

تحلیل و بررسی اثر خواص مکانیکی الاستیک بر رفتار ارتعاشاتی پوسته‌های استوانه‌ای ساخته شده از مواد با خواص گرادیانی با شرایط مرزی مختلف

میثم شکوری

دانشیار

پردیس علوم و فناوری‌های نوین

دانشگاه سمنان

shakouri@semnan.ac.ir

مرتضی خادمی کوهی*

دانشجوی دکترا

دانشکده مهندسی

دانشگاه فردوسی مشهد

Morteza.khademikouhi@mail.um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۵

چکیده

امروزه پوسته‌های استوانه‌ای دوار دارای کاربردهای صنعتی نظیر سانتریفیوژها، توربین‌ها، خشک‌کن‌ها، شفت‌های دوار، موتورها و روتورها هستند. بنابراین بررسی ارتعاشاتی آنها ضروری به نظر می‌رسد. این پژوهش به تحلیل و بررسی اثر خواص مکانیکی الاستیک بر روی رفتار پوسته مانند و تیر مانند در ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای ساخته شده از مواد با خواص گرادیانی (FGM) با شرایط مرزی مختلف با در نظر گرفتن اثر پارامتر مقیاس طول با مقادیر متفاوت و همچنین اثر شعاع و ضخامت متغیر پرداخته شده است. نتایج نشان‌دهنده این موضوع است که مدول الاستیسیته و نسبت پواسون با مقادیر مختلف تأثیری بر رفتار ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای ساخته شده از مواد دارای خواص گرادیان تأثیر ندارد و همچنین با افزایش قید (شرایط مرزی) خیز (جابه‌جایی) کمتر و فرکانس طبیعی افزایش پیدا می‌کند و با افزایش مقدار پارامتر طول اثر شرایط مرزی کاهش پیدا می‌کند. در پایان رابطه‌ای جهت نشان دادن تغییر رفتار از پوسته مانند به تیر مانند به دست آمده است. نتایج با سایر ادبیات دارای مطابقت بسیار خوبی است.

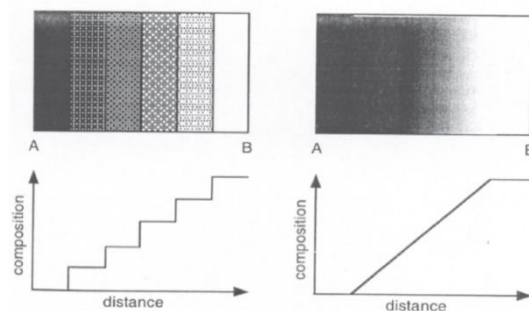
واژگان کلیدی: ارتعاشات، پوسته‌های استوانه‌ای، مواد دارای خواص گرادیان، خواص مکانیکی الاستیک، شرایط مرزی مختلف

۱. مقدمه

زیردریایی‌ها، سفینه‌ها و مثال‌هایی از استفاده پوسته‌های استوانه‌ای در هوافضا و دریا است. از مهم‌ترین اهداف در طراحی مبحث پوسته سازه، کم کردن ضخامت تا کمترین اندازه ممکن تا بدین وسیله با صرفه‌جویی اقتصادی بتوان سازه سبکی ساخت. مواد مرکب (کامپوزیت‌ها) با ترکیب مواد خالص ساخته شدند که

پوسته‌های استوانه‌ای نازک بیشترین میزان کاربرد را در بین تمامی سازه‌ها در طراحی سازه‌های مهندسی هوافضا، مکانیک، معماری، عمران و مهندسی دریایی دارا هستند. مثال‌هایی از سازه‌های پوسته استوانه‌ای در مهندسی هواپیماها، موشک‌ها،

دارای مزیت‌های بسیار خوبی هستند، اما به دلیل ناپیوستگی خواص و متفاوت بودن ضریب انبساط حرارتی موجب ایجاد تنش‌های پسماند زیادی می‌شوند که این امر باعث ایجاد ترک در لایه‌های میانی و رشد آن در قسمت‌های ضعیف‌تر می‌گردد که این موضوع خود نقطه ضعفی بوده و پاسخگوی بسیاری از نیازها نیست. به‌طور مثال امروزه با توسعه موتورهای پرقدرت در صنایع هوافضا، توربین‌ها، راکتورها و دیگر ماشین‌ها نیاز به مواد با مقاومت بالای حرارتی و مکانیکی احساس شده است. لذا فکر ساختن نوع جدیدی از مواد مرکب که خواص در آنها به‌صورت پیوسته تغییر کند و مشکلات مربوط به توزیع ناپیوسته تنش، تمرکز تنش، لایه لایه شدن مواد مرکب پیشین را نداشته باشد، دانشمندان را به سمت ساخت و تولید مواد دارای خواص گرادیان (FGM) هدایت نمود. معروف‌ترین مواد هدفمند را می‌توان نمونه‌ای از سرامیک و فلز نام برد که در یک طرف سرامیک و طرف دیگر فلز قرار دارد و خصوصیات ماده در بین این دو به‌طور پیوسته تغییر می‌کند. باید دقت شود این دو ماده وظایف ناسازگار با یکدیگر مثل مقاومت در مقابل حرارت، زنگ زدن، خوردگی در معرض محیط‌های با درجه حرارت بالا و همچنین خواص مکانیکی بالایی مانند چقرمگی و قابلیت ماشین‌کاری را به‌صورت هم‌زمان دارد.

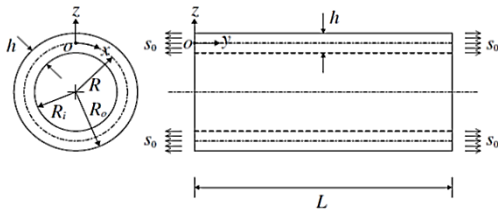


شکل ۱. نشان‌دهنده تفاوت بین ریزساختار لایه‌ای و یک ریزساختار با تغییرات پیوسته

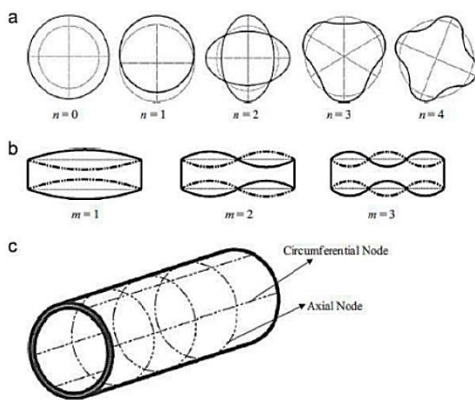
بهانگال و گانسان [۱] ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای از نوع FGM را مورد بررسی قرار دادند. تغییر مکان‌های پوسته در امتداد طولی، محیطی و شعاعی به‌صورت توابع هارمونیک مثلثاتی

در نظر گرفته شده بود، آنها توانستند با استفاده از توابع تیر متناسب با شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده، فرکانس‌های طبیعی را برای مودهای مختلف به‌دست آورند و اثر دو نسبت طول به شعاع و شعاع به ضخامت را بر روی فرکانس طبیعی مورد تحقیق قرار دادند. فرانچسکو پلیکانو [۲] به تحقیق بر روی رفتار ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای بر روی بستر الاستیک پرداخت. او میدان تغییر مکان را به‌صورت ترکیبی از توابع هارمونیک و چندجمله‌ای‌های چبیشف^۱ فرض کرد. این فرض را بر روی پوسته استوانه‌ای با شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده و دو سر گیردار مورد آزمون قرارداد و با نتیجه‌های آزمایشگاهی و عددی مورد مقایسه قرار داد. او در محاسبات تحلیلی از چندجمله‌ای درجه ۹ استفاده کرد که نتایج حاصله از هم‌گرایی بسیار خوبی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی برخوردار بود. ژوبین [۳] در پژوهش روی ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای با استفاده از روش انتشار موج که در این روش، تغییر مکان‌های طولی، محیطی و شعاعی پوسته به‌صورت توابع توانی بیان می‌شوند، پرداخت. او نتایج حاصله را برای سه شرط مرزی مختلف تکیه‌گاه ساده، دو سر گیردار و یک سر گیردار و یک سر مفصل بیان کرده است. که برای هر سه شرط مرزی از توابع تیر به‌عنوان جایگزینی برای عدد موج طولی استفاده کرده است. آمابیلی و ردی [۴] در مطالعه بر روی پوسته‌های استوانه‌ای، تئوری تغییر شکل برشی را برای درجات بالاتر توسعه دادند تا از آن جهت حل معادلات غیرخطی استفاده کنند. لیسا [۵-۶] در کتاب‌های خود به بررسی دقیق و جامع ارتعاشات صفحات و ارتعاشات پوسته‌ها پرداخته است. سودل [۷] در کتاب ارتعاشات صفحات و پوسته‌های خود ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای را مورد مطالعه دقیق قرار داده است. ژائو و همکاران [۸] پاسخ استاتیکی و ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای ساخته شده از مواد دارای خواص گرادیان را با فرض تغییرات به‌طور پیوسته در راستای عمق، از روش کاپی-ریتز و با استفاده از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول برای پوسته به‌دست آورده‌اند. در این پژوهش اثرات عواملی مانند خواص مواد، شرایط

استوانه‌ای دایره‌ای نشان می‌دهد. بخش دوم اثرات پارامترهای مختلف را بر روی شکل مود و فرکانس‌های طبیعی پوسته‌های استوانه‌ای شکل نشان می‌دهد. شکل ۲ هندسه یک پوسته استوانه‌ای و شکل ۳ شکل مودهای پوسته استوانه‌ای را نشان می‌دهند. که در آن قطر سطح مقطع دایروی و h ضخامت پوسته و R شعاع است.



شکل ۲. هندسه پوسته استوانه‌ای

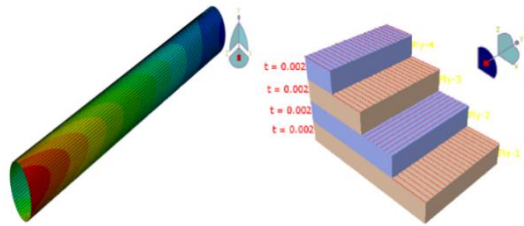


شکل ۳. شکل مودهای یک پوسته استوانه‌ای

۲. روش اجزای محدود

شبیه‌سازی پوسته استوانه‌ای ساخته شده از مواد متغییر تابعی با شرایط تکیه‌گاهی مختلف در نرم‌افزار المان محدود آباکوس با مشخصات مکانیکی معرفی شده در ۱ شبیه‌سازی شده است. شماتیک و هندسه نمونه مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است.

مرزی، کسر حجمی، نسبت طول به ضخامت پوسته، بر روی ارتعاشات آزاد مورد پژوهش قرار گرفته است. هم‌گرایی جواب‌ها با تغییر تعداد گره‌ها برای اطمینان‌سازی نتایج مورد مطالعه قرار گرفته است. قاسمی و همکاران [۹] ارتعاش آزاد ریز پانل استوانه‌ای کامپوزیت مبتنی بر نانولوله پیزوالکتریک نیتريد بور را که در یک محیط الاستیک در معرض پتانسیل الکتریکی از طریق نظریه گرادیان کرنش اصلاح شده قرار داده شده است، مورد پژوهش قرار دادند. نتایج معرف این موضوع است که با بیشتر شدن نسبت L/R ، سفتی میکروپانل کمتر می‌گردد و همچنین فرکانس طبیعی کمتر می‌شود. همچنین با بیشتر شدن این نسبت، میزان کاهش فرکانس طبیعی نیز بیشتر می‌شود. همچنین بیشتر شدن کسر حجمی BNNT می‌تواند سفتی میکروپانل را افزایش داده که این خود منجر به بیشتر شدن فرکانس طبیعی می‌شود. همچنین با بیشتر شدن این پارامتر میزان افزایش فرکانس طبیعی کمتر می‌گردد. تحقیقات خان‌احمدی و همکاران [10-13] براساس استفاده از پاسخ‌های ارتعاشی (فرکانس‌ها و شکل‌های مود) و مفاهیمی همچون معیار هم‌بستگی مودال^۲ و تبدیل موجک به شناسایی و تشخیص آسیب در ستون‌های کامپوزیت CFST و اعضای کامپوزیت صفحه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصله بیانگر این موضوع است که با بررسی و تحلیل پاسخ‌های ارتعاشی وضعیت‌های اولیه و ثانویه می‌توان پایش سلامتی در عضو کامپوزیتی را تعیین نمود. فونگ و بک [۱۴] مطالعه‌ای را روی پوسته استوانه‌ای متغییر تابعی تقویت شده، تحت بار محوری فشاری، فشار خارجی و بار پیچشی انجام دادند. پوسته‌ی مورد آزمایش آنها شامل رینگ و تقویت کننده در سطح داخلی و خارجی بود. آنها معادلات حاکم را با استفاده از تئوری کلاسیک محاسبه نموده و به‌وسیله روش گالرکین آن را حل کردند. اولیازاده و همکاران [۱۵] یک روش تحلیلی دقیق جهت پژوهش روی ارتعاش آزاد پوسته‌های استوانه‌ای دایره‌ای ساده توسعه دادند. بخش اول یک رویکرد کلی برای تجزیه و تحلیل دقیق فرکانس‌های طبیعی و شکل حالت پوسته‌های



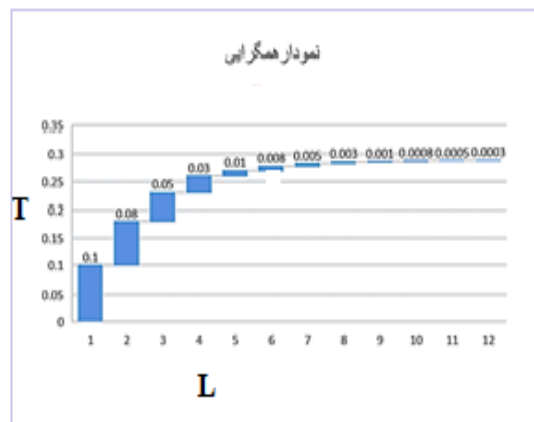
شکل ۴. مدل المان محدود پوسته استوانه‌ای FGM

برای اعمال شرایط مرزی نکته زیر مورد توجه قرار گرفته است: ۱- در این تحلیل عددی برای شرایط مرزی در ابتدا و انتها آزاد و بدون قید مقدار ۶ فرکانس طبیعی اول پوسته استوانه‌ای برای طول‌ها و ضخامت‌های مختلف صفر یا بسیار کوچک به دست آمده است که از آن می‌توان صرف‌نظر کرد.

جدول ۱. خواص سازنده پوسته استوانه‌ای FGM

نسبت پواسون	مدول برشی	چگالی	ماده
	GPa	kg/m ³	
۰/۳	۲۸/۶۱	۲۷۰۰	آلومینیوم (فلز)
۰/۳۳	۱۴۵/۱۵	۳۸۰۰	آلومینا (سرامیک)

تعداد المان‌ها ۷۶۵۰ و اندازه مش ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است. هم‌گرایی مش برای نسبت ضخامت به طول پوسته را در شکل ۵ به وضوح می‌توان مشاهده نمود.



شکل ۵. نمودار هم‌گرایی مش

در این قسمت به بررسی نتایج حاصله از تحلیل عددی برای پوسته استوانه‌ای ساخته شده از مواد با خواص گرادیانی شامل سرامیک و فلز (سرامیک از جنس آلومینا و فلز از جنس آلومینیوم انتخاب شده است) پرداخته می‌شود. مشخصات و خواص سازنده پوسته استوانه‌ای FGM در جدول ۱ مشاهده می‌شود. توابع مدرج برای پوسته استوانه‌ای ساخته شده از مواد هوشمند به صورت زیر است:

$$E(z) = (E_m - E_c) \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^r + E_c \quad (۱)$$

$$V_z = (V_m - V_c) \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^r + V_c \quad (۲)$$

$$P_z = (P_m - P_c) \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^r + P_c \quad (۳)$$

که در اینجا E_m معرف مدول الاستیسیته سرامیک و E_c مدول الاستیسیته فلز (آلومینیوم) است. همچنین V_m معرف نسبت پواسون فلز و V_c معرف نسبت پواسون سرامیک می‌باشد. P_m چگالی فلز و P_c معرف چگالی سرامیک است. در تئوری دانل-مشتری رابطه برای پارامتر طولی که در آن پوسته از پوسته مانند به تیر مانند تغییر رفتار می‌دهد به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود:

$$Lehe = 5.847 \sqrt[4]{(1 - V^2)} \quad (۴)$$

در تئوری فلوگه این رابطه با بهینه شدن ضریب به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Lehe = 5.284 \sqrt[4]{(1 - V^2)} \quad (۵)$$

در این مطالعه با استفاده از مقدار پارامتر طول برای ۱۳۳ نمونه پوسته استوانه‌ای با ضخامت‌ها و شعاع‌های مختلف که در آن پوسته استوانه از پوسته مانند به تیر مانند تغییر رفتار داده است مقادیر Le که نسبت طول به شعاع (L/R) و he که نسبت جذر

ضخامت به شعاع $\left(\sqrt{\frac{h}{R}}\right)$ است محاسبه می‌شود. در جدول ۲

مقادیر فرکانس بی بعد شده از طریق رابطه

$$\Omega = \omega R \sqrt{(1 - V^2) \rho / E}$$

برای طول‌های مختلف نشان داده شده

است. و در ادامه می‌توان ضریب بهینه شده را بدین شرح بیان کرد:

$$Lehe = 4.49\sqrt[4]{(1 - V^2)} \quad (۶)$$

که در رابطه (۶) L بیانگر طول و R شعاع و h ضخامت است.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای طول و ضخامت و شعاع و فرکانس طبیعی پوسته استوانه‌ای FGM

ردیف	طول	شعاع	ضخامت	فرکانس طبیعی بی بعد شده
	m	m	m	
۱	۰/۱۱۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۱	۹۲۶/۱۱
۲	۰/۰۸	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۲	۱۸۴۴/۷
۳	۰/۰۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۳	۲۴۰۶/۹
۴	۰/۰۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۴	۳۲۷۱

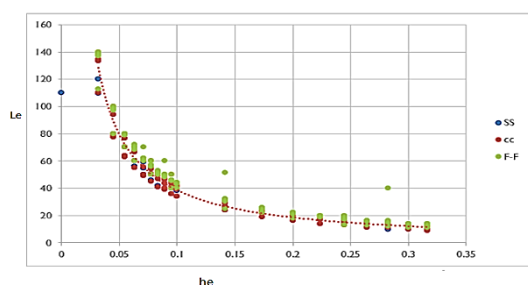
جدول ۳. نتایج پوسته استوانه‌ای FGM با نسبت پواسون‌های مختلف

ردیف	طول	نسبت پواسون	فرکانس طبیعی	Le	he
	m	بی بعد	بی بعد		
۱	۰/۱۴	۰/۱۸	۵۸۴۳/۸	۱۴	۰/۳۱۶۲۲۸
۲	۰/۱۴	۰/۲	۵۸۴۱/۳	۱۴	۰/۳۱۶۲۲۸
۳	۰/۱۴	۰/۲۲	۵۸۳۸/۸	۱۴	۰/۳۱۶۲۲۸
۴	۰/۱۴	۰/۲۴	۵۸۳۶/۳	۱۴	۰/۳۱۶۲۲۸
۵	۰/۱۴	۰/۲۶	۵۸۳۳/۸	۱۴	۰/۳۱۶۲۲۸
۶	۰/۱۴	۰/۲۸	۵۸۳۱/۳	۱۴	۰/۳۱۶۲۲۸
۷	۰/۱۴	۰/۳	۵۸۲۸/۸	۱۴	۰/۳۱۶۲۲۸
۸	۰/۱۴	۰/۳۲	۵۸۶۲/۳	۱۴	۰/۳۱۶۲۲۸
۹	۰/۱۴	۰/۳۴	۵۸۲۳/۸	۱۴	۰/۳۱۶۲۲۸
۱۰	۰/۱۳	۰/۳۶	۶۶۴۷/۲	۱۳	۰/۳۱۶۲۲۸
۱۱	۰/۱۳	۰/۳۸	۶۶۴۴	۱۳	۰/۳۱۶۲۲۸
۱۲	۰/۱۳	۰/۴	۶۶۴۰/۹	۱۳	۰/۳۱۶۲۲۸

جدول ۴. نتایج پوسته استوانه‌ای با مدول یانگ مختلف

$L(m)$	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴
$E(GPa)$	۳	۷۰	۱۰۰	۱۵۰	۱۸۰	۲۱۰	۲۴۰	۳۰۰
he	۰/۳۱۶۲۲۸	۰/۳۱۶۲۲۸	۰/۳۱۶۲۲۸	۰/۳۱۶۲۲۸	۰/۳۱۶۲۲۸	۰/۳۱۶۲۲۸	۰/۳۱۶۲۲۸	۰/۳۱۶۲۲۸
Le	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴

استوانه‌ای ساخته شده از مواد با خواص گرادایانی تأثیری ندارد.



شکل ۶. نمودار شرایط مرزی مختلف بر رفتار پوسته استوانه‌ای از پوسته مانند به تیر مانند

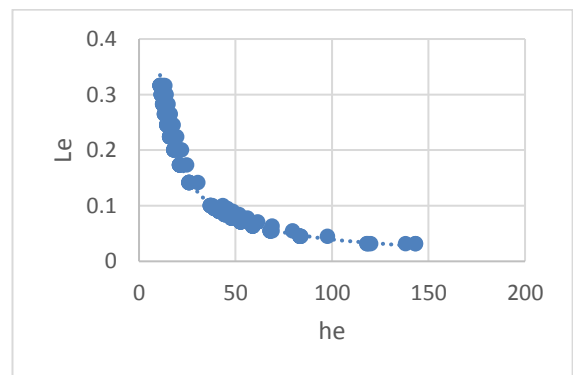
همان‌طور که در نمودار ۶ مشاهده می‌شود برای شرایط مرزی دو سر آزاد (FF) و شرایط مرزی دو سر تکیه گاهی ساده (SS) و شرایط مرزی دو سر تکیه گاهی گیردار (CC)، با توجه به نتایج این نمودار تأثیر شرایط مرزی بر روی رفتار ارتعاشاتی پوسته استوانه‌ای نازک ساخته شده از مواد با خواص گرادایانی را می‌توان بدین صورت بررسی کرد که پوسته استوانه‌ای نازک ساخته شده از مواد با خواص گرادایانی با شرایط مرزی مختلف، نمودار روند نزدیک به هم دارد لذا نتایج حاصل از روش اجزای محدود (تحلیل عددی) بسیار به هم نزدیک است و اختلاف بسیار ناچیزی دارا هستند که می‌توان از آن صرف‌نظر نمود و این موضوع بیانگر آن است که اثرات شرایط مرزی بر رفتار ارتعاشاتی پوسته استوانه‌ای ساخته شده از مواد با خواص گرادایانی بسیار کم است و همچنین

همچنان که از جدول ۳ دریافت می‌شود با توجه به نتایج این جدول‌ها تأثیر پارامتر نسبت پواسون بر ارتعاشات پوسته استوانه‌ای نازک متغییر تابعی را می‌توان این‌گونه شرح داد که برای پوسته استوانه‌ای نازک ساخته شده از مواد با خواص گرادایانی به‌ازای مقادیر نسبت پواسون‌های مختلف پارامتر Le و پارامتر he روند یکنواختی دارا است بدین صورت که در شعاع ثابت $R=0/01$ و ضخامت ثابت $h=0/01$ با تغییرات مقدار پارامتر نسبت پواسون مشاهده می‌شود که مقدار پارامتر طولی که در آن شکل مود $n=1$ شده است مقدار یکسانی برای Le و پارامتر he یکسان حاصل شده است که بیانگر این موضوع است که نسبت پواسون بر روی رفتار ارتعاشاتی پوسته استوانه‌ای ساخته شده از مواد با خواص گرادایانی تأثیری ندارد. همچنین از جدول ۴ دریافت می‌شود با توجه به نتایج این جدول‌ها تأثیر پارامتر مدول یانگ مختلف بر ارتعاشات پوسته استوانه‌ای نازک متغییر تابعی را می‌توان این‌گونه شرح داد که برای پوسته استوانه‌ای نازک ساخته شده از مواد با خواص گرادایانی به‌ازای مقادیر مدول یانگ‌های مختلف پارامتر Le و پارامتر he روند یکنواختی دارا هستند بدین صورت که در شعاع ثابت $R=0/01$ و ضخامت ثابت $t=0/01$ با تغییرات مقدار پارامتر مدول یانگ مشاهده می‌شود که مقدار پارامتر طولی که در آن شکل مود $n=1$ شده است مقدار یکسانی برای Le و پارامتر he یکسان حاصل شده است که بیانگر این موضوع است که مدول یانگ‌های مختلف بر روی رفتار ارتعاشاتی پوسته

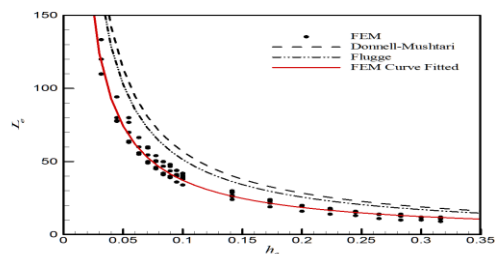
این نکته دریافت می‌شود که با افزایش طول اثرات شرایط مرزی کم می‌شود.

۳. صحت سنجی نتایج

با مطابقت نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی موجود و برای اطمینان از صحت و هم‌گرایی جواب‌های حاصل از تحلیل عددی، نتایج را با نتایج مقاله راه‌حل‌های دقیق برای ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای دایره‌ای شکل با شرایط مرزی کلاسیک نوشته ژینگ و همکاران [۱۶] که در این پژوهش به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شده است مطابقت داده می‌شود. با قیاس جواب‌ها با نتایج مقاله مشاهده می‌شود که نتایج حاصله از شبیه‌سازی عددی مطابقت بسیار خوبی با نتایج مراجع و سایر ادبیات دارا است. مطابقت و هم‌نشینی نتایج از تحلیل عددی را با نتایج تحلیل تجربی در شکل ۷ می‌توان مشاهده نمود.



شکل ۷. نمودار نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی رفتار پوسته استوانه‌ای متغیر تابعی از پوسته مانند به تیر مانند



شکل ۸. نمودار مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی رفتار پوسته استوانه‌ای متغیر تابعی با نتایج تئوری های دانل-مشرتی و فلوگه

شکل ۸ مقایسه بین نتایج مطالعه حاضر را با نتایج تحقیق دانل و فلوگه نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل ۷ و ۸ دریافت می‌شود، از مطابقت نتایج با نتایج تحلیل تجربی مشاهده می‌شود که نتایج حاصله از تحلیل عددی بسیار نزدیک به نتایج تحلیل تجربی بوده و کاملاً با نتایج تحلیل تجربی مطابقت و هم‌نشینی خوبی دارد که معرف دقت و صحت نتایج حاصل از تحلیل عددی است که در آن شعاع $0.1 < R < 0.001$ و نسبت پواسون $0.4 < \nu < 0.18$ و $0.1 < h/R < 0.001$ است.

۴. نتیجه‌گیری

از نتایج حاصل از تحلیل رفتار تیر مانند و پوسته مانند در ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای ساخته شده از مواد با خواص گرادیانی نتایج زیر دریافت می‌شود:

- ضخامت پوسته‌های استوانه‌ای اثرات بسیار زیادی بر روی رفتار ارتعاشاتی پوسته استوانه‌ای ساخته شده از مواد با خواص گرادیانی می‌گذارد. با تحلیل پوسته استوانه‌ای ساخته شده از مواد با خواص گرادیانی با نسبت‌های مختلف شعاع به ضخامت اثر این پارامتر دریافت می‌شود که با افزایش نسبت شعاع به ضخامت و کاهش ضخامت پوسته، مقدار پارامتر طول که در آن پوسته از پوسته مانند به تیر مانند تغییر رفتار می‌دهد کمتر شده است.
- با تغییر طول استوانه ساخته شده از مواد با خواص گرادیانی برای نسبت‌های مختلف L/R مشاهده می‌شود که در پوسته استوانه‌ای ساخته شده از مواد با خواص گرادیانی با کم شدن نسبت L/R مقدار پارامتر طول که در آن پوسته از پوسته مانند به تیر مانند تغییر رفتار می‌دهد بیشتر شده است. و با کم شدن نسبت L/R نسبت h/R بیشتر شده است. نیز مقدار ضریب بهینه شده و به عدد $4/49$ نزدیک‌تر می‌گردد. با بیشتر شدن نسبت L/R مقدار پارامتر طولی که پوسته در آن از پوسته مانند به تیر مانند تغییر رفتار می‌دهد نیز بیشتر می‌گردد.
- با کاهش مقدار پارامتر طولی مقدار ضریب به عدد $4/49$

نزدیک‌تر می‌شود.

L/R تأثیر شرایط مرزی کاهش یافته است. به عبارت دیگر با

افزایش طول اثر شرایط مرزی کاهش یافته است.

- افزایش قید (شرایط مرزی) یعنی مدل (سازه) را محکم‌تر کرده پس خیز (جاب‌جایی) کمتر و فرکانس طبیعی افزایش می‌یابد.
- نسبت پواسون‌های مختلف بر رفتار ارتعاشی پوسته استوانه‌ای تأثیر ندارد.
- مدول یانگ‌های مختلف بر رفتار ارتعاشی پوسته استوانه‌ای تأثیر ندارد.

- در این پژوهش شرایط مرزی دو سر آزاد (FF)، تکیه‌گاهی ساده (SS)، تکیه‌گاهی گیردار (CC) مورد بررسی قرار گرفته است. ملاحظه می‌شود که شرایط مرزی تکیه‌گاهی گیردار عملاً قید بیشتری نسبت به شرایط مرزی تکیه‌گاهی ساده و آزاد بر پوسته استوانه‌ای اعمال می‌کند. با بررسی نتایج حاصل از شرایط مرزی مختلف بر روی رفتار ارتعاشی پوسته استوانه‌ای دریافت می‌شود که شرایط مرزی تأثیر بسیار ناچیز داشته که می‌توان از آن صرف‌نظر نمود. در ضمن با افزایش نسبت

۵. مأخذ

- [1] Bhangale, R. K., and Ganesan, N., "Free vibration studies of simply supported nonhomogeneous functionally graded magneto-electro-elastic finite cylindrical shells", *Journal of Sound and Vibration*, 2005, Vol.288, pp.412-422.
- [2] Pellicano, F., "Vibrations of circular cylindrical shells Theory and experiments", *Journal of Sound and Vibration*, 2007, Vol.303, pp.154-170.
- [3] Xuebin, L., "Study on free vibration analysis of circular cylindrical shells using wave propagation", *Journal of Sound and Vibration*, 2008, Vol.311, pp. 667-682.
- [4] Amabili, M., and Reddy, J. N., "A new non-linear higher-order shear deformation theory for large-amplitude vibrations of laminated doubly curved shells", *International Journal of Non-linear Mechanics*, 2010, Vol.45, pp.409-418.
- [5] W. Leissa, *Vibration of Shells (NASA SP-288)*, US Government Printing Office, Washington, DC, 1973.
- [6] W. Leissa, "Vibration of plates", National Aeronautics and Space Administration, Washington, D. C., 1969.
- [7] W. Soedel, "Vibrations of Shells and Plates", 3rd ed., Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [8] Zhao X., Lee Y.Y., Liew K.M., "Thermoelastic and Vibration Analysis of Functionally Graded Cylindrical Shells", *Journal of Mechanical Sciences*, 2009, Vol.51, no.10, pp.694-707.
- [9] Ghasemi Ghalebahman A, Bigdeli-Yeganeh M, Cheloeian E, Khademi-Kouhi M. Free vibration of piezoelectric boron nitride nanotube-based composite cylindrical micropanel embedded in an elastic medium subjected to electric potential via modified strain gradient theory, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020, Vol.234, no.12, pp.2309-28.
- [10] Khanahmadi, M., Rezayfar, O., Gholhaki, M., "Damage detection of prefabricated walls (panel 3D plates) based on wavelet transform detection algorithm", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2021, Vol.8, no.8, pp.289-309.
- [11] Khanahmadi, M., Gholhaki, M., Ghasemi-Ghalebahman, A., Khademi-Kouhi, M., 'Damage detection in laminated composite plates using wavelet analysis analytical method', *Journal of Vibration and Sound*, 202, Vol.10, no.20, pp. 144-156.
- [12] Mamazizi, A., Khanahmadi, M., Nobakht Vakili, K., "Debonding damage detection and assessment in a CFST composite column using nodal dynamic data", *Sharif Journal of Civil Engineering*. 2022.
- [13] Khanahmadi, M., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and Younesi, A., "Detection of debonding damage location of the concrete core from the steel tube of concrete-filled steel tube (CFST) columns using

wavelet analysis analytical method”, *Modares Civil Engineering journal*, 2023, Vol.22, no.1, pp.129-142

- [14] Phuong N.T., Bich D.H., “Buckling Analysis of Eccentrically Stiffened Functionally Graded Circular Cylindrical Thin Shells Under Mechanical Load”, *Journal of Mathematics – Physics*, 2013, Vol.29. no.2, pp.55-72.
- [15] P. Oliazadeh, M.H. Farshidianfar, A. Farshidianfar, “Exact analysis of resonance frequency and mode shapes of isotropic and laminated composite cylindrical shells; Part II: Parametric studies”, *J. Mech. Sci. Technol.*, 2013, Vol.27, pp.3645-3649.
- [16] Y. Xing, B. Liu, T. Xu, “Exact solutions for free vibration of circular cylindrical shells with classical boundary conditions”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, Vol.75, pp.178–188.

پی نوشت:

-
1. Chebyshev Polynomials
 2. Modal Assurance Criterion
 3. Kp-Ritz
 4. boron nitride nanotubes
 5. Concrete Filled Steel tube columns
 6. Strengthen
 7. Donnell-Mushtari theory
 8. Flugge theory