بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی

مهندسی مکانیک

طراحی کاربردی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی و تحلیل ارتعاشات پوسته های کروی FGM در محیط‌های حرارتی

از

محدثه حسین زاده روف پیشه

اساتید راهنما

دکتر منصور درویزه

دکتر غلامرضا زارع پور

اساتید مشاور

دکتر رضا انصاری

مهندس کتایون محمدی

اسفند ماه ۱۳۹۱

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم:

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند.

تقدیم به خواهرم:

که وجودش شادی بخش و صفایش مایه آرامش من است.

و تقدیم به برادرم:

که تکیه گاه من در مواجهه با مشکلات، و وجودش مایه دلگرمی من می باشد.

تشکر و قدردانی

مراتب سپاس و قدردانی خود را از استادان راهنما آقایان دکتر منصور درویزه و دکتر غلامرضا زارع پور و استادان مشاور آقای دکتر رضا انصاری و خانم مهندس کتایون محمدی ابراز می‌دارم. همچنین بر خود لازم می‌دانم که از جناب آقای دکتر رضا انصاری که در انجام این پروژه مرا یاری نمودند، کمال تشکر را نمایم. با آرزوی سلامتی و توفیق روزافزون برای ایشان.

چکیده:

بررسی و تحلیل ارتعاشات پوسته های کروی در محیط‌های حرارتی

محدثه حسین زاده روف پیشه

در این رساله، کمانش حرارتی و ارتعاشات آزاد پوسته های کروی جدارک نازک عمیق FGM در محیط حرارتی مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. شرایط مرزی برای پوسته کروی به صورت تکیه گاه های ساده در نظر گرفته شده است و فرض شده است که پوسته کروی تحت بار حرارتی افزایشی یکنواخت قرار دارد. معادلات حاکم براساس تئوری مرتبه اول پوسته ها و معادلات سینماتیکی غیر خطی سندرس استخراج شده اند. به منظور حل معادلات حاکم روش تحلیلی گلرکین مورد استفاده قرار گرفته می‌گیرد. مواد تشکیل دهنده پوسته FGM بصورت ترکیبی از سرامیک و فلز می‌باشد که خواص مکانیکی آن ها توابعی خطی از مختصات ضخامت هستند.. تأثیر پارامترهای مختلف مانند نسبت ضخامت به شعاع، زاویه کمکی و کسر حجمی بر روی رفتار کمانشی و فرکانس طبیعی پوسته های کروی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج به دست آمده با نتایج موجود در ادبیات مربوطه مقایسه شده و از نتایج ارائه شده اطمینان حاصل گردیده است.

واژه های کلیدی: پوسته های کروی جدار نازک عمیق، کمانش حرارتی، ارتعاشات آزاد، FGM، روش تحلیلی گلرکین

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست جدول‌ها	خ
فهرست شکل‌ها	د
فهرست علائم اختصاری	ز
چکیده فارسی	س
چکیده انگلیسی	ش
فصل اول: پیشگفتار	
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۲ مروری بر تحقیقات گذشته	۳
۱-۳ معرفی رساله حاضر	۶
فصل دوم: درآمدی بر FGMها	
۲-۱ مقدمه	۹
۲-۲ کاربرد FGM	۱۱
۲-۳ روش های تولید FGM	۱۲
۲-۳-۱ متالورژی پودر	۱۲
۲-۳- ۱-۱ تشکیل پودرهای متراکم مدرج	۱۴
۲-۳-۱-۱-۱ ته نشینی لایه های مخلوط پودر با تغییر تدریجی در مخلوط	۱۵
۲-۳-۱-۱-۱-۱ قالب متراکم کننده لایه ها (توده کردن پودرها)	۱۵
۲-۳-۱-۱-۱-۲ ورقه ورقه کردن صفحه	۱۵
۲-۳-۱-۱-۱-۳ اسپری پودر تر	۱۶
۲-۳-۱-۱-۱-۴ غوطوری در لجن و ریخته گری لغزشی	۱۶
۲-۳-۱-۱-۱-۵ فرآیندهای شکل آزاد جسم	۱۶
۲-۳-۱-۱-۱-۶ روش های دیگر	۱۷

۲-۳-۱-۱-۲ ته نشینی پودرها با تغییر پیوسته در مخلوط ۱۸
۲-۳-۱-۱-۲-۱ شکل دهی پودر به روش گریز از مرکز (CPF) و مخلوط کردن خشک با پروانه (IDB) ۱۸
۲-۳-۱-۱-۲-۲ ته نشینی جاذبه ای ۱۸
۲-۳-۱-۱-۲-۳ ته نشین سازی گریز از مرکز ۱۹
۲-۳-۱-۱-۲-۴ رسوب الکتروفورتیک ۱۹
۲-۳-۱-۱-۲-۵ پالایش فشاری/ ریخته گری لغزشی خلاء ۲۰
۲-۳-۱-۲ تف جوشی ۲۲
۲-۳-۲ فرآیند ذوب ۲۴
۲-۳-۲-۱ ریخته گری گریز از مرکز ۲۴
۲-۳-۲-۲ ریخته گری ته نشینی ۲۴
۲-۳-۲-۳ پر کردن قالب کنترل شده ۲۵
۲-۳-۲-۴ انجماد جهتی ۲۸
۲-۳-۲-۵ فرآیند تراوش ۳۰
۲-۳-۲-۶- تراوش واکنشی ۳۲
۲-۳-۳ تولید FGM های پلیمری ۳۲
۲-۳-۴ مدل کردن تولید FGM ۳۳
۲-۴ تحلیل ساختار ۳۳
۲-۴-۱ مقدمه ای بر ریز ساختارهای مدرج ۳۳
۲-۴-۲- کسر حجمی ۳۲
۲-۴-۳ نوع پراکندگی ساختار ۳۵
۲-۴-۴ تغییرات آرام بر خلاف ساختارهای لایه های مستقیم ۳۶
۲-۴-۵ تشریح ریاضی تغییرات ۳۷
۲-۵ برآورد خواص FGM ها ۴۰
۲-۵-۱ توضیحات کلی ۴۰

۲-۵-۲ روش تخمین ۴۱
۲-۵-۳ خصوصیات مؤثر مواد ۴۲
۲-۶ رفتار ماکرومکانیک FGM ها ۴۳
۲-۶-۱ رفتار ماکرومکانیکی یک ماده مرکب چند لایه ۴۳
۲-۶-۲ تنش و کرنش مربوط به مواد غیر ایزوتروپ ۴۴

فصل سوم: استخراج معادلات

۳-۱ مقدمه ۴۸
۳-۲ تعاریف اساسی رفتار سیستم های مکانیکی ۴۹
۳-۲-۱ پایداری ۴۹
۳-۲-۲ ناپایداری ۵۱
۳-۲-۳ بار کمانشی ۵۳
۳-۲-۴ تعیین پایداری ۵۵
۳-۲-۴ -۱ روش همسایگی تعادل ۵۵
۳-۲-۴- ۲ روش انرژی ۵۶
۳-۲-۵ معادلات حرکت ۵۷
۳-۲-۵-۱ روش تعادل دینامیکی (اصل دالامبر) ۵۷
۳-۲-۵-۲ اصل هامیلتون ۵۷
۳-۲-۵-۳ اصل کار مجازی ۵۸
۳-۲-۶ ارتعاشات آزاد ۵۸
۳-۳ معادلات حاکم بر پوسته های کروی ۵۹
۳-۳-۱ فرضیات ۵۹
۳-۳-۲ پوسته ها ۵۹
۳-۳-۳ پوسته های کروی ۶۰
۳-۳-۳-۱ هندسه پوسته های کروی ۶۰
۳-۳-۳-۲ معادلات حاکم بر پوسته‌ی کروی ایزوتروپیک ۶۱

۳-۳-۳-۳ روابط سینماتیک ۶۳
۳-۳-۳-۴ معادلات ساختاری ۶۳
۳-۳-۳-۵ معادلات ساختاری تحت بار حرارتی ۶۵
۳-۳-۳-۶ معادلات تعادل پوسته های کروی ۶۶
۳-۳-۳-۸ معادلات پایداری ۶۸
۳-۳-۳-۹ تعمیم معادلات برای پوسته های کروی FGM ۷۱
۳-۳-۹-۱ منتجه های نیرو و گشتاور پوسته های کروی FGM ۷۲
۳-۳-۹-۲ معادلات پایداری ۷۲
۳-۳-۱۰ معادلات حرکت ۷۳
۳-۳-۱۱ تغییر یکنواخت بار حرارتی(UTCL) ۷۵

فصل ۴: روش حل

۴-۱-مقدمه ۷۸
۴-۲ شرایط مرزی ۷۸
۴-۳ روش حل گلرکین ۷۹
۴-۴ تحلیل کمانش حرارتی پوسته های کروی به کمک روش گلرکین ۸۰
۴-۵ تحلیل ارتعاشی پوسته های کروی به کمک روش گلرکین ۸۱

فصل ۵: بحث و نتیجه گیری

۵-۱ مقدمه ۸۶
۵-۲ ثوابت بکار رفته در محاسبات ۸۶
۵-۳ نتایج و بررسی ۸۶
۵-۳-۱ تحلیل کمانش حرارتی ۸۷
۵-۳-۲ بررسی ارتعاشات آزاد پوسته های کروی FGM در محیط حرارتی ۱۰۴
۵-۴ نتیجه گیری ۱۱۶
۵-۵ پیشنهاداتی جهت ادامه کار ۱۱۸

مراجع ۱۱۹
ضمیمه ۱۲۶

فهرست جدول ها

عنوان جدول **صفحه**

جدول (۵-۱): خواص مکانیکی فولاد ضدزنگ و اکسید آلومینیوم ۸۶

جدول (۵-۲): کرنش کمانشی بحرانی پوسته های کروی ایزوتروپیک به ازای مقادیر مختلف h/R در زاویه کمکی $\emptyset_L = \frac{\pi}{9}$ ۸۶

جدول (۵-۳): کرنش کمانشی بحرانی پوسته های کروی ایزوتروپیک به ازای مقادیر مختلف h/R در زاویه کمکی $\emptyset_L = \frac{\pi}{6}$ ۸۹

جدول (۵-۴): کرنش کمانشی بحرانی پوسته های کروی ایزوتروپیک به ازای مقادیر مختلف h/R در زاویه کمکی $\emptyset_L = \frac{\pi}{2}$ ۹۰

فهرست شکل ها

عنوان شکل **صفحه**

شکل ۲-۱: شماتیک ساختار دو پیستون برای تجهیزات جت انجماد چند فازه ۱۷

شکل۲-۲: طرح تجهیزات تصفیه کننده (a) با استفاده از فشار گاز کنترل شده (b) با استفاده از فشار مایع کنترل شده ۲۱

شکل ۲-۳: گرادیان تخلخل در نمونه سرامیک تف جوشی شده بوسیله تصفیه فشاری ۲۲

شکل ۲-۴: گرادیان غلظت Co، سختی و سفتی شکست به همراه گرادیان اندازه دانه کاربید ۲۳

شکل۲-۵: میکروگراف یک گرادیان آلیاژ WC/Cu/Mn و توزیع فضایی مربوط به غلظت ذرات WC ۲۵

شکل ۲-۶: فرآیند ریخته گری جاذبه ای چند آلیاژی ۲۶

شکل۲-۷: کامپوزیت A356/Duralcan بعد از ۷۰۰ سیکل گرمایی در درجه حرارت 400^{oC} (a) نمونه با سطح مدرج (b) نمونه با سطح غیر مدرج ۲۷

شکل ۲-۸ : دستگاه برای آزمایشات انجماد جهتی (a) با جابه جایی طبیعی (b) با جابه جایی اجباری ۲۹

شکل ۲-۹: توزیع غلظت در آلیاژهای Al-4 wt.%Cu ، انجماد با سرعت $\mu m/s$ ۰/۹ (مربع)، $\mu m/s$ ۹/. (دایره)، $\mu m/s$ ۴۶ و $\mu m/s$ ۲۶۴ در یک کوره القایی ۲۹

شکل ۲-۱۰: تشکیل گرادیان W/Cu (a) شرایط شروع بعد از شکل گیری گریز از مرکز (b) گرادیان تخلخل بعد از تف جوشی فاز مایع (c) گرادیان W/Cu بعد از تراوش Cu ۳۱

شکل۲-۱۱: شماتیک تغییرات ریز ساختاری که در یک ماده دو فازی، بصورت افزایش کسر حجمی فاز دوم، رخ می‌دهد ۳۵

شکل ۲-۱۲: تفاوت بین ریز ساختار لایه‌ای و یک ریز ساختار با تغییرات پیوسته ۳۶

شکل ۲-۱۳: دیاگرام پروفایل ترکیب یک زوج نفوذی و شکل بعد از زمان t برای یک سیستمی که حل شوندگی جامد کاملی را از خود بروز می‌دهد ۳۸

شکل ۲-۱۴: پخش فاز بدست آمده از تغییرات توان در رابطه قانون توان ۴۰

شکل۲-۱۵: نمایش قانون اصلاح شده ترکیب ها مورد استفاده برای تخمین منحنی تنش-کرنش FGMها ۴۲

شکل ۲-۱۶: لایه های تشکیل دهنده یک چند لایه ۴۴

شکل ۳-۱: توپ صلب در گودی ۵۰

شکل ۳-۲: میله تحت بار محوری ۵۰
شکل ۳-۳: یک میله تحت بار محوری همراه با اغتشاش های کوچک ۵۱
شکل ۳-۴: توپ صلب بر روی یک تپه ۵۲
شکل ۳-۵: توپ در وضعیت تعادل با احتمال ناپایداری ۵۲
شکل ۳-۶: میله تحت کمانش محوری ۵۳
شکل ۳-۷: کمانش در همسایگی وضعیت تعادل پایدار ۵۴
شکل ۳-۸: کمانش در یک وضعیت تعادل پایدار غیر همسایه ۵۴
شکل ۳-۹: سطح مرجع پوسته به همراه دستگاه مختصات ۵۹
شکل ۳-۱۰: نمایی از پوسته کروی ۶۱
شکل ۳-۱۱: پوسته کروی دارای تکیه گاههای ساده ۶۲
شکل ۳-۱۲: نمایی از پوسته کروی FGM ۷۲
شکل ۵-۱: تغییرات کرنش بحرانی کمانشی با h/R در زوایای کمکی مختلف و کسر حجمی $k=0$ ۹۱
شکل ۵-۲: تغییرات کرنش بحرانی کمانشی با h/R در زوایای کمکی مختلف و کسر حجمی $k=0.5$ ۹۲
شکل ۵-۳: تغییرات کرنش بحرانی کمانشی با h/R در زوایای کمکی مختلف و کسر حجمی $k=1$ ۹۲
شکل ۵-۴: تغییرات کرنش بحرانی کمانشی با h/R در زوایای کمکی مختلف و کسر حجمی $k=2$ ۹۳
شکل ۵-۵: تغییرات کرنش بحرانی کمانشی با h/R در زوایای کمکی مختلف و کسر حجمی $k=5$ ۹۳
شکل ۵-۶: تغییرات کرنش بحرانی کمانشی با h/R در زوایای کمکی مختلف و کسر حجمی $k=10$ ۹۴
شکل ۵-۷: تغییرات کرنش بحرانی کمانشی با h/R در زوایای کمکی مختلف و کسر حجمی $k=1000$ ۹۴
شکل ۵-۸: تغییرات کرنش بحرانی کمانشی با h/R در زوایه کمکی$\pi/9$ و کسرهای حجمی متفاوت ۹۵
شکل ۵-۹: تغییرات کرنش بحرانی کمانشی با h/R در زوایه کمکی$\pi/18$ و کسرهای حجمی متفاوت ۹۶
شکل ۵-۱۰: تغییرات کرنش بحرانی کمانشی با کسر حجمی در $\frac{h}{R}=0.01$ و زوایای کمکی متفاوت ۹۷
شکل ۵-۱۱: تغییرات کرنش بحرانی کمانشی با کسر حجمی در $\frac{h}{R}=0.03$ و زوایای کمکی متفاوت ۹۷
شکل ۵-۱۲: تغییرات کرنش بحرانی کمانشی با کسر حجمی در $\frac{h}{R}=0.05$ و زوایای کمکی متفاوت ۹۸
شکل ۵-۱۳: تغییرات کرنش بحرانی کمانشی با کسر حجمی در $\frac{h}{R}=0.07$ و زوایای کمکی متفاوت ۹۸

شکل ۵-۱۴: تغییرات کرنش بحرانی کمانشی با کسر حجمی در $\frac{h}{R}=0.09$ و زوایای کمکی متفاوت ۹۹
شکل ۵-۱۵:تغییرات درجه حرارت بحرانی کمانشی با h/R در زوایای کمکی مختلف و کسر حجمی $k=0$ ۱۰۰
شکل ۵-۱۶:تغییرات درجه حرارت بحرانی کمانشی با h/R در زوایای کمکی مختلف و کسر حجمی $k=1$ ۱۰۱
شکل ۵-۱۷:تغییرات درجه حرارت بحرانی کمانشی با h/R در زوایای کمکی مختلف و کسر حجمی $k=5$ ۱۰۲
شکل ۵-۱۸:تغییرات درجه حرارت بحرانی کمانشی با h/R در زوایای کمکی مختلف و کسر حجمی $k=10$ ۱۰۲
شکل ۵-۱۹: تغییرات درجه حرارت بحرانی کمانشی با h/R در زوایه کمکی$\pi/9$ و کسرهای حجمی متفاوت ۱۰۳
شکل ۵-۲۰: تغییرات درجه حرارت بحرانی کمانشی با h/R در زوایه کمکی$\pi/18$ و کسرهای حجمی متفاوت ۱۰۴
شکل ۵-۲۱: تغییرات فرکانس طبیعی با h/R در کسرهای حجمی مختلف و $T=0$ و $\emptyset_{\mathrm{L}}=\frac{\pi}{6}$ ۱۰۵
شکل ۵-۲۲: تغییرات فرکانس طبیعی با h/R در کسرهای حجمی مختلف و $T=100℃$ و $\emptyset_{\mathrm{L}}=\frac{\pi}{6}$ ۱۰۶
شکل ۵-۲۳: تغییرات فرکانس طبیعی با h/R در کسرهای حجمی مختلف و $T=200℃$ و $\emptyset_{\mathrm{L}}=\frac{\pi}{6}$ ۱۰۶
شکل ۵-۲۴: تغییرات فرکانس طبیعی با h/R در کسرهای حجمی مختلف و $T=300℃$ و $\emptyset_{\mathrm{L}}=\frac{\pi}{6}$ ۱۰۷
شکل ۵-۲۵: تغییرات فرکانس طبیعی با h/R در زوایای کمکی مختلف و $k=0$ ۱۰۸
شکل ۵-۲۶: تغییرات فرکانس طبیعی با h/R در زوایای کمکی مختلف و $k=1$ ۱۰۸
شکل ۵-۲۷: تغییرات فرکانس طبیعی با h/R در زوایای کمکی مختلف و $k=2$ ۱۰۹
شکل ۵-۲۸: تغییرات فرکانس طبیعی با h/R در زوایای کمکی مختلف و $k=5$ ۱۰۹
شکل ۵-۲۹: تغییرات فرکانس طبیعی با h/R در زوایای کمکی مختلف $k=10$ ۱۱۰
شکل ۵-۳۰: تغییرات فرکانس طبیعی با h/R در زوایه کمکی $\frac{\pi}{12}$ و کسرهای حجمی مختلف ۱۱۱
شکل ۵-۳۱: تغییرات فرکانس طبیعی با h/R در زوایه کمکی $\frac{\pi}{2}$ و $k=1$ ۱۱۲
شکل ۵-۳۲: تغییرات فرکانس طبیعی با h/R در زوایه کمکی $\frac{\pi}{3}$ و $k=1$ ۱۱۳
شکل ۵-۳۳: تغییرات فرکانس طبیعی با h/R در زوایه کمکی $\frac{\pi}{6}$ و $k=1$ ۱۱۳
شکل ۵-۳۴: تغییرات فرکانس طبیعی با h/R در زوایه کمکی $\frac{\pi}{9}$ و $k=1$ ۱۱۰
شکل ۵-۳۴: تغییرات فرکانس طبیعی با h/R در زوایه کمکی $\frac{\pi}{12}$ و $k=1$ ۱۱۰
شکل ۵-۳۵: تغییرات فرکانس طبیعی با h/R در زوایه کمکی $\frac{\pi}{18}$ و $k=1$ ۱۱۱

فهرست علائم اختصاری

توضیح	علائم اختصاری
چرخش در سطح میانی در راستای	ϕ
چرخش در سطح میانی در راستای	θ
مؤلفه های کرنش عمودی و برشی در هر نقطه دلخواه از ضخامت پوسته	
مؤلفه های کرنش عمودی و برشی در سطح میانی	
انحنای خمشی	
مدول الاستیک	E
نیرو بر گشتاور بر واحد طول پوسته	
گشتاور بر واحد طول پوسته	
اختلاف دما از دمای مبنا	
ضریب انبساط حرارتی	
کسر حجمی	
ضخامت پوسته	
چگالی	
مختصات نصف النهاری	
مختصات محیطی	
شعاع پوسته کروی	
فرکانس طبیعی پوسته	
سختی الاستیک	
زاویه کمکی پوسته کروی	
۲-۷- تعداد موج محیطی	
تعداد موج نصف النهاری	
جابه‌جایی قبل از کمانش	

مودهای کمانشی

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱ مقدمه

پوسته، سازه ای نازک با سطح منحنی است که بارها را بصورت کششی، فشاری و برشی به تکیه گاه ها منتقل می‌نماید. سازه های پوسته ای به عنوان مطلوب ترین عناصر سازه ای در بخش های مختلف مهندسی از جمله مکانیک، عمران، معماری، هوافضا و دریانوردی می‌باشند. از جمله کاربرد این پوسته ها در حیطه عمران و معماری می‌توان به سازه های سقفی، سیلو ها، مخازن نگهداری مایعات و گازها و تجهیزات هسته ای اشاره نمود. در زمینه مهندسی مکانیک نیز پوسته ها می‌توانند در سیستم های لوله کشی، توربین ها و مخازن تحت فشار مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، هواپیماها، موشک ها، راکت ها، کشتی ها، زیردریایی ها و مخازن حامل سوخت مثال هایی از موارد کاربرد پوسته ها در صنایع هوافضا و مهندسی دریا می‌باشند. پوسته ها با توجه به شکل شان به چهار دسته (سین کلاستیک، آنتی کلاستیک، قابل توسعه، شکل آزاد) تقسیم می‌شوند

- اشکال سین کلاستیک (گنبد ها): دارای دو منحنی هستند که خطوط انحنای آن در هر جهت مشابه می‌باشد.
- اشکال قابل توسعه (مخروط، استوانه): در یک جهت دارای خطوط مستقیم و در جهت دیگر بصورت منحنی می‌باشند که از خمش در صفحه مسطح حاصل شده اند.
- اشکال آنتی کلاستیک (اشکال زین اسبی شامل: مخروطی، سهموی- هذلولی، شبه هذلولی): دارای انحنای مضاعف بوده که خطوط انحنا در جهت مخالف هم می‌باشند.
- اشکال آزاد: دارای فرمهای آزادی هستند که از محاسبات ریاضی بدست نمی‌آیند.

در بین این پوسته ها، پوسته های کروی مانند گنبدها به دلیل شکل ظاهری خاص خود از اهمیت ویژه ای در مقایسه با دیگر انواع پوسته ها برخوردار می‌باشند و با روند رو به افزایشی در صنعت، سازه های پیشرفته و معماری مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پوسته ها از دوران یک خط منحنی حول یک محور بوجود می‌آیند که شناخته شده ترین شکل آن گنبدهایی به شکل کره می-باشد که از دوران یک دایره حاصل شده است. اگر منحنی دایروی یک نیم دایره باشد که حول قطر خود دوران می‌کند سطح حاصل از دوران یک کره بسته است. قسمتهای عمودی پوسته، بصورت خطوط قوسی طولی (نصف النهار) و قسمتهای افقی پوسته، بصورت دایره های موازی می‌باشند. پوسته های کروی حائز اهمیت ویژه ای در ساخت مخازن نگه دارنده تحت فشار معمولی و فشار بالا بخصوص در صنایع نفت و شیمی می‌باشند. از پرکاربردترین قسمت های پوسته کروی می توان به پوسته های نیم کره و کره های کم عمق اشاره نمود که دارای کاربرد فراوانی در ساخت تانک های سوخت، اتاق احتراق، زیر دریایی و ماهوراره ها هستند.

پوسته ها یا از مواد همگن (ایزوتروپیک) ساخته می‌شوند و یا از مواد ناهمگن (کامپوزیت). از بین مواد کامپوزیت، مواد هدفمند[1] (FGM) توجه قابل توجه مهندسان و دانشمندان را برای استفاده های چند منظوره خود جذب کرده است.

افزایش خواص مکانیکی مواد مورد استفاده جهت ساخت عناصر سازه ای (پوسته، ورق ها و تیرها) و حفاظت از آنها در برابر شکست ساختاری نمونه‌هایی از چالش هایی است که در گذشته مهندسین و ماتریالیست ها با آن رو به رو بودند. FGM نقش مؤثری را جهت مواجهه با تمامی این چالش ها دارد. این مواد معمولاً بطور پیوسته و یکنواخت از فلزی با سختی بالا در سطح بیرونی تا یک ماده سرامیکی با حفاظت حرارتی بسیار عالی در سطح داخلی درجه بندی می‌شوند. FGM ها برای پاسخگویی به اهداف خاص مهندسی از دو یا چند ماده ساخته می‌شوند. این مواد بصورت یک بعدی و هم چنین چند بعدی یافت می‌شوند. از نظر میکروسکوپی FGM ها مواد کامپوزیتی ناهمگن هستند ولی از دیدگاه ماکروسکوپی خواص مکانیکی این مواد بطور پیوسته از یک سطح به سطح دیگر به آرامی با تغییر کسر حجمی مواد تشکیل دهنده تغییر می‌کند. این مواد بدلیل داشتن محافظ گرمایی می-توانند در محیط هایی با فشار بالا بخوبی مقاومت کنند. این خصوصیات به تدریج با موقعیت و دما تغییر می‌کنند. FGMها مواد کامپوزیتی پیشرفته و چند منظوره هستند که دارای کاربردهای فراوانی در تکنولوژی مدرن می‌باشند. بدلیل خاصیت تغییر پیوسته مواد در فضایی با مقیاس ماکروسکوپیک، گاهی اوقات استفاده از FGM از نظر رفتار مکانیکی نسبت به مواد با ساختار فیبری، ترجیح داده می‌شود بخصوص تحت بارهای حرارتی. چون شکاف درونی یا مرزی در آنها وجود ندارد، پیک های تنش در ساختارهای FGM زمانی که نیروی خارجی به آنها اعمال می‌گردند میرا می‌شوند و در نتیجه از شکست بدلیل عدم پیوستگی درونی و تمرکز تنش جلوگیری می‌شود.

در این بین، پوسته های کروی FGM نیز به عنوان یکی از مهمترین انواع پوسته ها در زمینه های مختلف مهندسی مانند هوا-فضا، مکانیک، دریانوردی، انرژی هسته ای، واحد تولید مواد شیمیایی، الکترونیک و بیو مواد موارد مصرف مختلفی دارند. بر این اساس، تحلیل رفتارهای مکانیکی این سازه ها تحت شرایط محیطی و بارگذاری مختلف توجه محققین را به خود جلب کرده است.

۲-۱ مروری بر تحقیقات گذشته

در سال های اخیر، تحقیقات زیادی چه بصورت عددی تحلیلی و چه به صورت عددی به بررسی رفتار های مکانیکی پوسته های کروی اختصاص داده شده است. در این قسمت نمونه هایی از مهمترین کارهای انجام شده در این زمینه ذکر می شود:

لامب[1] [۱] ارتعاشات آزاد پوسته های کروی بسته را براساس تئوری غشایی مورد بررسی قرار داد. فردرهوفر[2] [۲] همان مسئله را با استفاده از تئوری خمشی پوسته های کروی مورد مطالعه قرار داد. تا سال ۱۹۵۵ تحقیقات اندکی درباره ارتعاشات آزاد پوسته های

[1] Functionally Graded materials

کروی انجام گرفت تا اینکه رزینر[3] ، جانسون[4] و رزینر [۳و۴] ارتعاشات عرضی پوسته های کروی کم عمق را مورد مطالعه قرار دادند. پس از آن، همان مسئله براساس تئوری برشی توسط کالنینز[5] و نقدی [۵] برای ارتعاشات متقارن محوری و توسط کالنینز [۶] برای ارتعاشات نامتقارن پوسته های کم عمق مورد بحث قرار گرفت. بررسی فرکانس آزاد و شکل مود ارتعاشات آزاد پوسته های کروی باز بطور دقیق توسط کالنینز [۷] انجام گرفت. ارتعاشات آزاد پوسته های کروی عمیق توسط نقدی و کالنینز [۸]، پراساد[6] و جین[7] [۹و۱۰] مورد تحقیق قرار گرفت. شینمن[8] و گریف[9] [۱۱] ارتعاشات آزاد پوسته های تحت دوران چند لایه را با استفاده از اصل همیلتون[10] مورد بررسی قرار دادند. چاندراسخارا[11] [۱۲] رفتار ارتعاشات آزاد پوسته های منحنی شکل کامپوزیتی دو لایه را استفاده از روش المان محدود ارائه دادند. ناراسیمهن[12] وآلوار[13] [۱۳] با استفاده از روش طیفی چبیشف-گلرکین ارتعاشات آزاد پوسته کروی حلقوی ارتوتروپیک با تکیه گاه های گیر دار را مورد مطالعه قرار دادند. تحلیل ارتعاشات آزاد پوسته های کروی چند لایه با استفاده از روش المان محدود در مراجع [۱۴و ۱۵] مورد بحث قرار گرفت. تپال[14] [۱۶] با بکار بردن تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول به تحلیل مود-فرکانس پوسته های کروی چند لایه پرداخت. در بررسی انجام شده، تحلیل مود-فرکانس بر روی یک قطعه پوسته کروی چند لایه با تکیه گاه های ساده بوسیله نرم افزار اجزاء محدود انسیس[15] انجام گرفت. پاسخ های دینامیکی و استاتیکی غیرخطی پوسته های کروی با تکیه گاه های ساده و گیردار غیر متحرک توسط ناث[16] و آلوار [۱۷] با بکار بردن بسط سری چبیشف مورد تحلیل قرار گرفت. پایداری پوسته های کروی تحت بارهای اعمال شده یکی از مهمترین عواملی است که باید در مرحله طراحی مورد بررسی قرار گیرد. مقالات متعددی به بحث پیرامون تحلیل کمانش پوسته های کروی تحت بارهای مکانیکی

---

1 Lamb
2 Frederhofer
3 Reissner
4 Johnson
5 Kalnins
6 Prasad
7 Jain
8 Sheinman
9 Grief
10 Hamilton variational principle
11 Chandrasekhara
12 Narasimhan
13 Alwar
14 Topal
15 Ansys
16 Nath