش بندی پوسته‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳- چیدمان واقعی تجهیزات در آزمایشگاه مودال

۴- تست های تجربی

به منظور انجام تست های تجربی، روی دو نمونه ابتدا تست مودال انجام گردید. در تست آنالیز مودال به منظور تعیین نقاط جهت نصب سنسوراندازه گیری، سطح بیرونی مدل در جهت طولی به شش نقطه با فاصله مساوی از یکدیگر (از ابتدا تا انتها) و در جهت محیطی به هشت نقطه با فواصل یکسان تقسیم بندی شده است (جمعاً ۴۸ نقطه). سپس پوسته با یک کش آویزان گردیده و تحریک مدل با استفاده از لرزش گر (شیکر) نصب شده در یک نقطه مشخص در قسمت پایین مدل انجام شده است. به این ترتیب آزمایش مودال در بازه فرکانسی صفر تا ۲۰۰۰ هرتز انجام شده است. شکل ۳ چیدمان تست آنالیز مودال را نشان می‌دهند. برای تست کمانش (فشار)، پوسته ساندویچی استوانه‌ای در داخل دستگاه قرار گرفته و روی فک پایین ثابت گردیده است. روی لبه بالایی قطعه یک صفحه صلب قرار داده شد تا بار به طور یکنواخت روی آن تقسیم گردد.



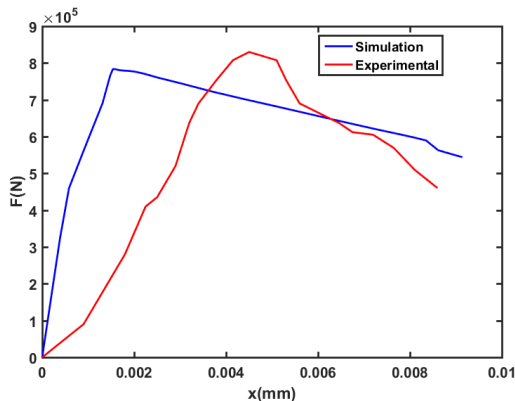
شکل ۴- چیدمان واقعی تجهیزات در آزمایشگاه کمانش

جدول ۵- مقایسه ی فرکانس های طبیعی بدست آمده از آزمایش عملی و شبیه سازی در پوسته ساده (پوسته تقویت نشده)

شماره مود	شبیه سازی	تست تجربی	خطا
۱	۷۰.۵۴	۷۲.۱۵	٪۲.۲۳
۲	۲۴۱.۸۱	۲۳۷.۵	٪۱.۸۱
۳	۴۳۷.۵۳	۴۳۶.۲۵	٪۰.۳
۴	۷۲۳.۱۵	۷۰۶.۲۵	٪۲.۳۹
۵	۱۰۱۶	۱۰۲۰	٪۰.۳۹
۶	۱۴۰۸.۷	۱۴۱۰	٪۰.۱
۷	۱۸۶۳.۵	۱۸۵۰	٪۰.۷۳

۵-۲- آزمون کمانش (فشار)

خواصی که به طور مستقیم از طریق آزمون فشار اندازه گیری می شوند بار فشار نهایی می باشند. برای تست فشار، پوسته های استوانه ای در داخل دستگاه قرار گرفته با گذشت زمان و مقدار نیرو افزایش می یابد. در تست تجربی، پوسته ساده کمانش کرده و دچار شکست می شود. همچنین تحلیل بار کمانشی پوسته ساده با روش شبیه سازی نیز انجام گردید. نتایج بار کمانشی بدست آمده از روش شبیه سازی و تست تجربی در شکل ۶ و مقدار بار و خطای دو روش در جدول ۶ نشان داده شده اند. همانطوریکه مشاهده می شود نتایج بدست آمده از روش شبیه سازی با هم تطابق خوبی دارند.



شکل ۶- مقایسه نمودارهای بار - جابجایی تست تجربی و شبیه سازی پوسته ساده

جدول ۶- مقایسه نتایج بارهای کمانشی بدست آمده از دو روش شبیه سازی و تست تجربی برای پوسته ساده

روش	مقدار بار کمانشی (N)	درصد خطا
تجربی	۸۳۰۰۰۰	-
شبیه سازی	۷۸۳۸۰۰	۵.۵۷

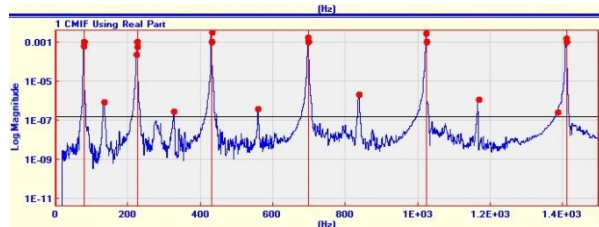
برای پوسته تقویت شده با رینگ و استرینگر نیز آزمایش کمانش انجام گرفت، با توجه به اینکه ظرفیت دستگاه ۱۰۰ تن می باشد پوسته تقویت شده با این بار دچار کمانش نگردید. همچنین تحلیل بار کمانشی پوسته تقویت شده با روش شبیه سازی نیز انجام گردید. نتایج بار کمانشی بدست آمده از دو روش در شکل ۷ نشان داده شده اند. نتایج بار کمانشی برای پوسته تقویت شده برای دو روش شبیه سازی و تجربی (تا جایی که در تست تجربی ظرفیت دستگاه جواب داده) تطابق خوبی با هم دارند.

۵- بررسی نتایج تجربی و شبیه سازی

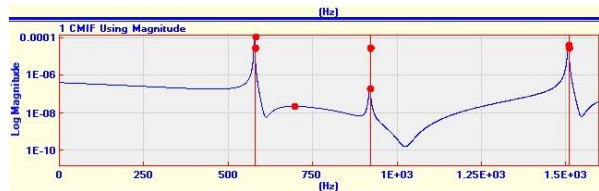
در این بخش نتایج تحلیل فرکانسی و کمانشی پوسته ساندویچی استوانه ای را که از روش شبیه سازی و تجربی بدست آمده با هم مقایسه می شوند. بدین منظور دو نمونه از مدل مورد نظر برای انجام تست های مودال و کمانش (فشار) ساخته شده اند. جنس پوسته ها و تقویت کننده ها فلزی مطابق جدول ۱ می باشند. در ابتدا تست مودال تجربی، سپس تست کمانش دو پوسته ساده و پوسته تقویت شده انجام گرفت.

۵-۱- آزمون مودال

به منظور تحلیل ارتعاشی و درستی جوابها شبیه سازی، آزمایش مودال دو پوسته انجام گردید. پس از چیدمان تجهیزات برای آزمایش مودال، تحریک پوسته و اندازه گیری شتابها انجام گرفت که پس از تحلیل، نتیجه نهایی آن برای دو پوسته (ساده و تقویت شده) در شکل ۵ نشان داده شده است که در آن محور افقی فرکانس و محور عمودی دامنه می باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۵- پاسخ فرکانسی برای بازه صفر تا ۲۰۰۰ هرتز: (الف) پوسته ساده، (ب) پوسته تقویت شده

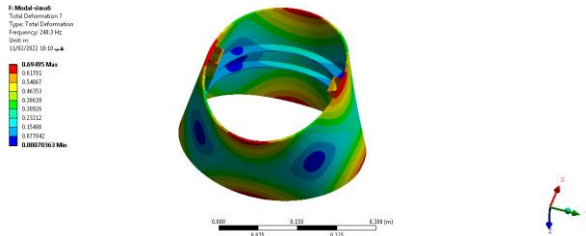
همچنین پوسته ها در نرم افزار آباکوس شبیه سازی گردید و شرایط مرزی به صورت دو سر آزاد در نظر گرفته شده اند و نتایج بدست آمدند. نتایج شبیه سازی و تست تجربی آنالیز مودال برای پوسته تقویت شده در جدول ۴ مقایسه شده اند. همانطور که مشاهده می شود نتایج بدست آمده تطابق خوبی داشته و درصد خطا ناچیز بوده است که نشان دهنده درستی نتایج شبیه سازی می باشد

جدول ۴- مقایسه فرکانس های طبیعی بدست آمده از آزمایش عملی و شبیه سازی در پوسته تقویت شده

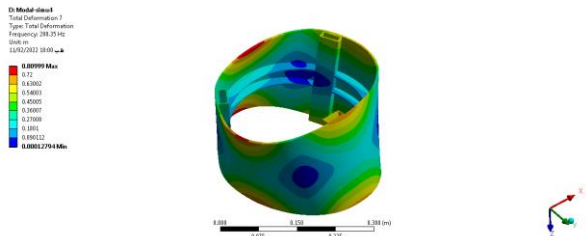
شماره مود	شبیه سازی	تست تجربی	خطا
۱	۶۴۸.۲۱	۵۹۱	٪۹.۶۸
۲	۹۴۹	۹۲۳	٪۲.۸۲
۳	۱۶۲۰.۸	۱۵۱۳	٪۷.۱۲

همچنین نتایج تست مودال روش تجربی و شبیه سازی و درصد خطا برای برای پوسته ساده شده در جدول ۵ نشان داده شده است.

همچنین شکل مودهای مربوطه به ترتیب در شکل‌های ۸ تا ۱۳ نشان داده شده اند. همانطوریکه از شکل‌ها مودها مشاهده می‌شود در همه حال‌ها که دو استرینگر وجود دارد، حالت تقارن کامل دیده می‌شود.

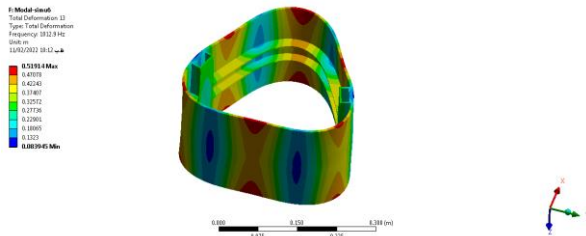


(الف)

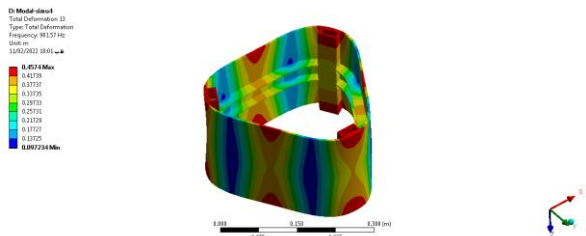


(ب)

شکل ۸- شکل مود (۱، ۱) در حالت یک رینگ در وسط:
(الف) دو استرینگر ، (ب) سه استرینگر

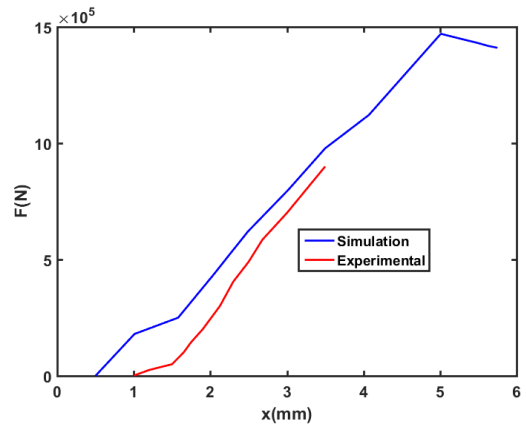


(الف)



(ب)

شکل ۹- شکل مود (۱، ۲) در حالت یک رینگ در وسط:
(الف) دو استرینگر ، (ب) سه استرینگر



شکل ۷- مقایسه نمودارهای بار - جابجایی تست تجربی و شبیه سازی پوسته تقویت شده

همانطوریکه از شکل ۷ مشاهده می‌شود برای روش شبیه سازی، پوسته تقویت شده، مقدار ۱۴۷۰ کیلو نیوتن بار تحمل نموده سپس دچار کمانش شده است. همچنین در جدول ۷، مقدار بار کمانشی پوسته ساده و پوسته تقویت شده نسبت به هم مقایسه شده اند. مشاهده می‌شود که با تقویت پوسته، بار کمانشی به اندازه ۸۷،۵۵ درصد افزایش یافته است.

جدول ۷- مقایسه نتایج بارهای کمانشی بدست آمده از روش شبیه سازی برای پوسته ساده و پوسته تقویت شده

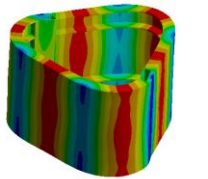
نوع پوسته	مقدار بار کمانشی (N)	درصد افزایش بار
ساده	۷۸۳۸۰۰	-
تقویت شده	۱۴۷۰۰۰۰	۸۷،۵۵

۶- اثر تعداد تقویت کننده بر فرکانسهای طبیعی دو پوسته

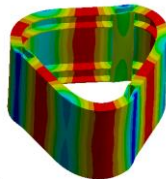
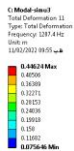
در این قسمت اثر تعداد تقویت کننده‌ها (رینگ و استرینگر) بر مقدار فرکانس طبیعی با استفاده از روش عددی بررسی می‌شود. بدین منظور چند پوسته تقویت شده با وزن یکسان شبیه سازی شده و تعداد تقویت کننده‌ها را تغییر داده و فرکانسها را بررسی می‌شوند. خواص مکانیکی و هندسی به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ آمده است. مقایسه فرکانس پوسته ها در جدول ۸ نشان داده شده است. همانطوریکه از جدول ۸ مشاهده می‌شود، همه حالتها برای $m=1$ بدست آمده اند. برای شکل مود محیطی $n=1$ پوسته با دو رینگ و سه استرینگر بالاترین فرکانس و برای شکل مودهای محیطی $n=3$ و $n=4$ پوسته با دو رینگ و دو استرینگر بالاترین فرکانس را داشته است.

جدول ۸- مقایسه فرکانسهای پوسته تقویت شده

شکل مود (m, n)	فرکانس پوسته تقویت شده [Hz]		
	یک رینگ در وسط پوسته	دو رینگ در دو سر پوسته	دو رینگ در وسط پوسته
(۱, ۱)	۲۴۰،۳	۲۸۰،۳۵	۵۲۵،۱۲
(۱, ۲)	۱۰۱۲،۹	۹۸۱،۵۷	۱۲۴۲،۶
(۱, ۳)	۱۰۱۶،۵	۱۰۶۹،۴	۲۰۶۴
(۱, ۴)			۲۰۳۶،۸

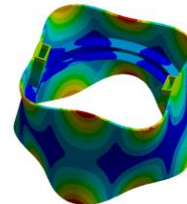
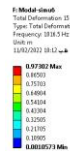


(الف)

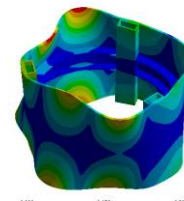


(ب)

شکل ۱۲- شکل مود (۳، ۱) در حالت دو رینگ در دو سر پوسته :
(الف) دو استرینگر ، (ب) سه استرینگر

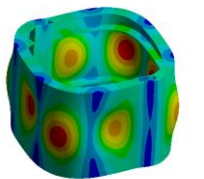
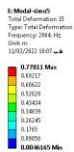


(الف)

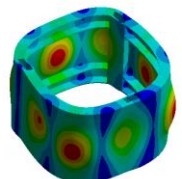


(ب)

شکل ۱۰- شکل مود (۴، ۱) در حالت یک رینگ در وسط:
(الف) دو استرینگر ، (ب) سه استرینگر

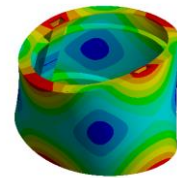


(الف)

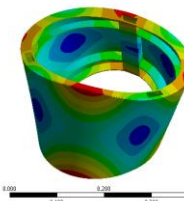


(ب)

شکل ۱۳- شکل مود (۴، ۱) در حالت دو رینگ در دو سر پوسته :
(الف) دو استرینگر ، (ب) سه استرینگر



(الف)



(ب)

شکل ۱۱- شکل مود (۱، ۱) در حالت دو رینگ در دو سر پوسته :
(الف) دو استرینگر ، (ب) سه استرینگر

۷- نتیجه گیری

در این مقاله ارتعاشات آزاد و کماتش پوسته‌های استوانه‌ای ساده و تقویت شده با روشهای عددی و تجربی بررسی گردید.
۱- نتایج بار کماتشی پوسته ساده بدست آمده از دو روش عددی و تجربی با هم تطابق خوبی دارند و درصد خطا در ۵/۵۷ درصا می باشد.
۲- نتایج فرکانس طبیعی برای پوسته ساده و پوسته تقویت شده، بدست آمده از دو روش عددی و تجربی با هم تطابق خوبی دارند و درصد خطا برای پوسته ساده در بدترین حالت ۲/۳۹ درصد و برای پوسته تقویت شده ۹/۶۸ درصد می باشد.

- ۳- با تقویت پوسته بار کمانشی آن ۸۷/۵۵ درصد افزایش یافته است.
- ۴- در پوسته تقویت شده، برای مود (۱، ۱) در هر دو حالت فرکانس پوسته با ۳ استرینگر بیشتر از پوسته با ۲ استرینگر ولی در بقیه مودها برای پوسته با ۲ استرینگر فرکانس بیشتر است. بنابراین با برای محیطی محیطی بزرگتر از یک ($n > 1$) استفاده از پوسته با دو رینگ و دو استرینگر از نظر فرکانسی بهتر می باشد.
- ۸- مراجع
- [۱] ع. نظری و ک. ملک زاده، « تحلیل کمانش پوسته استوانه ای فلز - کامپوزیت طراحی شده بر اساس معیار شکست تنش ماکزیمم »، نشریه مهندسی مکانیک/امیرکبیر، دوره ۵۱، شماره ۱، سال ۱۳۹۸، صفحات ۶۵ تا ۷۸
- [۲] ع. هادی، س. شاخصی، ح. ر. اویسی و ج. فضیلتی، « ارتعاشات آزاد پوسته های استوانه ای از جنس مواد هدفمند بر روی بستر الاستیک تحت نیروی محوری، فشار جانبی و شرایط مرزی مختلف »، نشریه مهندسی مکانیک/امیرکبیر، دوره ۵۰، شماره ۵، سال ۱۳۹۷، صفحات ۱۰۹۷ تا ۱۱۱۲.
- [۳] ر. آذرافزا، ع. داور، م. سفیدگران و س. رضایی، « ارتعاشات آزاد پوسته‌های ساندویچی استوانه‌ای به روش تحلیلی و تجربی »، سی امین همایش سالانه بین المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران، ۲۰ تا ۲۲ اردیبهشت ۱۴۰۱.
- [۴] ر. آذرافزا، ع. داور، م. سفیدگران و س. رضایی، « بررسی کمانش پوسته‌های ساندویچی استوانه‌ای به روش تحلیلی و تجربی »، بیستمین کنفرانس بین المللی انجمن هوافضای ایران، ۱۸ و ۱۹ خرداد ماه ۱۴۰۱.
- [۵] ب. رستمی و ع. شهرجردی، « تحلیل کمانش استوانه مشبک کامپوزیتی با پوسته درونی و بیرونی تحت فشار خارجی »، مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۸۸، جلد ۴۹، شماره ۳، ۱۳۸۹، صفحات ۱۴۷ تا ۱۵۶.
- [۶] م. باقری، « ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده طولی با شرایط مرزی مختلف به روشهای تحلیلی و تجربی »، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی هوانوردی، سال هجدهم، شماره اول، بهار و تابستان ۹۵.
- [7] A. V. Lopatin, and E. V. Morozov, "Buckling of the composite sandwich cylindrical shell with clamped ends under uniform external pressure," *Composite Structures*, vol. 122, pp. 209-219, 2015.
- [8] J. Seidi, S.M.R. Khalili, "The Buckling Analytical of Conical Sandwich Shells with Temperature Dependent and an Improved High-Order Theory," *AUT Journal of Mechanical Engineering*; vol. 3, no. 1, pp.95-106, 2019.
- [۹] ر. هاشمی، م. میرزایی و م. ر. عدل پرور، « تحلیل کمانش مکانیکی پانل های استوانه ای مدرج تابعی تقویت شده با نانو لوله های کربنی »، نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک/ایران، بهار ۱۳۹۹، دوره ۲۲، شماره ۱، ص ۵۰-۷۳.
- [۱۰] ع. ر. پور موید و ک. ملک زاده، « تحلیل کمانش و پس کمانش پانل ساندویچی با هسته انعطاف پذیر تقویت شده با سیم های آلیاژ
- حافظه دار »، نشریه علمی مکانیک و هوافضا، بهار ۱۴۰۰، جلد ۱۷، شماره ۱، ص ۸۳ - ۹۷.
- [11] D. Shahgholian Ghahfarokhi, G. H. Rahimi, M. Zarei & H. Salehipour, "Free vibration analyses of composite sandwich cylindrical shells with grid cores: experimental study and numerical simulation," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 50, n0. 2, pp. 687-706, 2022.
- [۱۲] د. شاهقلیان قهفرخی، غ. ر. رحیمی، ا. فنادی، « تحلیل تجربی و عددی ارتعاشات آزاد پوسته استوانه ای کامپوزیتی ساندویچی با هسته لوزی شکل »، نشریه علمی و پژوهشی علوم و فناوری کامپوزیت، جلد ۵، شماره ۴، زمستان ۹۷، صفحات ۴۶۹ تا ۴۷۸.
- [13] j. E. Jam and M. A Nikjoo, "Buckling and Free Vibrations of Cylindrical Stiffened Composite Shells with Internal Liquid ", *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* vol. 6, no. 19, pp.3495-3505, 2013.
- [14] G .G. Sheng and X. Wang, " Effects of Thermal Loading on the Buckling and Vibration of Ring-Stiffened Functionally Graded Shell", *Journal of Thermal Stresses*, vol. 30, no. 12, pp. 1249-1267 , 2007.