



Numerical Investigation of Transverse Parabolic Curvature Effects on the Dynamic Behavior of Fluid-Coupled Stiffened Metallic Shells

Amir Hossein Alavinia^{1*}, Mahmoud Salari²

¹ Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

Email Address: a.h.alavinia@ihu.ac.ir

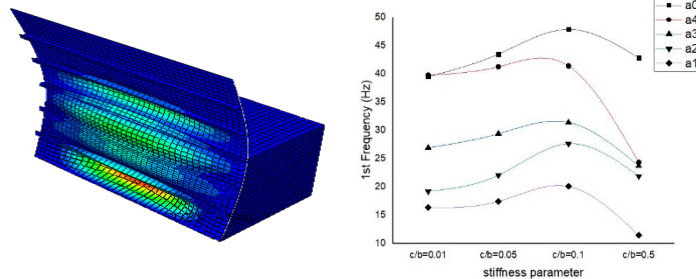
² Professor, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran. Email

Address: m.salari@ihu.ac.ir

HIGHLIGHTS

- The effect of increasing the parabolic curvature of the shell on the natural frequency
- Investigating the effect of shell thickness on nonlinear behavior caused by increased curvature
- Investigating the effect of the added mass caused by the interaction of the shell with the fluid on increasing the curvature of the shell

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 10 April 2025

Received in revised form: 16 August 2025

Accepted: 18 September 2025

Available online: 29 September 2025

Keywords:

Natural Frequency

stiffened parabolic shell

Free vibrations

Fluid and structure interaction (FSI)

Longitudinal Stiffener

ABSTRACT

The extensive applications of stiffened shells in shipbuilding necessitate a thorough understanding of the dynamic behavior of vessel hull structures within their actual operational environments. Among various factors, fluid-structure interaction and parameters influencing hull geometry are particularly significant. This study investigates the modal analysis of stiffened metallic parabolic shells, employing the finite element software ABAQUS. The primary focus is on the impact of transverse parabolic curvatures on the shell's fundamental natural frequency under different fluid-shell interaction scenarios. To validate the numerical method, the effect of wetted surface area on the vibrational frequencies of cylindrical shells in contact with water was assessed at various immersion depths. Evaluation of 80 extracted vibrational modes across four shell thicknesses revealed a distinct frequency peak at a specific curvature ($C/b = 0.1$). Notably, the location of this peak remained independent of changes in shell thickness and water contact height, being solely dependent on shell geometry (shape and curvature). The peak frequency value increased with increasing shell thickness. In the absence of water contact (a_0), this trend was observed at thicknesses of 5 to 20 mm, with peak frequencies of 28.916, 41.383, 44.481, and 47.923 Hz, respectively.

Cite this article: Alavinia A.M, Salari M. Investigation of Numerical Investigation of Transverse Parabolic Curvature Effects on the Dynamic Behavior of Fluid-Coupled Stiffened Metallic Shells. *Aerospace Mechanics*. 2025; 21(3):27-49. DOI: <https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1480>

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University.





بررسی عددی تاثیرانحنای سهموی عرضی بر رفتار دینامیکی پوسته فلزی تقویت شده با تقویت کننده‌های طولی در تماس با سیال

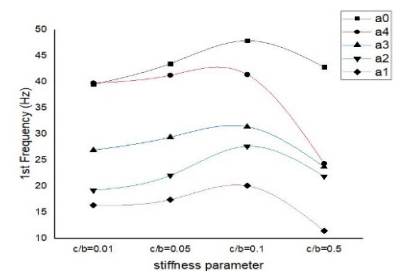
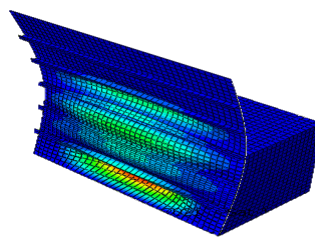
امیرحسین علوی نیا^۱، محمود سالاری^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین(ع)، تهران، ایران رایانامه: a.h.alavinia@ihu.ac.ir
^۲ استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین(ع)، تهران، ایران. رایانامه(نویسنده مسئول): m.salari@ihu.ac.ir

برجسته‌ها

- تأثیر افزایش انحنای سهموی پوسته بر فرکانس طبیعی
- بررسی تأثیر ضخامت پوسته بر رفتار غیرخطی ناشی از افزایش انحنا
- بررسی تأثیر جرم افزوده ناشی از اندرکنش پوسته با سیال بر افزایش انحنا پوسته

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:
 نوع مقاله: علمی پژوهشی
 دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱
 بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵
 پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷
 ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷
 کلیدواژه‌ها:
 فرکانس طبیعی
 پوسته سهموی تقویت شده
 تقویت کننده طولی
 ارتعاشات آزاد
 اندرکنش سیال و سازه...

چکیده

با توجه کاربردهای فراوان پوسته‌های تقویت شده در صنایع کشتی‌سازی، شناسایی رفتار دینامیکی سازه بدنه شناور نیازمند درکی صحیح از محیط عملکرد واقعی این سازه‌ها است. در این میان نقش دو عامل اندرکنش سیال - سازه و نیز پارامترهای تأثیرگذار بر هندسه بدنه از سایر عوامل برجسته‌تر است. در پژوهش حاضر، تحلیل مودال پوسته‌های سهموی تقویت شده فلزی با رویکرد تاثیرانحنای سهموی عرضی پوسته بر فرکانس طبیعی نخست آن در سناریوهای مختلف تماس سیال با پوسته به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس بررسی گردیده است. جهت اعتبارسنجی روش عددی، اثر سطح خیس شده پوسته‌های استوانه‌ای در تماس با آب بر فرکانس‌های ارتعاشی در عمق‌های مختلف غوطه‌وری مورد ارزیابی قرار گرفت. با ارزیابی ۸۰ مود ارتعاشی استخراجی پوسته در ۴ ضخامت مختلف آن، مشخص گردید که در یک انحنای خاص ($C/b=0.1$)، شاهد تشکیل یک پیک یا قله فرکانسی هستیم که مکان این پیک، مستقل از تغییرات ضخامت پوسته و نیز ارتفاعات مختلف تماس آب با آن بوده و وابسته به هندسه پوسته (شکل و انحنا) است. مقدار پیک فرکانسی با افزایش ضخامت پوسته افزایش می‌یابد. این روند در حالت بدون تماس آب با پوسته ($a=0$)، در ضخامت‌های ۵ تا ۲۰ میلی متر به ترتیب ۲۸,۹۱۶، ۴۱,۳۸۳، ۴۴,۴۸۱ و ۴۷,۹۲۳ هرتز قابل مشاهده است.

استناد: علوی نیا امیرحسین، سالاری محمود. بررسی عددی تاثیرانحنای سهموی عرضی بر رفتار دینامیکی پوسته سهموی فلزی تقویت شده با تقویت کننده های طولی در تماس با سیال. هوافضا. (۱۴۰۴); ۲۱(۳): ۲۷-۴۶. DOI: <https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1480>

نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند. ©



ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).

OPEN ACCESS

۱- مقدمه

پدیده ارتعاشات از دیرباز یکی از عوامل مخرب سازه‌ای بوده و این پدیده در سازه‌هایی که در معرض بارهای تکرارشونده و اتفاقی هستند، بیشتر موردتوجه است. شناورها همواره در معرض بارهای مولد ارتعاش؛ مانند کوبش، تغییرات توزیع فشار در پاشنه در اثر کارکرد پروانه، و... هستند. در این میان به علت فرکانس بالای ارتعاشات محلی سازه نسبت به دیگر سطوح تحلیل بیشترین آسیب سازه‌ای و صدای مزاحم متوجه این دسته از ارتعاشات بدنه شناور خواهد بود؛ لذا تحلیل مودال پوسته‌های سهموی تقویت شده در تماس با سیال، به‌عنوان قطعی از بدنه شناورها امری اجتناب‌ناپذیر است. تا کنون تلاش‌های بسیاری توسط دانشمندان برای پیش‌بینی فرکانس‌های طبیعی پوسته‌های در تماس با سیال صورت پذیرفته است.

شانگ ماو و سان لی‌پینگ [۱] تأثیر فشار هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک بر روی فرکانس‌های طبیعی و انعکاس صدا در پوسته‌های استوانه‌ای مستدیر زیر آب را مطالعه نمودند. در این پژوهش مشخص گردید که در حالت زیر آب و با در نظر گرفتن فشار هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک، فرکانس‌های طبیعی کاهش یافتند. شین‌پینگ ژو [۲] با بررسی جامع تأثیرات سرعت سیال، مدول یانگ، اندازه و تعداد تقویت‌کننده‌ها بر فرکانس طبیعی و ویژگی‌های ناپایداری پوسته‌های استوانه‌ای نازک با تقویت حلقوی که سیال را منتقل می‌کنند به این نتیجه رسید که تقویت‌کننده‌ها می‌توانند تعداد موج‌های محیطی را در حالت بنیادی کاهش دهند. قدس بین جهرمی و حاتمی [۳] رفتار لوله‌های فلزی مشبک و تأثیر اندازه سطح مقطع و چند لایه کردن لوله‌ها تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری با سرعت کم را به صورت عددی مطالعه نمودند. آنها دریافتند که با افزایش اندازه سطح مقطع، نیروی لهیدگی اولیه و ظرفیت جذب انرژی افزایش یافت. همچنین چند لایه نمودن لوله‌ها موجب بهبود بازده لهیدگی و افزایش ظرفیت جذب انرژی گردید. همچنین در پژوهشی دیگر حاتمی و فتح‌اللهی [۴]، تأثیر اینرسی در رفتار فروریزش جاذب مشبک تک سلولی و دو سلولی تحت بارگذاری ضربه‌ای را به صورت عددی و نظری بررسی نمودند. نتیجه پژوهش آنها نشان داد که تحت تأثیر اینرسی،

رفتار دینامیکی جاذب‌ها تحت بارگذاری ضربه‌ای متفاوت از بارگذاری استاتیکی است. باچکارا و همکاران [۵] تحلیل ارتعاشات فضایی پوسته‌های استوانه‌ای هم‌محور که بخشی از آن‌ها با مایع پر شده است پرداختند. بررسی تأثیر سطح مایع و اندازه شکاف بر روی فرکانس‌های طبیعی و حالت‌های ارتعاشی از نوآوری‌های پژوهش آنها بود. حاتمی و حسینی [۶] تحلیل الاستیک - پلاستیک حاصل اندرکنش گشتاور خمشی - نیروی محوری در تیر فلزی T شکل را مطالعه نمودند. مدل‌سازی رفتار الاستیک - پلاستیک به جای استفاده از مدل‌های پلاستیک کاملاً سخت از نوآوری‌های مطالعه آنها بود. ویسواناتان و مات داود [۷] با استفاده از نظریه تغییر شکل برشی مرتبه اول (FSDT) برای مدل‌سازی پوسته‌ها و همچنین استفاده از روش اسپلین برای تقریب توابع جابجایی و چرخش، به بررسی رفتار ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای لایه‌ای متقارن پر شده با سیال پرداختند. آنها دریافتند که فرکانس‌های طبیعی پوسته‌های پر شده با سیال، پایین‌تر از فرکانس طبیعی پوسته‌های خالی بود که نشان‌دهنده اثر جرم افزوده سیال بر روی پوسته است. دانش‌پژوه و همکاران [۸] با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری هسته و تأثیر آن بر رفتار دینامیکی پوسته‌ها، به تحلیل ارتعاشات پوسته استوانه‌ای مستدیر ساندویچی با هسته نرم حاوی مایع پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش نسبت ضخامت هسته به ضخامت کل، فرکانس‌های طبیعی در پوسته‌های خیس به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد. دهقان و همکاران [۹] ارتعاش آزاد پوسته‌های استوانه‌ای مستدیر ساخته شده با مواد تابعی مدرج (FGM) در بستر الاستیک پاسترناک و در محیط حرارتی را با در نظر گرفتن تعامل ساختاری - سیالی بررسی نمودند. آنها دریافتند که با افزایش عمق سیال و تغییرات دما، فرکانس‌های طبیعی کاهش یافتند. کرمی و همکاران [۱۰] تحلیل مودال تجربی و عددی یک پوسته نیم‌کره‌ای آلومینیومی تحت تأثیر سیال درون آن را بررسی نمودند. نتایج پژوهش آنها حاکی از آن بود که تعامل سیال با پوسته باعث تغییرات در ویژگی‌های دینامیکی ساختار می‌شود. این تأثیرات شامل افزایش نسبت دما و کاهش فرکانس‌های مدول بود. حاتمی و همکاران [۱۱] در پژوهشی به بررسی و مطالعه بررسی اثر تقویت‌کننده‌های

افزایش یافت. لیو و همکاران [۱۹] به مطالعه ارتعاشات آزاد و اجباری پوسته های استوانه ای لمینت شده پر از مایع تحت فشار هیدرواستاتیک پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش فشار هیدرواستاتیک، فرکانس های طبیعی افزایش می یابند. فشار هیدرواستاتیک موجب افزایش سختی پوسته های کامپوزیتی می شود. چن و همکاران [۲۰] به تحلیل ویبروآکوستیک پوسته های استوانه ای غوطه ور پر شده از مایع پرداختند. بررسی تأثیر مایع داخلی بر تابش صوتی نشان داد که وجود هوا تأثیر کمی بر تابش صوتی دارد، در حالی که جایگزینی با آب باعث تغییرات قابل توجه در ویژگی های تابش صوتی می شود. گان و همکاران [۲۱] ارتعاش اجباری مخازن چند لایه کامپوزیتی پر از مایع با در نظر گرفتن تعامل سیال-سازه را به روش المان محدود مرزی مقیاس بندی شده مطالعه نمودند.

همان گونه که ملاحظه می شود، تمامی مطالعات فوق الذکر مربوط به پوسته های استوانه ای مستدیر بوده که تخمینی دور از واقعیت از فرم هندسه بدنه شناور و خمیدگی های واقعی آن است. در این پژوهش، تمرکز بر تاثیرانحناهای سهموی عرضی بر رفتار ارتعاشی پوسته های سهموی تقویت شده در حالات مختلف تماس آب با پوسته است که تمایز اصلی آن با سایر کارهای انجام شده است و خلأ آن در بین تحقیقات صورت گرفته محسوس است. در ابتدا به منظور اعتبارسنجی، فرکانس های ارتعاشی پوسته های استوانه ای در حالات مختلف (افقی دو سرباز، دوسر بسته، عمودی دوسر باز و یک سر بسته) و نیز عمق های مختلف غوطه وری، به صورت عددی استخراج گردیده است. سپس تأثیر افزایش انحناهای پوسته سهموی تقویت شده بر فرکانس طبیعی که منجر به تشکیل فرکانس طبیعی ماکزیمم در یک نسبت انحناهای مشخص می گردد، همچنین رفتار دینامیکی پوسته در پیک فرکانسی، قبل و بعد از آن به صورت کمی و کیفی مورد بررسی قرار گرفته است. در تمامی تحلیل های عددی از نرم افزار آباکوس استفاده شده است.

۲- تعریف مسئله و شرایط حل عددی

در این تحقیق به تحلیل مودال یک پوسته فلزی سهموی دارای تقویت کننده و اثر پارامترهای هندسی و برهم کنش ارتفاع های مختلف تماس آب بر فرکانس طبیعی پوسته

عرضی روی ورق های فولادی تخت و انحنادار تحت ضربه سقوط آزاد پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که استفاده از تقویت کننده ها به کاهش طول لهیدگی کمک می کنند، اما تقویت کننده های نواری باعث کاهش جذب انرژی نسبت به ورق های ساده می شوند. همچنین انحنا باعث افزایش جذب انرژی می شود آمابیلی و همکاران [۱۲] به مطالعه ارتعاشات غیرخطی یک پوسته استوانه ای مستدیر نرم پر از مایع پرداختند. معرفی مدل کاهش یافته با سختی غیرخطی و میرایی ویسکوز برای توصیف رفتار پوسته از نوآوری های پژوهش آنها بود. داپنگ تان و همکاران [۱۳] با استفاده از معادلات دیفرانسیل جزئی مرتبه بالا برای تحلیل حرکت پوسته، پاسخ ارتعاشی پوسته استوانه ای پر از مایع با ترک را تحلیل نمودند. آنها دریافتند که وجود ترک ها باعث کاهش انعطاف پذیری محلی و فرکانس طبیعی می شود. در پژوهشی دیگر، حاتمی و همکاران [۱۴] به بررسی تجربی جذب انرژی ورق های فولادی انحنادار تحت بارگذاری ضربه ای و تأثیر لچکی روی تغییر شکل نمونه ها پرداختند. چینگ بای و همکاران [۱۵] ارتعاشات غیرخطی پوسته های استوانه ای FG با لایه های پیزوالکتریک و اثرات تعامل الکترو-حرارتی-سیالی را مدل سازی نمودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که در برخی حالات، نوسانات و ارتعاشات نامطلوب به واسطه کنترل های فعال پیزوالکتریک کاهش می یابد. دالوند و همکاران [۱۶] اثرات بارگذاری ضربه ای بر روی صفحات مستطیلی ضخیم از کامپوزیت های سیمانی خود متراکم با ورق فولادی گسترش یافته را به صورت تجربی بررسی نمودند. آنها دریافتند که با افزایش درصد الیاف فولادی و تعداد لایه های ورق های فولادی گسترش یافته، جذب انرژی افزایش یافته و نیروی اوج اولیه کاهش می یابد. وی پینگ هه و همکاران [17] ارتعاشات پوسته های استوانه ای متخلخل ساخته شده از مواد تابعی مدرج پر شده با مایع متراکم را با استفاده از روش انرژی تحلیل نمودند. یو لیو و همکاران

[18] ویژگی های تعامل سیال-سازه برای پوسته های استوانه ای هم محور با مایع در شکاف حلقوی را مطالعه نمودند. آنها با مطالعه پارامترهای جدید مانند سختی پوسته خارجی و تأثیر آن بر فرکانس دریافتند که با افزایش سختی پوسته خارجی، جرم افزوده و فرکانس مدال پوسته داخلی

علمی و مهندسی به بهبود طراحی و عملکرد سازه‌های در تماس با سیال کمک می‌نماید:

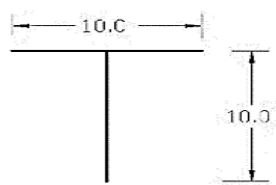
۱. توزیع یکنواخت تنش و کاهش تمرکز تنش در نواحی بحرانی [۲۵].

۲. افزایش سختی و مقاومت پوسته در برابر بارهای خارجی بخصوص در شرایط بارگذاری دینامیکی و ارتعاشات پوسته [۲۶].

۳. همچنین نسبت بالای استحکام به وزن در این نوع تقویت‌کننده‌ها که استفاده از آنها جهت تقویت پوسته منجر به کاهش وزن کل سازه بدون اینکه از استحکام سازه کاسته شود [۲۷].

۴. فراهم‌سازی پایداری بیشتر نسبت به سایر تقویت‌کننده‌ها به دلیل ظرفیت بالای تحمل بارهای خمشی و کششی و کاهش خطر خستگی سازه [۲۸].

همچنین با توجه به اینکه ابعاد هندسی متداول و توصیه شده تقویت‌کننده‌های T شکل در کتب و مراجع معتبر برای استفاده در کشتی‌های تجاری ۱۰ الی ۱۵ سانتی‌متر [۲۹]، ناوهای جنگی ۱۰ الی ۲۰ سانتی‌متر [۳۰]، نفت کش‌ها و کشتی‌های باربری ۱۰ الی ۲۵ سانتی‌متر [۳۱] می‌باشد، لذا در پژوهش حاضر ابعاد جان و بال تقویت‌کننده‌های T شکل با تبعیت از ابعاد توصیه شده در منابع، ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. شکل (۲).



شکل ۲: مشخصات ابعادی تقویت‌کننده‌های طولی

تأثیر تقویت‌کننده‌های طولی در شکل‌گیری نواحی نوسانی و تشکیل مدهای ارتعاشی (موضعی و یا کلی) در مجاورت لبه‌های عرضی منجر به پدیده خستگی و تحت‌تأثیر قرارگرفتن استحکام اتصالات عرضی پوسته می‌گردد. همچنین همان‌گونه که در جدول‌های ۷ الی ۲۰ مشخص است، تأثیرپذیری شکل مود پوسته ناشی از پیکربندی طولی تقویت‌کننده‌ها بر روی آن، در تعامل با سه عامل مهم تغییرات ضخامت پوسته، تغییرات ارتفاع خمیدگی و ارتفاعات

پرداخته شده است. ۳ پارامتر هندسی مورد مطالعه شامل L طول پوسته، b عرض پوسته و C ارتفاع خمیدگی عرضی پوسته است.

در کتب و مراجع معتبر، ابعاد هندسی ورق‌های تقویت شده مورد استفاده در سازه کشتی‌ها مطابق جدول ۱ است:

جدول ۱: ابعاد هندسی توصیه شده برای ورق در کتب و مراجع معتبر

ضخامت (میلیمتر)	عرض ورق (متر)	طول ورق (متر)	نوع کشتی	شماره
۶ الی ۲۵	۲ الی ۵	۲ الی ۶	کشتی تجاری [۲۲]	۱
۸ الی ۲۰	۴	۲ الی ۶	ناو جنگی [۲۳]	۲
۱۰ الی ۲۰	۲ الی ۶	۲ الی ۱۰	نفت کش و باربری [۲۴]	۳

لذا مطابق جدول ۱ طول پوسته برابر $L=4m$ و عرض آن $b=4m$ و ضخامت‌های مورد مطالعه در این پژوهش (t) ، شامل $۰,۰۰۵$ ، $۰,۰۰۱$ ، $۰,۰۱۵$ و $۰,۰۲$ متر می‌باشند. همچنین پارامترهای هندسی بی بعد C/b معرف پارامتر سفتی و برای آن مقادیر $۰,۰۱$ ، $۰,۰۰۵$ ، $۰,۱$ و $۰,۵$ در نظر گرفته شده است. (شکل ۱).



شکل ۱: پوسته فلزی سهموی تقویت شده با

تقویت‌کننده‌های طولی

تقویت‌کننده‌های به کاررفته در این پژوهش از نوع طولی است که صاف بوده و در راستای انحنای عرضی پوسته نمی‌باشند. باتوجه به محیط عملکردی بدنه شناورها که در معرض بارهای مولد ارتعاشات همانند کوبش هستند، انتخاب تقویت‌کننده‌های T شکل به دلایل زیر به عنوان یک راهکار

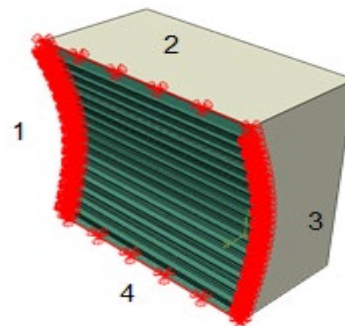
جدول ۲: شرایط تکیه گاهی لبه های پوسته مورد مطالعه

شرایط تکیه گاهی			
۴	۳	۲	۱
جابه جایی در تمام جهت ها صفر	جابه جایی در تمام جهت ها صفر	جابه جایی در تمام جهت ها صفر	جابه جایی در تمام جهت ها صفر

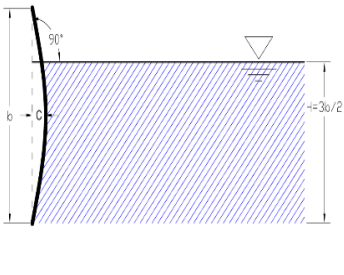
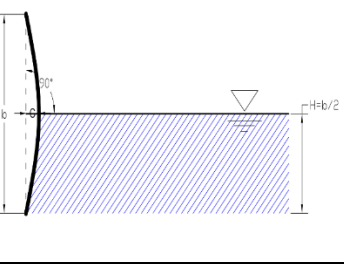
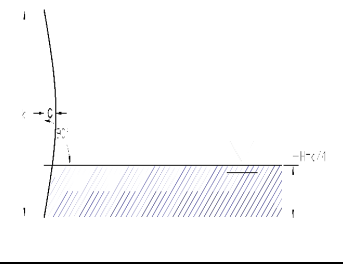
در ادامه، حساسیت اندازه مش در نتایج مدل ها مورد بررسی قرار گرفته است؛ بنابراین به نمایندگی از تمامی مدل های این پژوهش، حساسیت مش در مورد فرکانس طبیعی پوسته با نسبت انحنای $c/b=0.01$ مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا نتایج فرکانس طبیعی در مودهای ۵ گانه این مدل برای اندازه مش های ۲۰، ۱۰، ۵، ۲/۵ سانتی متر در نمودار نشان داده شده است. مشاهده می گردد که نتایج مدل ها با المان هایی به اندازه کوچک تر از ۱۰ سانتی متر بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و می توان بیان کرد که در محدوده اندازه این نوع المان، اندازه المان ها تأثیر چندانی بر نتایج حاصل از مدل ها نداشته است؛ بنابراین برای تمامی مدل ها به طور میانگین از المان هایی به اندازه ۱۰ سانتی متر استفاده شده است (شکل ۴).

در پوسته سهموی تقویت شده تحقیق حاضر، مدول یانگ ۲۰۶ گیگا پاسکال، ضریب پواسون ۰٫۳ و چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. همچنین در سیال مورد بررسی، مدول بالک ۲٫۲ گیگا پاسکال و چگالی ۱۰۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب است. در نرم افزار آباکوس برای مدلسازی المان های مایع از المان های اکوستیک سه بعدی و هشت گره ای AC3D8 که جهت مدل سازی پدیده هایی مانند برهمکنش دینامیکی میان سیال و سازه مناسب می باشند استفاده شده است. همچنین برای مدل سازی پوسته از المان های S4R5 که مربوط به پوسته های نازک بوده و چهار گره ای و دارای پنج درجه آزادی در هر گره است استفاده شده است. به منظور حل FSI یک طرفه و ایجاد شرایط کوپلینگ در سطح مشترک سیال و سازه می بایست از قید مناسب در فصل مشترک سطوح استفاده شود. همچنین از سطوح امپدانس برای مدل سازی

مختلف تماس سیال با آن است. تعامل پیکربندی طولی با موارد ذکر شده، نقش تقویت کننده های طولی در مهار مودهای ارتعاشی کلی و یا جلوگیری و به تأخیر انداختن تشکیل مودهای کلی را تحت تأثیر قرار می دهد. به عنوان مثال در حالت بدون تماس سیال با پوسته؛ در ضخامت های کمتر، شاهد شکل گیری دامنه های نوسانی موضعی فی مابین تقویت کننده ها هستیم؛ لذا در این حالت نقش تقویت کننده های طولی (به دلیل سفتی کمانشی افزوده موضعی) در جلوگیری از تشکیل مودهای کلی پررنگ تر است. با افزایش ضخامت پوسته شاهد گسترش نواحی نوسانی موضعی و شکل گیری مودهای کلی در مجاورت لبه های عرضی هستیم؛ لذا در پوسته های ضخیم تر، نقش تقویت کننده ها در مهار مودهای کلی پررنگ تر می شود. علاوه بر این، نقش اساسی این تقویت کننده ها در جهت گیری نواحی نوسانی ایجاد شده در سطح پوسته، تغییرات عدد موج محیطی آن را تحت تأثیر قرار می دهد؛ بنابراین مطالعه تأثیر استفاده از تقویت کننده های طولی به جهت بررسی تغییرات شکل مود پوسته و در نظر گرفتن تمهیدات لازم جهت افزایش استحکام و تقویت سازه بسیار ضروری به نظر می رسد. به دلیل این که سازه مورد بررسی در اطراف خود به اجزای دیگر متصل است، لذا جابه جایی خطی نسبی بین سازه مورد نظر و اجزای سازه ای اطراف آن، در تمامی جهت ها صفر در نظر گرفته می شود؛ لذا لبه های پوسته سهموی تقویت شده در تمامی جهات ثابت و به عنوان تکیه گاه های ساده در نظر گرفته می شوند شکل (۳).



شکل ۳: شماره تکیه گاه های پوسته تقویت شده مورد مطالعه

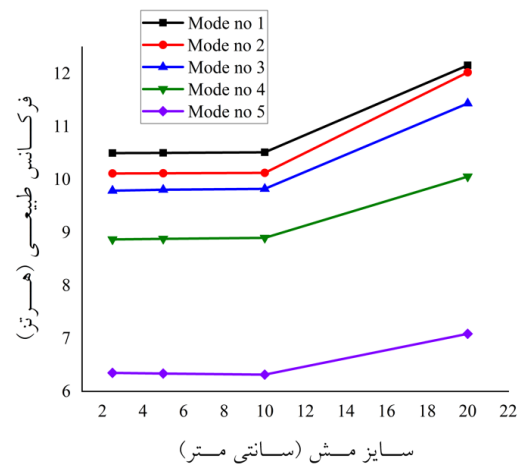
	$h = \frac{3b}{4}$	a_2
	$h = \frac{b}{2}$	a_3
	$h = \frac{b}{4}$	a_4

۳- اعتبارسنجی روش عددی

به جهت اطمینان از نتایج تحلیل فرکانس‌های طبیعی پوسته سهموی در نرم‌افزار اجرا محدود آباکوس، به اعتبارسنجی از شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته در پژوهش آقایان محبوب مقدس و همکاران [۳۲] پرداخته شده است. در تحقیق مذکور اثر سطح خیس شده پوسته استوانه‌ای بر فرکانس‌های ارتعاشی در عمق‌های مختلف غوطه‌وری به صورت عددی و تجربی مورد بررسی و حالات افقی دوسر بسته، دو سر باز، عمودی دو سر باز و عمودی پر شده در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و مورد تحلیل قرار گرفته است. ادامه جدول اعتبارسنجی پژوهش یاد شده بدلیل گستردگی داده‌های مورد بررسی در پیوست این پژوهش قرار داده شده‌اند که می‌توان به آن مراجعه نمود. (جدول ۴)

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، خطای بین شبیه‌سازی‌های صورت‌پذیرفته در تحقیق حاضر در اکثر موارد کم و قابل قبول بوده و از دقت بالایی برخوردار است؛ لذا می‌توان به نتایج عددی برای سایر پارامترها اعتماد نمود.


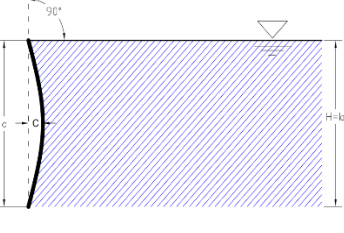
محیط بی‌نهایت سیال و شرط انتشار و عدم بازگشت امواج استفاده شده است.



شکل ۴: نمودار بررسی استقلال از مش پوسته

مطابق جدول ۳ مشخصات حالت‌های غوطه‌وری و تماس سیال با پوسته در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۳: مشخصات حالت‌های مختلف تماس پوسته با آب

تصویر	وضعیت	حالت
	عدم وجود سیال	a_0
		a_1

۴- تحلیل نتایج عددی

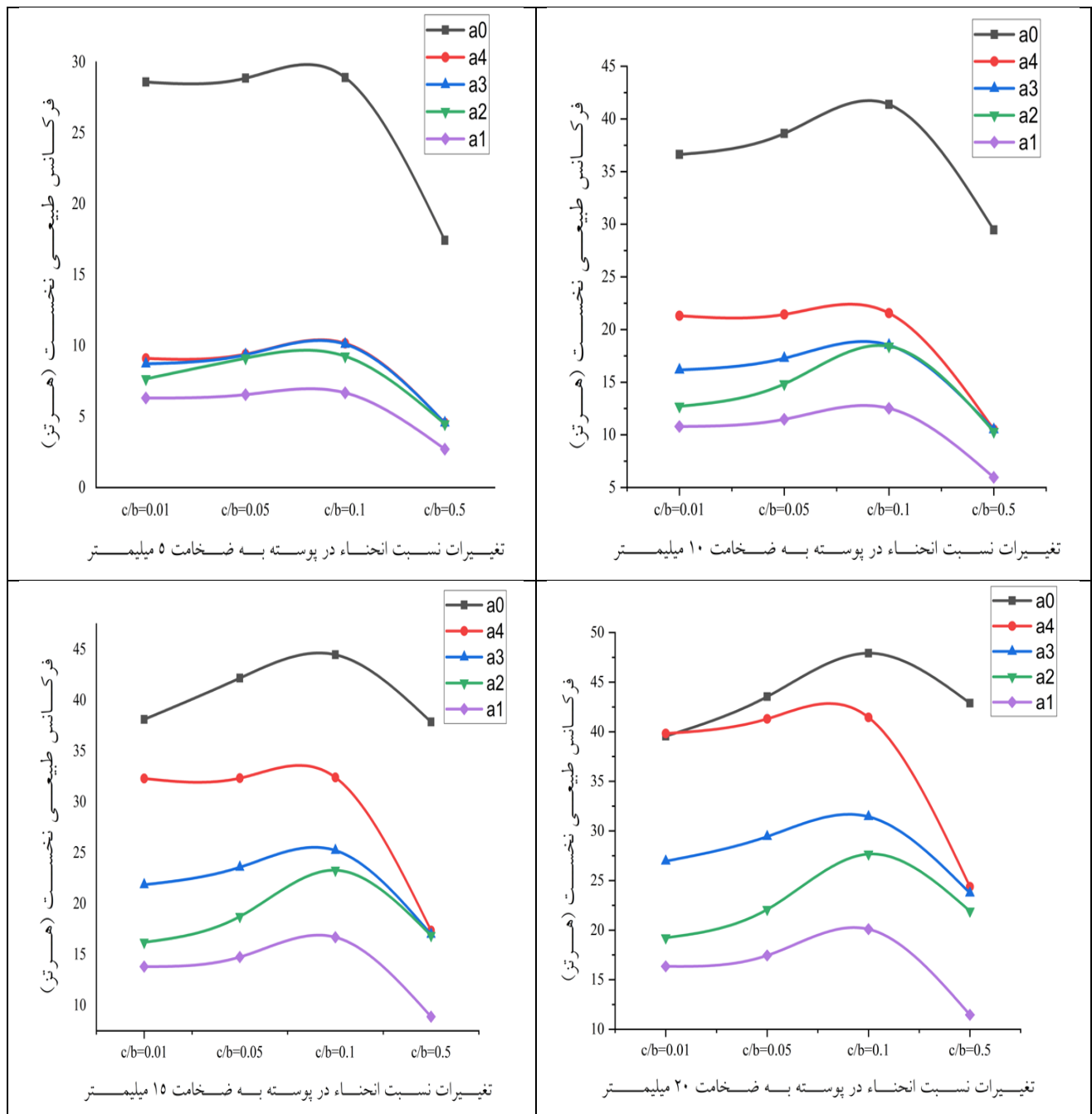
باتوجه به نموداری های زیر، رفتار ارتعاشی پوسته در تماس با عمق های مختلف غوطه وری، تحت تأثیر افزایش انحنای

جدول ۴: اعتبارسنجی محجوب مقدس و همکاران [۳۲]

حالت آزمایش	عدد موج		عمق غوطه‌وری									
			خشک					0.25				
	m	n	محجوب و همکاران		تحقیق حاضر	درصد اختلاف		محجوب و همکاران		تحقیق حاضر	درصد اختلاف	
			تجربی	عددی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی	عددی	تجربی	عددی
افقی دوسر بسته	0	2	408	414	411.26	-0.80	0.66	379	357	360.2	-0.90	4.96
		3	1147	1171	1166.9	-1.73	0.35	1016	1053	1011.5	3.94	0.44
افقی دوسر باز	0	2	408	414	411.26	-0.80	0.66	338	340	320.1	5.85	5.30
		3	1147	1171	1166.9	-1.73	0.35	960	968	960.71	0.75	-0.07
	2	3	1398	1410	1408.4	-0.74	0.11	1393	1350	1349.2	0.06	3.14
عمودی دوسر باز	1	2	421	427	424.11	-0.74	0.68	409	416	413.5	0.60	-1.10
		3	1163	1188	1183.4	-1.75	0.39	1144	1169	1161.6	0.63	-1.54
	2	2	1373	1378	1384	-0.80	-0.44	1228	1191	1193.2	-0.18	2.83
		3	1398	1410	1408.4	-0.74	0.11	1291	1283	1278.1	0.38	1.00
عمودی پر شده	2	2	1373	1378	1384	-0.80	-0.44	1293	1248	1256.2	-0.66	2.85
		3	1398	1410	1408.4	-0.74	0.11	1324	1335	1329.8	0.39	-0.44

طولی آن در ضخامت‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلیمتر از حیث مقدار پیک (قله) فرکانس، رفتار قبل از اوج، رفتار پس از اوج، رقابت میان خمیدگی و جرم افزوده آب و در نهایت مقایسه پارامترهای یاد شده در ضخامت‌های مورد مطالعه، بررسی و ارائه شده است.

جدول ۵: تأثیر تغییرات (c/b) بر فرکانس طبیعی اول پوسته با تقویت کننده های طولی ۵ تایی در تماس با ارتفاعات مختلف سیال ضمن تغییرات ضخامت (t)



۴-۱ مقدار پیک فرکانس

فرکانس پیک در $c/b = 0.1$ برای تمام ارتفاعات تماس آب رخ می‌دهد. همچنین فرکانس پیک با افزایش ارتفاع تماس آب کاهش می‌یابد. اما این کاهش در تغییرات مختلف ارتفاع سیال متفاوت است. مطابق جدول ۶، این روند با افزایش ارتفاع تماس آب با پوسته در ضخامت‌های مختلف قابل مشاهده است.

جدول ۶: تغییرات پیک فرکانسی پوسته ضمن تغییرات ارتفاع تماس آب در ضخامت‌های مختلف

ردیف	ضخامت (mm)	تغییر ارتفاع تماس سیال با پوسته سهموی			
		a_0 تا a_4	a_4 تا a_3	a_3 تا a_2	a_2 تا a_1
۱	۵	٪-۶۴،۱۸	-0.64%	٪-۸،۸۳	٪-۲۷،۷۹
۲	۱۰	٪-۴۸،۵۰	٪-۱۴،۱۲	٪-۰،۵۳	٪-۳۱،۹۳
۳	۱۵	٪-۲۷،۲۹	٪-۲۲،۱۷	٪-۷،۷۱	٪-۲۸،۲۸
۴	۲۰	٪-۱۳،۵۳	٪-۲۴،۱۸	٪-۱۲،۰۳	٪-۲۷،۳۷

در حالت (a_0 تا a_4)؛ با افزایش ضخامت پوسته، نرخ کاهش پیک فرکانسی کاهش می‌یابد که این مهم نشان از کاهش تأثیر جرم افزوده ناشی از تماس سیال در مقابل افزایش سفتی ناشی از ضخامت پوسته سهموی است. همچنین تأثیر ضخامت بر درصد کاهش فرکانس پیک، با افزایش ضخامت پوسته کاهش می‌یابد. تغییرات درصدی در کاهش پیک فرکانسی، با پایش وضعیت افزایش ضخامت پوسته از: (۵ به ۱۰ میلیمتر: ٪-۲۴،۴۳)، (۱۰ به ۱۵ میلیمتر: ٪-۴۳،۷۲)، (۱۵ به ۲۰ میلیمتر: ٪-۵۰،۴۲۶) قابل مشاهده است؛ بنابراین در ضخامت‌های بالاتر، تغییرات کمتری در میزان کاهش پیک فرکانسی مشاهده می‌گردد.

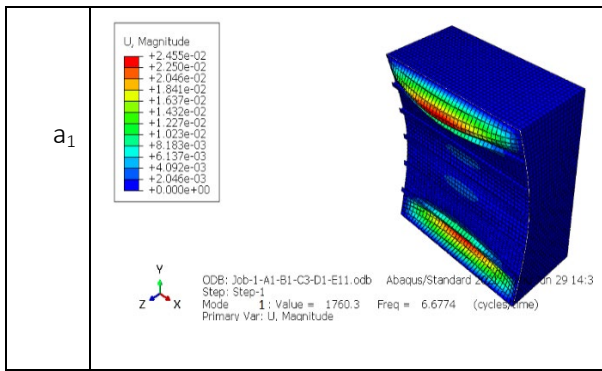
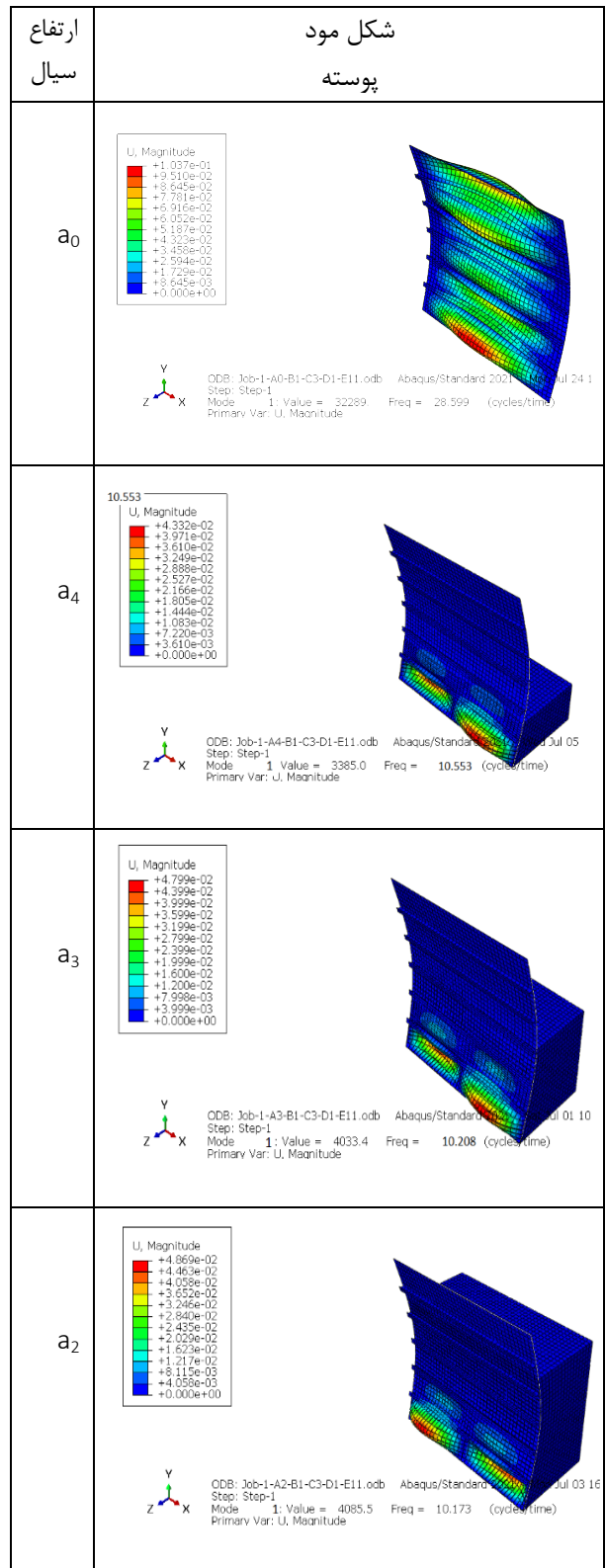
در حالت (a_3 تا a_4)؛ بر خلاف حالت قبل، با افزایش ضخامت پوسته، شاهد افزایش نرخ کاهش پیک فرکانس خواهیم بود. همچنین بر خلاف حالت قبل، با افزایش ضخامت پوسته، تأثیر ضخامت بر تغییرات درصدی کاهش پیک فرکانسی، افزایش می‌یابد، به این صورت که در ابتدا شاهد یک افزایش بسیار زیاد در درصد کاهش فرکانس پیک هستیم، سپس این افزایش تدریجی می‌شود. به عبارت دیگر نرخ افزایش درصد کاهش پیک فرکانسی با افزایش ضخامت پوسته کاهش

می‌یابد. تغییرات درصدی در کاهش پیک فرکانسی از ضخامت ۵ به ۱۰ میلیمتر بسیار قابل توجه است و افزایش ضخامت در این محدوده تأثیر بسیار زیادی بر کاهش درصد پیک فرکانسی دارد. این مهم در حالیست از ۱۰ به ۱۵ میلیمتر (٪۵۶،۹۱)، و از ضخامت ۱۵ به ۲۰ میلیمتر (٪۹،۰۳) افزایش کمتری مشاهده می‌شود؛ بنابراین با توجه به توضیحات قبل، در ضخامت‌های کمتر تغییرات بیشتری در درصد کاهش پیک فرکانسی مشاهده می‌شود.

در حالت (a_2 تا a_3)؛ همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در درصد کاهش پیک فرکانسی در ضخامت‌های مختلف، نوساناتی مشاهده می‌شود. در ابتدا تأثیر ضخامت بر کاهش درصد تغییرات پیک فرکانسی کاهش (٪۹۴،۱۱) و سپس افزایش می‌یابد. تغییرات درصدی کاهش پیک فرکانسی از ضخامت ۱۰ به ۱۵ میلیمتر بسیار قابل توجه است و افزایش ضخامت در این محدوده تأثیر بسیار زیادی بر کاهش درصد پیک فرکانسی دارد. با افزایش ضخامت از ۱۵ به ۲۰ میلیمتر، دوباره درصد تغییرات کاهش پیک فرکانسی افزایش (٪۵۶،۳۴)، اما این افزایش نسبت به بازه قبل کمتر است.

در حالت (a_1 تا a_2)؛ ابتدا با افزایش ضخامت پوسته تا ۱۰ میلی متر، درصد کاهش پیک فرکانسی افزایش و سپس مقدار آن کاهش می‌یابد. این مهم نشان دهنده آن است که در ابتدا تأثیر ضخامت بر درصد کاهش پیک فرکانسی، افزایش و سپس تأثیر آن کم و کم‌رنگ تر می‌شود. همچنین به تبع تغییرات ذکر شده، تغییرات درصدی در کاهش پیک فرکانسی دست خوش تغییرات نوسانی می‌گردد. این روند با پایش وضعیت افزایش ضخامت پوسته از: (۵ به ۱۰ میلیمتر: ٪۱۴،۹۰)، (۱۰ به ۱۵ میلیمتر: ٪۱۱،۴۶)، (۱۵ به ۲۰ میلیمتر: ٪-۳،۱۸) قابل مشاهده است؛ بنابراین در ضخامت‌های بالاتر، تغییرات بیشتری در میزان کاهش پیک فرکانسی مشاهده می‌شود. روند تغییرات شکل مود پوسته در نسبت انحناء بحرانی ($C/b=0.1$) به ازاء افزایش ارتفاع تماس سیال با پوسته در ضخامت ۵ میلی متر مطابق جدول ۷ است. لازم به ذکر است روند تغییرات شکل مود پوسته در نسبت انحناء بحرانی در ضخامت‌های بالاتر، در پیوست این مقاله (جداول ۱۲ الی ۱۴) درج گردیده است.

جدول ۷: تغییرات شکل مود پوسته سهموی در نسبت انحناهای بحرانی ($C/b=0.1$) به ازا ضخامت ۵ میلی متر



۴-۲ رفتار قبل از اوج

میانگین تغییر فرکانس قبل از پیک به طور کلی یک روند افزایشی را نشان می دهد. فرکانس با افزایش نسبت انحنا برای تمام ارتفاعات تماس آب افزایش می یابد. این مهم بیانگر آن است که اثر انحنای پوسته بر رفتار فرکانس در محدوده قبل از پیک فرکانسی، اثری غالب است. با این حال، مطابق جدول ۸ میانگین درصد تغییر در فرکانس طبیعی ضمن تغییر ارتفاعات مختلف تماس آب با پوسته متفاوت است. این روند در تمام ضخامت های مورد مطالعه این پژوهش مشاهده می شود.

جدول ۸: میانگین درصد تغییرات فرکانس پوسته قبل از انحنای بحرانی پوسته ضمن افزایش ارتفاع سیال در ضخامت های مختلف

ضخامت (mm)	ارتفاع تماس سیال با پوسته				
	a ₀	a ₄	a ₃	a ₂	a ₁
۵	%۰,۵۵	%۵,۷۰	%۷,۶۴	%۱۰,۲۷	%۲,۸۱
۱۰	%۶,۳۰	%۰,۵۷	%۷,۰۴	%۲۰,۴۳۵	%۷,۶۳
۱۵	%۸,۰۶	%۰,۱۳	%۷,۴۴	%۱۹,۹۵	%۱۰,۰۶
۲۰	%۱۰,۰۷	%۲,۰۱	%۷,۹۸	%۲۰,۰۸	%۱۰,۹۳

همان گونه که از جدول ۸ مشاهده می شود:

در ضخامت ۵ میلی متر؛ میانگین درصد تغییر فرکانس قبل از پیک روند افزایشی از a₀ به a₂ و سپس کاهش از a₂ به a₁ را نشان می دهد. این مهم نشان می دهد که قبل از اوج علاوه بر انحنا پوسته، جرم افزوده آب نیز بر میانگین درصد تغییر فرکانس طبیعی پوسته تأثیر می گذارد. افزایش اولیه در میانگین درصد تغییر فرکانس طبیعی پوسته از a₀ به a₂ را می توان به غلبه تأثیر انحنای پوسته بر جرم افزوده و کاهش اثر جرم افزوده در افزایش درصد میانگین فرکانس طبیعی

درصد تغییرات فرکانس طبیعی نسب به قبل دارد (۶۲،۶۱-).
 (/).

در ضخامت ۱۵ میلی متر؛ همان گونه که مشخص است، در a_2 بیشترین تأثیر انحنا بر میانگین درصد تغییرات فرکانس طبیعی مشاهده می شود. روند تغییرات فرکانس طبیعی در ارتفاعات مختلف تماس آب با پوسته مشابه روند تشریح شده در پوسته های با ضخامت ۱۰ میلیمتر است. با این تفاوت که در این ضخامت، از a_0 به a_2 ، کاهش و افزایش ابتدائی بیشتری در میانگین درصد فرکانس قبل از پیک را شاهد می باشیم. همچنین از a_3 تا a_2 ، شیب افزایش میانگین درصد فرکانس طبیعی قبل از پیک، نسبت به ضخامت ۱۰ میلی متر کمتر است. همچنین از a_2 به a_1 ، کاهش میانگین درصد تغییرات فرکانس، با شیب کمتری اتفاق می افتد (۴۹،۸۴-). این مهم نشان دهنده کاهش غلبه تأثیر جرم افزوده بر تأثیر انحنای پوسته در اثر افزایش ضخامت است.

در ضخامت ۲۰ میلی متر؛ همانند قبل، روند تغییرات فرکانس طبیعی در ارتفاعات مختلف تماس آب با پوسته شبیه روند تشریح شده در پوسته های با ضخامت های ۱۰ و ۱۵ میلیمتر است. در خصوص روند تغییرات میانگین درصد فرکانس طبیعی قبل از پیک مشاهده می شود که در این ضخامت، در محدوده a_0 تا a_2 کاهش ابتدائی میانگین درصد تغییرات فرکانس طبیعی با شیب کمتری نسبت به ضخامت های ۱۰ و ۱۵ میلیمتر اتفاق می افتد (۷۹،۹۸-). همچنین افزایش ابتدائی در a_4 تا a_3 ، با شیب بسیار ملایم تری نسبت به ضخامت های کمتر مشاهده می شود. در خصوص محدوده تغییر ارتفاع سیال از a_2 به a_1 ، همانند رفتار مشاهده شده از سایر ضخامت ها در این محدوده، کاهش میانگین درصد تغییرات فرکانس روندی نزولی دارد (۴۵،۵۵-). تشابه رفتاری پوسته در این محدوده میان پوسته های با ضخامت ۱۰ و ۱۵ میلی متر، نشان می دهد که غلبه تأثیر جرم افزوده بر تأثیر انحنای پوسته در کاهش میانگین درصد تغییر فرکانس طبیعی، مستقل از تاثیرات ضخامت پوسته است. روند تغییرات شکل مود پوسته در نسبت انحنا $(C/b=0.05)$ به ازاء افزایش ارتفاع تماس سیال با پوسته در ضخامت ۵ میلی متر مطابق جدول ۹ است. لازم به ذکر است روند تغییرات شکل مود پوسته در نسبت انحنا قبل از پیک فرکانسی در ضخامت های بالاتر (جداول ۱۵ الی ۱۷)، در

نسبت داد. البته در این بازه، میزان تأثیر یاد شده در ارتفاعات مختلف تماس سیال با پوسته متفاوت است. با افزایش ارتفاع سیال از a_0 تا a_4 ، بیشترین رشد تغییرات فرکانس طبیعی مشاهده می شود. با ادامه افزایش ارتفاع سیال از a_4 تا a_3 و از a_3 تا a_2 ، در درصد تغییرات فرکانس طبیعی، روند افزایشی اما بسیار ملایم تر در حدود ۳۴٪ را در هر محدوده شاهد می باشیم. این مهم نشان می دهد با افزایش ارتفاع تماس سیال با پوسته، در ابتدا تأثیر انحنای پوسته در مقابل جرم افزوده سیال بسیار زیاد بوده و با ادامه روند افزایش ارتفاع تماس سیال، تأثیر انحنای پوسته نسبت به قبل بسیار کاهش می یابد. اما هنوز شاهد غلبه این تأثیر بر جرم افزوده سیال می باشیم. کاهش میانگین درصد تغییر فرکانس طبیعی در حالت a_2 به a_1 نشان دهنده تغییر در تعامل میان جرم افزوده آب و تأثیر انحنا و معکوس گردیدن آن است. در ارتفاعات بالاتر تماس آب (a_2 و a_1)، با توجه با تأثیر رو به رشد جرم افزوده آب، اثر انحنا در افزایش میانگین درصد تغییرات فرکانس طبیعی نسب به قبل کاهش یافته و باعث کاهش درصد افزایش فرکانس طبیعی در ارتفاعات بالاتر تماس آب می شود (۷۲،۵۵-).

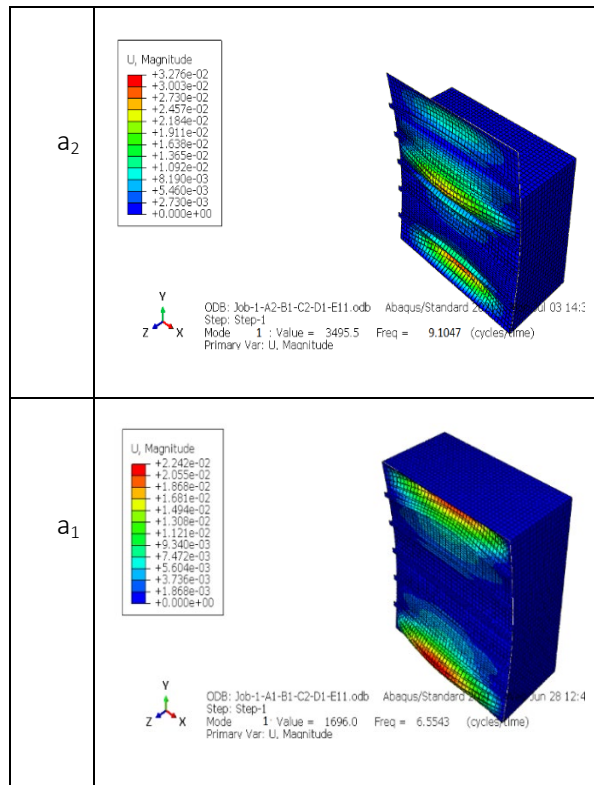
در ضخامت ۱۰ میلی متر، با پایش وضعیت میانگین درصد تغییر فرکانس طبیعی پوسته از a_0 به a_2 ، برخلاف پوسته های با ضخامت ۵ میلیمتر که شاهد افزایش اولیه در میانگین درصد تغییر فرکانس طبیعی پوسته بودیم، در این حالت در میانگین درصد تغییر فرکانس طبیعی، ابتدا روند کاهشی (تا a_4) و سپس روند افزایشی (تا a_2) مشاهده می گردد. همچنین میانگین درصد تغییر فرکانس طبیعی پوسته از a_2 به a_1 کاهش را نشان می دهد.

از a_0 به a_2 ؛ در ابتدا این امر نشان از افزایش اثر جرم افزوده در کاهش درصد تغییر فرکانس طبیعی (۹۰،۴۴-)/ و سپس در a_4 تا a_3 ، کاهش شدید اثر آن و غلبه تأثیر انحنای پوسته بر جرم افزوده در افزایش بسیار زیاد درصد تغییر فرکانس طبیعی پوسته دارد. نکته مهم این که تأثیر افزایش انحنای پوسته در تمام بازه ها یکسان نمی باشد. و و از a_3 تا a_2 ، در درصد تغییرات فرکانس طبیعی، روند افزایشی اما بسیار ملایم تر را شاهد می باشیم.

همچنین از a_2 به a_1 ؛ این امر نشان از معکوس گردیدن تعامل میان جرم افزوده آب و انحنای پوسته در کاهش میانگین

پیوست این مقاله درج گردیده است که می توان به آنها مراجعه نمود.

جدول ۹: تغییرات شکل مود پوسته سهموی در نسبت انحنای قبل از پیک فرکانسی ($C/b=0.05$) به ازاء ضخامت ۵ میلی متر



ارتفاع سیال	شکل مود پوسته
a ₀	
a ₄	
a ₃	

۳-۴ رفتار پس از اوج

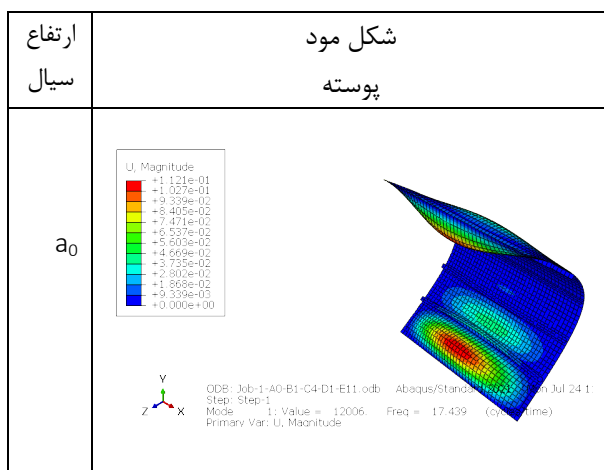
درصد تغییر فرکانس پس از پیک فرکانسی برای تمام ارتفاعات تماس آب منفی است که نشان دهنده روند کاهش فرکانس با افزایش نسبت انحنا است. این مهم نشان می دهد که تأثیر جرم افزوده آب بر رفتار فرکانس پس از اوج غالب است. تأثیر جرم افزوده آب منجر به کاهش قابل توجه فرکانس با افزایش انحنا می شود. با این حال، میانگین درصد تغییر فرکانس طبیعی به طور قابل توجهی در ارتفاعات مختلف تماس آب متفاوت است. میانگین درصد تغییر فرکانس در بعد از پیک فرکانسی، ابتدا روند کاهش و سپس روندی افزایشی را نشان می دهد. این مهم نشان می دهد که با افزایش ارتفاع تماس آب با پوسته، اثر انحنای پوسته منجر به کاهش تأثیر جرم افزوده در کاهش میانگین درصد تغییرات فرکانس طبیعی پوسته می شود. در ارتفاعات تماس بالاتر آب، تأثیر جرم افزوده مشهودتر است. با این حال مطابق جدول روند ۱۰ کاهش فرکانس طبیعی پس از پیک در حالت های مختلف تماس سیال با پوسته و نیز ضخامت های مختلف متفاوت است.

تغییرات کاهش درصد فرکانس پس از پیک ۱۸,۸۱٪ افزایش می‌یابد؛ بنابراین در این محدوده مجدداً شاهد افزایش تأثیر جرم افزوده سیال می‌باشیم.

در ضخامت ۱۵ میلیمتر، افزایش ابتدایی ارتفاع سیال تا a_4 ، افزایش بسیار شدیدی را در درصد کاهش فرکانس پس از پیک به دنبال خواهد داشت. افزایش ارتفاع سیال تا a_3 و a_2 ، کاهش به ترتیب ۲۹,۴۳٪ و ۱۵,۸۷٪ را در درصد تغییرات فرکانس پس از پیک به وجود می‌آورد. با افزایش ارتفاع سیال و تماس کامل آن با پوسته، افزایش مجدد تأثیر جرم افزوده بوده منجر به افزایش قابل توجه ۷۰٪ در درصد کاهش فرکانس طبیعی پس از پیک می‌شود.

در ضخامت ۲۰ میلی متر روندی مشابه با ضخامت ۱۵ میلی متر، یعنی افزایش بسیار شدید در درصد کاهش فرکانس، سپس کاهش این مقدار به میزان ۴۰,۱۵٪ و ۱۵,۴۷٪ به ترتیب در حالت‌های a_3 و a_2 مشاهده شود. در حالت تماس کامل سیال با پوسته تحت تأثیر قابل توجه جرم افزوده، کاهش درصد فرکانس پس از پیک، ۱۰۶,۶۳٪ نسبت به قبل افزایش می‌یابد.

جدول ۱۱: تغییرات شکل مود پوسته سهموی در نسبت انحنای پس از پیک فرکانسی ($C/b=0.5$) به ازاء ضخامت ۵ میلی متر



جدول ۱۰: میانگین درصد تغییرات فرکانس پوسته پس از انحنای بحرانی پوسته ضمن افزایش ارتفاع سیال در ضخامت‌های مختلف

ضخامت (mm)	ارتفاع تماس سیال با پوسته				
	a_0	a_4	a_3	a_2	a_1
۵	٪-۳۹,۷۰	٪-۵۵,۱۳	٪-۵۴,۹۲	٪-۵۱,۵	٪-۵۹,۴۵
۱۰	٪-۲۸,۸۰	٪-۵۱,۳۱	٪-۴۳,۳۴	٪-۴۴,۰۸	٪-۵۲,۳۷
۱۵	٪-۱۴,۸۵	٪-۴۶,۳۵	٪-۳۲,۷۱	٪-۲۷,۵۲	٪-۴۶,۷۸
۲۰	٪-۱۰,۵۳	٪-۴۱,۱۷	٪-۲۴,۶۴	٪-۲۰,۸۳	٪-۴۳,۰۴

همان‌گونه که از جدول ۱۰ مشاهده می‌شود، در ضخامت ۵ میلی متر، تماس سیال و متعاقباً تأثیر جرم افزوده، منجر به افزایش قابل توجه درصد کاهش فرکانس پس از پیک نسبت به حالت پوسته بدون تماس با سیال می‌شود (۳۸,۸۷٪). افزایش ارتفاع تماس سیال تا a_4 ، کاهش جزئی در درصد کاهش فرکانسی را به دنبال دارد (۰,۳۸٪). تأثیر جرم افزوده در این محدوده نسبت به محدوده قبل اندکی کمتر است. با ادامه روند افزایش ارتفاع تماس سیال با پوسته تا a_3 ، روند کاهش درصد کاهش فرکانسی با شیب بیشتری ادامه دارد و به تبع آن تأثیر جرم افزوده نسبت به مراحل قبل کمتر است (۶,۲۳٪). در حالت تماس کامل پوسته با سیال، شاهد افزایش مجدد در کاهش درصد کاهش فرکانسی پوسته می‌باشیم. لذا مجدداً تأثیر جرم افزوده نسبت به دو محدوده قبل افزایش می‌یابد.

در ضخامت ۱۰ میلی متر، با افزایش ارتفاع تماس سیال تا a_4 ، شاهد افزایش زیاد در کاهش درصد فرکانس پس از پیک پوسته نسبت به حالت پوسته بدون تماس با سیال می‌باشیم (۷۸,۱۶٪). تأثیر جرم افزوده سیال در افزایش درصد کاهش فرکانسی در این حالت بسیار زیاد است. با افزایش ارتفاع تماس سیال تا a_3 ، روند تغییرات درصد کاهش فرکانسی کاهش یافته بوده ۱۵,۵۳٪ نسبت به قبل کاهش می‌یابد. با ادامه روند افزایش ارتفاع تماس سیال با پوسته تا a_2 تغییرات درصد کاهش فرکانس پس از پیک روندی افزایش در پیش گرفته (۱,۷۱٪) و در حالت تماس کامل سیال با پوسته،

۴-۴ رقابت بین خمیدگی و جرم افزوده

قبل از اوج، تأثیر انحنای غالب است؛ زیرا فرکانس به طور کلی با افزایش انحنای برای تمام ارتفاعات تماس آب افزایش می یابد. باین حال، میزان این تأثیر بسته به ارتفاع تماس آب بسیار متفاوت است که نشان می دهد جرم افزوده حتی قبل از پیک فرکانسی شروع به تأثیر گذاری بر فرکانس می کند.

پس از اوج، جرم افزوده به عامل غالب تبدیل می شود؛ زیرا فرکانس با افزایش انحنای برای تمام ارتفاعات تماس آب کاهش می یابد. اثر جرم افزوده پس از پیک قوی تر است که منجر به کاهش شدید فرکانس می شود

۵- مقایسه تأثیر افزایش C/b بر فرکانس طبیعی پوسته های با 5 تقویت کننده طولی در ضخامت های مختلف

باتوجه به توضیحات ارائه شده در بخش قبل، اکنون به مقایسه پارامترهای مقدار و محل پیک فرکانسی، رفتار قبل از اوج، رفتار پس از اوج و جرم افزوده و اثر جرم افزوده در ضخامت های 5 الی 20 میلی متر خواهیم پرداخت.

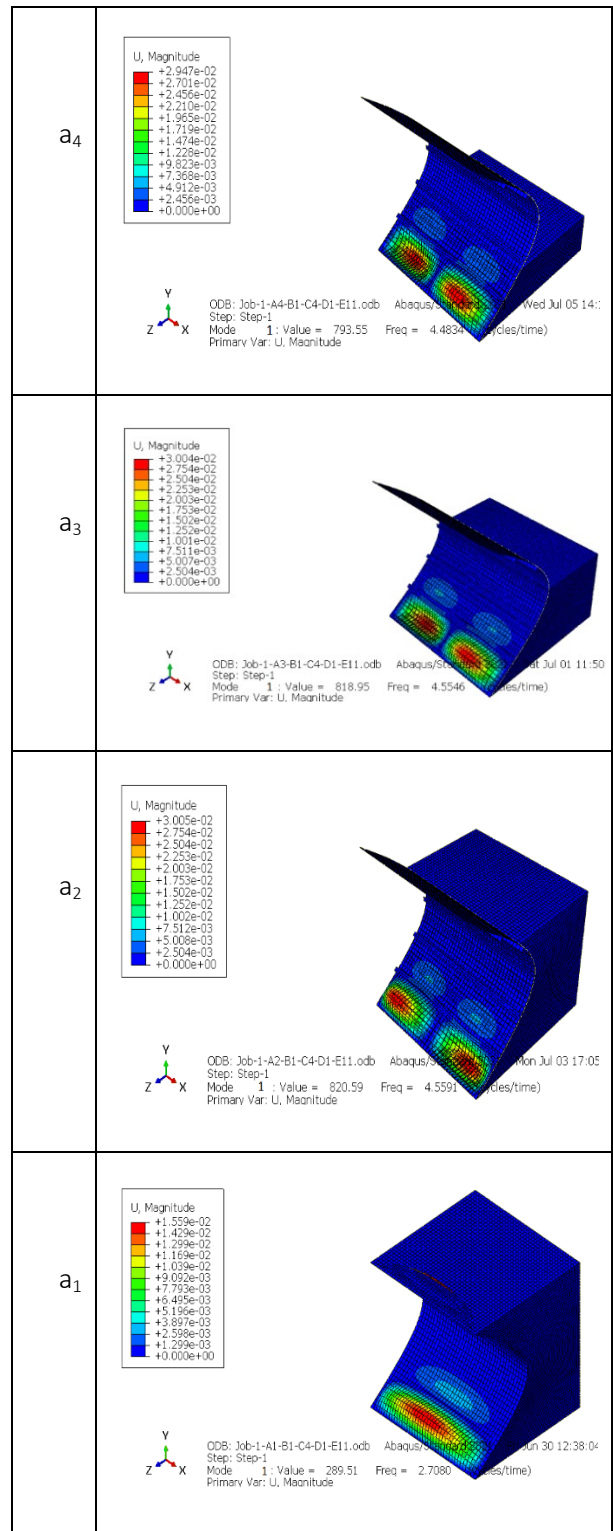
۵-۱ محل پیک فرکانسی

برای همه ضخامت های مورد بررسی در این پژوهش فرکانس اوج در نسبت انحنای $0.1 (C/b)$ مشاهده می شود. این مهم نشان می دهد محل قله در درجه اول وابسته به هندسه پوسته (شکل و انحنای) بوده و تحت تأثیر ضخامت پوسته قرار نمی گیرد. به عبارت دیگر، به عبارت دیگر انحنای بحرانی (انحنائی که در آن پیک فرکانسی مشاهده می شود) مستقل از تغییرات ضخامت پوسته است.

۵-۲ مقدار پیک فرکانسی

مقدار پیک فرکانسی با افزایش ضخامت پوسته افزایش می یابد. به عنوان مثال این روند در حالت بدون تماس آب با پوسته (a_0) در ضخامت های 5 تا 20 میلی متر به ترتیب $28,916$ ، $41,283$ ، $44,481$ و $47,923$ هرتز قابل مشاهده است.

همان گونه که ملاحظه می شود، در حالت (a_0) تا (a_4) ، درصد تغییرات منفی و بزرگ نشان می دهد که با افزایش ضخامت، میزان کاهش پیک فرکانسی به تدریج



روند تغییرات شکل مود پوسته در نسبت انحنای پس از پیک فرکانسی در ضخامت های بالاتر (جداول ۱۸ الی ۲۰)، در پیوست این مقاله درج گردیده است که می توان به آنها مراجعه نمود.

مرحله اول بسیار کمتر است. همچنین افزایش نسبتاً ثابت است که نشان می‌دهد، تأثیر افزایش ارتفاع سیال در این مراحل (a_2 و a_3) تقریباً یکسان است. با ادامه روند افزایش ارتفاع سیال تا ارتفاع a_1 ، درصد میانگین فرکانس قبل از پیک به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد که نشان از کاهش شدید تأثیر تماس سیال در افزایش میانگین درصد تغییرات فرکانس قبل از پیک را دارد.

در ضخامت ۱۰ میلی متر، افزایش ارتفاع سیال تا a_4 باعث کاهش شدید میزان افزایش فرکانس قبل از پیک نسبت به حالت بدون تماس سیال با پوسته کاهش می‌یابد. با افزایش ارتفاع تماس سیال با پوسته تا a_3 ، افزایش شدیدی در میزان افزایش فرکانس قبل از پیک مشاهده می‌شود. روند افزایش میانگین درصد تغییرات فرکانس قبل از پیک با افزایش ارتفاع سیال تا a_2 همچنان زیاد اما نسبت به قبل کمتر و ملایم‌تر است. در نهایت با افزایش ارتفاع سیال تا a_1 ، میانگین درصد تغییرات فرکانس قبل از پیک کاهش می‌یابد.

با افزایش ضخامت پوسته تا ۲۰ میلی متر، الگوی رفتاری مشابه در تغییرات درصد افزایش فرکانس قبل از پیک به ازاء افزایش ارتفاع تماس سیال با پوسته مشاهده می‌شود. با این تفاوت که کاهش اولیه، همچنین افزایش شدید میانگین درصد تغییرات فرکانس قبل از پیک در ضخامت ۱۵ میلی متر، نسبت به دو ضخامت دیگر بیشتر است. علاوه بر این افزایش ملایم و کاهش نهایی میانگین درصد تغییرات فرکانس قبل از پیک در ضخامت ۱۰ میلی متر، نسبت به دو ضخامت دیگر بیشتر است.

۴-۵ رفتار پس از اوج

میانگین درصد تغییر فرکانس پس از پیک به‌طور کلی با افزایش ضخامت کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال این روند در حالت بدون تماس پوسته با سیال (a_0)، در ضخامت‌های ۵ الی ۲۰ میلی متر به ترتیب: 39.70% ، 28.81% ، 14.85% و 10.53% قابل مشاهده است. با بررسی نرخ کاهش فرکانس طبیعی پس از بیشینه مقدار آن ($c/b = 0.1$) تا $c/b = 0.5$ نتیجه می‌گیریم که پوسته‌های با ضخامت کمتر، پس از $c/b = 0.1$ کاهش شدیدتری را تجربه می‌نمایند. به عبارت دیگر با افزایش انحنای فراتر از انحنای با فرکانس طبیعی بیشینه (انحنای بحرانی)، نرخ کاهش سفتی در پوسته‌های با ضخامت کمتر به طور قابل توجهی

کم می‌شود؛ بنابراین در این محدوده تماس سیال، پوسته در ضخامت‌های کم به تغییرات ضخامت بسیار حساس است و تأثیر ضخامت با افزایش ضخامت کم می‌شود. در حالت (a_4 تا a_3)، درصد تغییرات مثبت و بزرگ نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت، میزان کاهش پیک فرکانسی به‌سرعت افزایش پیدا می‌کند، اما در نهایت این افزایش کم می‌شود؛ لذا در این محدوده تماس سیال، پوسته در ضخامت‌های اولیه حساسیت کمتری به تغییرات ضخامت دارد و با افزایش ضخامت این حساسیت بیشتر می‌شود و سپس نرخ رشد کاهش می‌یابد. در حالت (a_3 تا a_2) درصد تغییرات نوسانی نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت، کاهش پیک فرکانسی ابتدا کم و سپس زیاد می‌شود و دوباره افزایش پیدا می‌کند. در حالت (a_2 تا a_1) درصد تغییرات در ابتدا مثبت و سپس منفی است که نشان می‌دهد ابتدا تأثیر ضخامت بر کاهش پیک فرکانسی زیاد و سپس کم می‌شود.

۳-۵ رفتار قبل از اوج

به‌طور کلی میانگین درصد تغییر فرکانس قبل از پیک با افزایش ضخامت پوسته افزایش می‌یابد. این روند در حالت بدون تماس پوسته سهموی با سیال (a_0)، در ضخامت‌های ۵ الی ۲۰ میلی متر به ترتیب 55.0% ، 30.6% ، 8.06% و 10.07% قابل مشاهده است. این مهم نشان می‌دهد که در پوسته‌های با ضخامت کمتر نرخ افزایش سفتی نسبت به پوسته‌های با ضخامت بیشتر، به طور قابل توجهی کمتر است؛ بنابراین می‌توان گفت که در پوسته‌های ضخیم‌تر قبل از پیک، افزایش سفتی بیشتری مشاهده می‌شود.

همچنین در ضخامت ۵ میلی متر، افزایش ارتفاع سیال تا ارتفاع a_4 منجر به باعث افزایش بسیار شدیدی در درصد میانگین تغییر فرکانس قبل از پیک نسبت به حالت بدون سیال می‌شود؛ بنابراین تحت تأثیر افزایش ارتفاع یاد شده، بیشترین حساسیت نسبت به جرم افزوده سیال در افزایش میانگین درصد تغییرات فرکانس قبل از پیک مشاهده می‌شود. با افزایش ارتفاع سیال تا a_2 ، درصد افزایش فرکانس قبل از پیک همچنان افزایش می‌یابد، اما این افزایش نسبت به

شده در مرحله افزایش نهایی کاهش درصد فرکانس پس از پیک نیز مشاهده می شود.

۴-۴ اثر جرم افزوده

به طور کلی جرم افزوده آب به طور مداوم فرکانس طبیعی نخست را در تمامی ضخامت ها کاهش می دهد. برای پوسته های نازک تر (۵ و ۱۰ میلی متر)؛ تأثیر جرم افزوده بر ارتفاع پیک فرکانسی بارزتر که منجر به کاهش شدید فرکانس پیک با افزایش تماس با آب می شود. همچنین پوسته های ضخیم تر (۱۵ و ۲۰ میلی متر)؛ تأثیر جرم افزوده بر ارتفاع قله کمتر که منجر به کاهش تدریجی فرکانس پیک با افزایش تماس با آب می شود.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، ارتعاشات آزاد پوسته سهموی تقویت شده در تماس با عمق های مختلف غوطه وری سیال تحت تأثیر افزایش انحنای طولی آن در ضخامت های متفاوت مطالعه گردید. در این تحلیل مشخص گردید که تأثیر انحنای اولین فرکانس طبیعی پوسته تأثیری غیرخطی است و این رفتار منجر به تشکیل فرکانس پیک در یک انحنای مشخص ($c/b=0.1$) می شود. این مهم نشان می دهد که محل قله عمدتاً توسط هندسه پوسته (شکل و انحنای) و مستقل از ضخامت و اندرکنش سیال با پوسته تعیین می شود. همچنین افزایش ضخامت پوسته، به دلیل افزایش سفتی پوسته، پیک فرکانس آن را در نسبت انحنای ($C/b=0.1$) افزایش می دهد. این روند در حالت بدون تماس آب با پوسته (a_0)، در ضخامت های ۵ تا ۲۰ میلی متر به ترتیب ۲۸،۹۱۶، ۴۱،۳۸۳، ۴۴،۴۸۱ و ۴۷،۹۲۳ هرترز قابل مشاهده است. همچنین افزایش ضخامت پوسته، اثر انحنای را بر فرکانس طبیعی قبل از پیک تقویت می نماید. این بدان معناست قبل از پیک فرکانسی، نرخ افزایش سفتی پوسته ضمن افزایش انحنای آن در پوسته های با ضخامت بالا قابل ملاحظه و ملموس تر است. این روند با افزایش ضخامت پوسته از ۵ الی ۲۰ میلیمتر به ترتیب: ۰٫۹۵٪، ۵٫۴۵٪، ۶۷٫۱۰٪ و ۱۰٫۲۵٪ قابل مشاهده است. در پوسته های ضخیم تر، افزایش سفتی ناشی از ضخامت پوسته، نرخ کاهش فرکانس طبیعی بعد از پیک فرکانسی را کاهش می دهد که این مهم بیانگر کاهش تأثیر جرم افزوده سیال در کاهش نرخ فرکانس پس از

بیشتر و در پوسته های با ضخامت بیشتر، عکس این موضوع صادق است. علاوه بر این، در این حالت تأثیر متقابل بین سختی و جرم افزوده آب، قابل توجه است. با افزایش ضخامت پوسته، تأثیر جرم افزوده در کاهش فرکانس طبیعی کاهش می یابد. علی رغم آنکه جرم افزوده آب بر فرکانس تأثیر می گذارد، تأثیر آن در پوسته های ضخیم تر به دلیل مقاومت بیشتر آنها در برابر تغییر شکل کم رنگ تر است. در ضخامت ۵ میلی متر، تغییرات درصدی کاهش فرکانس پس از پیک به ازاء افزایش ارتفاع تماس سیال با پوسته نشان می دهد حساسیت پوسته به تأثیر جرم افزوده در کاهش فرکانس پس از پیک رفتاری نوسانی دارد. به طوری که در ابتدای تماس سیال، بیشترین افزایش حساسیت را داریم، سپس با افزایش ارتفاع سیال این حساسیت کاهش و سپس مجدداً افزایش می یابد.

در ضخامت ۱۰ میلی متر، پوسته سهموی با افزایش ابتدایی ارتفاع سیال، حساسیت زیادی به جرم افزوده نشان می دهد، به طوری که کاهش پیک فرکانسی به شدت افزایش می یابد. با ادامه روند افزایش ارتفاع سیال، حساسیت به جرم افزوده تغییر می کند و در ارتفاع a_3 حساسیت پوسته به جرم افزوده کاهش و با افزایش ارتفاع سیال تا a_2 و a_1 دوباره افزایش می یابد.

در ضخامت ۱۵ میلی متر، پوسته سهموی با افزایش ارتفاع سیال، حساسیت زیادی به جرم افزوده نشان می دهد، به طوری که درصد کاهش فرکانس پس از پیک به شدت افزایش پیدا می کند. با افزایش ارتفاع سیال، درصد تغییرات کاهش پیک فرکانسی به صورت نوسانی عمل می کند و ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد. این مهم نشان دهنده تغییر در تأثیر جرم افزوده با تغییر ارتفاع سیال است.

در ضخامت ۲۰ میلی متر، الگوی رفتاری مشابه با ضخامت های ۵ و ۱۵ میلی متر در تغییرات درصد کاهش فرکانس پس از پیک به ازاء افزایش ارتفاع تماس سیال با پوسته مشاهده می شود. با این تفاوت که در ضخامت ۲۰ میلی متر بیشترین افزایش اولیه در کاهش درصد فرکانس پس از پیک و در ضخامت ۵ میلی متر کمترین این مقدار مشاهده می شود. روند ذکر

reinforcements on flat and curved steel sheets under free fall impact. *Aerospace Mechanics*. 59-39:(4)16;2020

<https://dor.isc.ac/dor/dor:20.1001.1.26455323.1399.16.4.4.4>
[12.] Balasubramanian P, Ferrari G, Amabili M. Nonlinear vibrations of a fluid-filled, soft circular shell: experiments and system identification. *Nonlinear Dynamics*. 2020;102:1-10.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11071-020-06007-5>

[13.] Zheng S, Yu Y, Qiu M, Wang L, Tan D. A modal analysis of vibration response of a cracked fluid-filled cylindrical shell. *Applied Mathematical Modelling*. 2021;91:934-58.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2020.09.040>

[14.] Mousavizadeh SA, Hosseini M, Hatami H. Experimental Studies on Energy Absorption of Curved Steel Sheets under Impact Loading and the Effect of Pendente on the Deformation of Samples. *Journal of Modeling in Engineering*. 2021;18(63):27-40.

<https://doi.org/10.22075/jme.2020.18501.1765>

[15.] Wang D, Bai C, Zhang H. Nonlinear vibrations of fluid-conveying FG cylindrical shells with piezoelectric actuator layer and subjected to external and piezoelectric parametric excitations. *Composite Structures*. 2020;248:112437.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112437>

[16.] Hatami H, Dalvand A, Chegeni A. Experimental investigation of impact loading effects on rectangular flat panels of fiber self-compacting cementations composite with expanded steel sheet. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020;42.

<http://dx.doi.org/10.1007/s40430-020-02395-2>

[17.] Jinpeng S, He W, Zhang K, Zhang Q, Qu Y. Vibration analysis of functionally graded porous cylindrical shells filled with dense fluid using an energy method. *Applied Mathematical Modelling*. 2022;108.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2022.03.028>

[18.] Li D, Lu D, Zhu Y, Liu Y, Zhang C, Duan D. Study on fluid-structure interaction characteristics for coaxial cylindrical shells with liquid in the annular gap. *Annals of Nuclear Energy*. 2023;182:109622.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109622>

[19.] Wu J-h, Liu R-j, Duan Y, Sun Y-d. Free and forced vibration of fluid-filled laminated cylindrical shell under hydrostatic pressure. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2023;202:104925.

DOI :10.1016/j.ijpvp.2023.104925.

[20.] Zhao T, Ye T, Chen Y, Jin G, Liu Z. Vibroacoustic analysis of submerged fluid-filled cylindrical shell. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2024;275:109330.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109330>

[21.] Liu J, Zhang W-Q, Ye W-B, Gan L, Qin L, Zang Q-S, et al. Forced vibration of liquid-filled composite laminated shell container considering fluid-structure interaction by the scaled boundary finite element method. *Physics of Fluids*. 2024;36(8):087148.

<https://doi.org/10.1063/5.0221695>

[22.] M. J. Dimensions and Structural Analysis of Marine Vessels. New York: Marine Engineering Press; 2021.

[23.] R. W. Ship Measurements: Length, Breadth, and Depth. Publications O, editor2020.

پیک فرکانسی در پوسته‌های با ضخامت بیشتر است. این روند در ضخامت‌های (۵ میلی متر: ۳۹,۷۰٪)، (۱۰ میلی متر: ۲۸,۸۰٪)، (۱۵ میلی متر: ۱۴,۵۸٪) و (۲۰ میلی متر: ۱۰,۵۳٪) قابل مشاهده است.

۷- مراجع

[1.] Ai S-m, Sun L-p. Fluid-structure coupled analysis of underwater cylindrical shells. *Journal of Marine Science and Application*. 2008;7:77-81.

DOI:10.1007/s11804-008-7040-x

[2.] Zhou X. Vibration and stability of ring-stiffened thin-walled cylindrical shells conveying fluid. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2012;25(2):168-76.

<https://doi.org/10.3969/j.issn.0894-9166.2012.02.006>

[3.] Ghodsbin Jahromi A, Hatami H. Numerical Behavior Study of Expanded Metal Tube Absorbers and Effect of Cross Section Size and Multi-Layer under Low Axial Velocity Impact Loading. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2018;49(4):685-96.

<https://doi.org/10.22060/mej.2016.727>

[4.] Hatami H, Fathollahi AB. Theoretical and Numerical Study and Comparison of the Inertia Effects on the Collapse Behavior of Expanded metal tube Absorber with Single and Double Cell under Impact Loading. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2018;50(5):999-1014.

<https://doi.org/10.22060/mej.2017.12016.5242>

[5.] Bochkarev S, Lekomtsev S, Senin A. Analysis of the Spatial Vibrations of Coaxial Cylindrical Shells Partially Filled with a Fluid. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019;60:1249-63.

<http://dx.doi.org/10.1134/S0021894419070046>

[6.] Hatami H, Hosseini M. Elastic-Plastic Analysis of Bending Moment – Axial Force Interaction in Metallic Beam of T-Section. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2019;5(1):162-73.

<https://doi.org/10.22055/jacm.2018.25857.1298>

[7.] Mat Daud NI, Viswanathan KK, Aziz Z, Kandasamy P. Free vibration of layered cylindrical shells filled with fluid. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2016;37.

<http://dx.doi.org/10.1007/s10483-016-2089-6>

[8.] Chehreghani M, Danesh Pazhooh M, Shakeri M. Vibration analysis of a fluid conveying sandwich cylindrical shell with a soft core. *Composite Structures*. 2019;230:111470.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111470>

[9.] Baghlani A, Khayat M, Dehghan SM. Free vibration analysis of FGM cylindrical shells surrounded by Pasternak elastic foundation in thermal environment considering fluid-structure interaction. *Applied Mathematical Modelling*. 2020;78:550-75.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.04.012>

[10.] Eslaminejad A, Ziejewski M, Karami G. An experimental–numerical modal analysis for the study of shell-fluid interactions in a clamped hemispherical shell. *Applied Acoustics*. 2019;152:110-7.

<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.03.029>

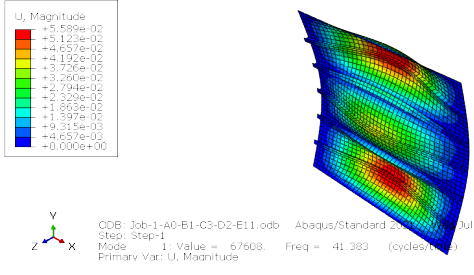
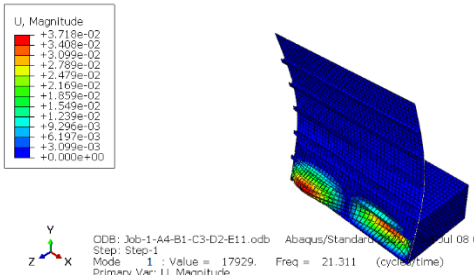
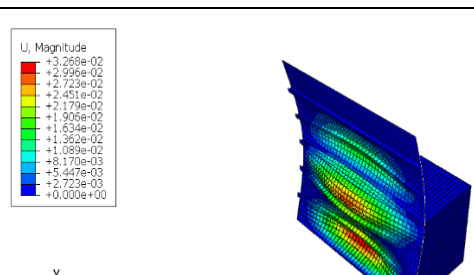
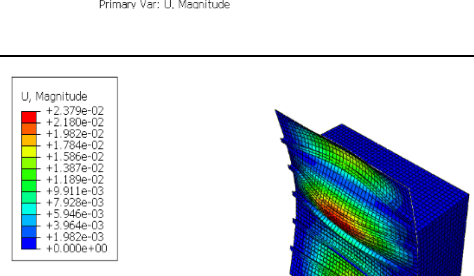
[11.] Mousavizadeh SA, Hosseini M, Hatami H, Kamalvand M. Investigation of the effect of transverse

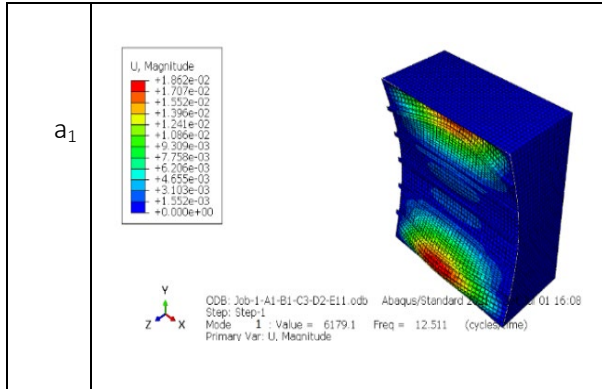
- [24.]Institute MR. Guidelines for Measuring Ship Dimensions. Rotterdam; 2019.
- [25.]Chen YaX, S. Behavior of T-shaped Stiffeners under Bending. Journal of Structural Engineering. 2015.
- [26.]Zhang JaW, H. Flexural Strength Improvement of Composite Plates with Stiffeners. Composite Structures. 2016.
- [27.]Kumar RaG, A. Weight Reduction Techniques in Stiffened Panels. Engineering Structures. 2018.
- [28.] Lee SaP, J. Fatigue and Durability of Stiffened Plates. International Journal of Fatigue. 2019.
- [29.] Smith PaB, T. Numerical Simulation of Stiffened Panels Using Finite Element Method. Finite Elements in Analysis and Design. 2020.
- [30.]A.B. Design considerations for ship reinforcement. Journal of Marine Engineering. 2021;12(4):45-60.
- [31.] Navy US. Arleigh Burke Class Guided Missile Destroyers: U.S. Navy; 2020.
- [32.]Najafi M, Mahjoub Moghaddas S, Mortazavi S, Salari M. Investigation of the effect of the wetted surface of cylindrical shells on vibration frequencies at different immersion depths, both theoretically and experimentally. Mechanics of Structures and Structures. 109-97:(6)11;2022
- <https://doi.org/10.22044/jsfm.2021.10228.3285>

حالت آزمایش	عدد موج		عمق غوطه‌وری															
			0.5						0.75						مغروق			
	m	n	محبوب و همکاران		تحقیق حاضر	درصد اختلاف		محبوب و همکاران		تحقیق حاضر	درصد اختلاف		محبوب و همکاران		تحقیق حاضر	درصد اختلاف		
			تجربی	عددی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی
افقی دوسر بسته	0	2	340	360	324.1	4.68	9.98	324	308	304.2	6.10	1.23	269	265	271.7	-0.99	-2.52	
		3	972	975	931.7	4.14	4.44	932	940	942	-1.07	-0.21	825	814	815.4	1.17	-0.17	
افقی دوسر باز	0	2	293	290	284.7	2.85	1.84	254	250	258.9	-1.94	-3.57	213	211	205.2	3.65	2.73	
		3	850	843	834.1	1.87	1.06	804	812	799.6	0.54	1.52	653	661	647.7	0.81	2.01	
	2	3	1233	1194	1196	2.97	-0.20	1087	969	958	11.86	1.13	833	811	798.4	4.15	1.55	
عمودی دوسر باز	1	2	387	385	381.6	1.40	0.88	313	319	326.6	-4.34	-2.38	232	221	215.6	7.06	2.44	
		3	1017	972	896.3	11.87	7.79	951	916	920	3.26	-0.44	681	674	660.6	3.00	1.99	
	2	2	1046	988	956.2	8.59	3.22	988	930	958.5	2.99	-3.06	777	740	732.8	5.69	0.97	
		3	1171	1209	1205	-2.88	0.36	1094	1120	1097	-0.25	2.08	833	811	798.4	4.16	1.56	
عمودی پر شده	2	2	1103	1091	1102	0.08	-1.02	1092	1049	1025	6.15	2.31	1008	912	924	8.33	-1.32	
		3	1234	1228	1226	0.69	0.20	1210	1141	1185	2.07	-3.86	1073	991	985	8.20	0.61	

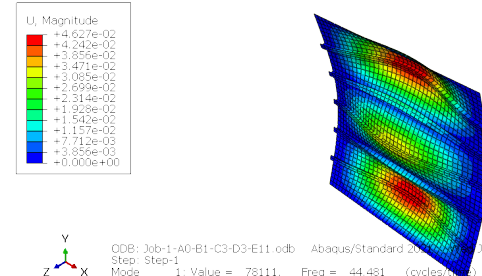
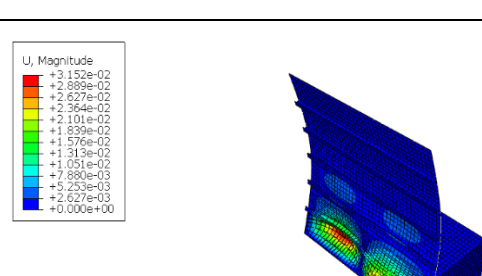
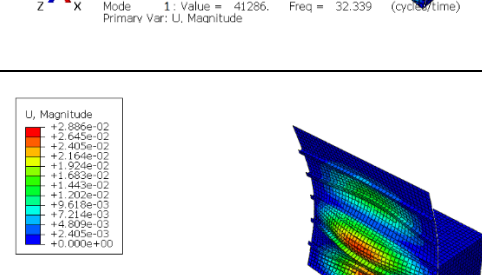
جدول ۱۲: ادامه اعتبار سنجی محبوب مقدس و همکاران [۳۲]

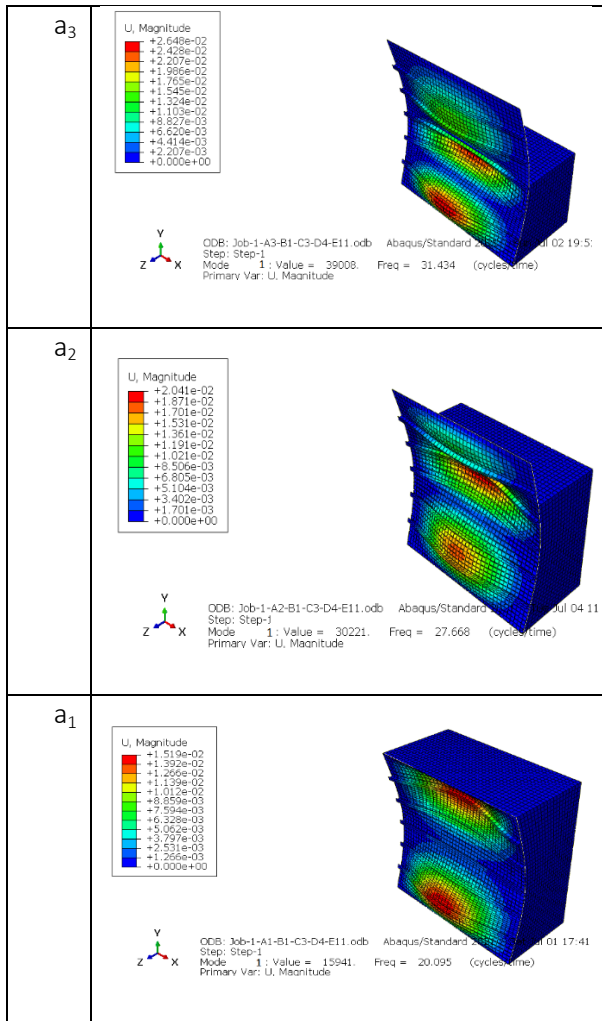
جدول ۱۲: تغییرات شکل مود پوسته سهموی در نسبت انحنای بحرانی ($C/b=0.1$) به اِزاء ضخامت ۱۰ میلی متر

ارتفاع سیال	شکل مود پوسته
a_0	
a_4	
a_3	
a_2	

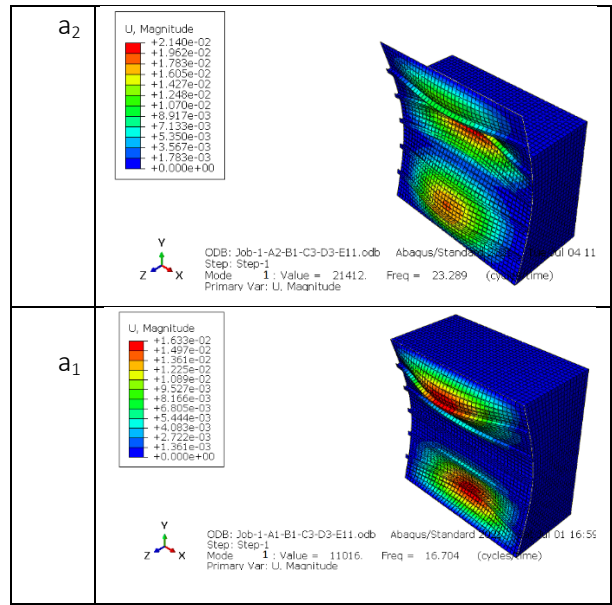
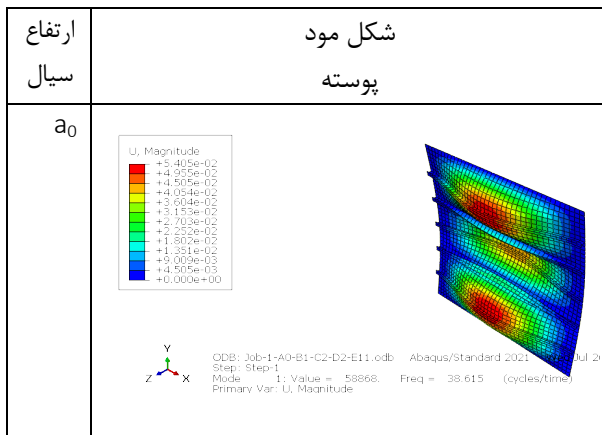


جدول ۱۳: تغییرات شکل مود پوسته سهموی در نسبت انحنای بحرانی ($C/b=0.1$) به اِزاء ضخامت ۱۵ میلی متر

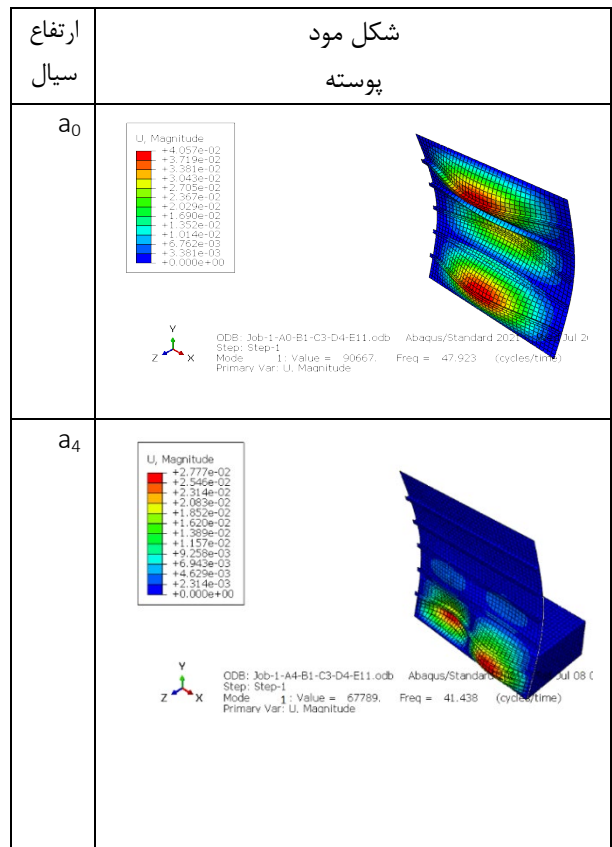
ارتفاع سیال	شکل مود پوسته
a_0	
a_4	
a_3	

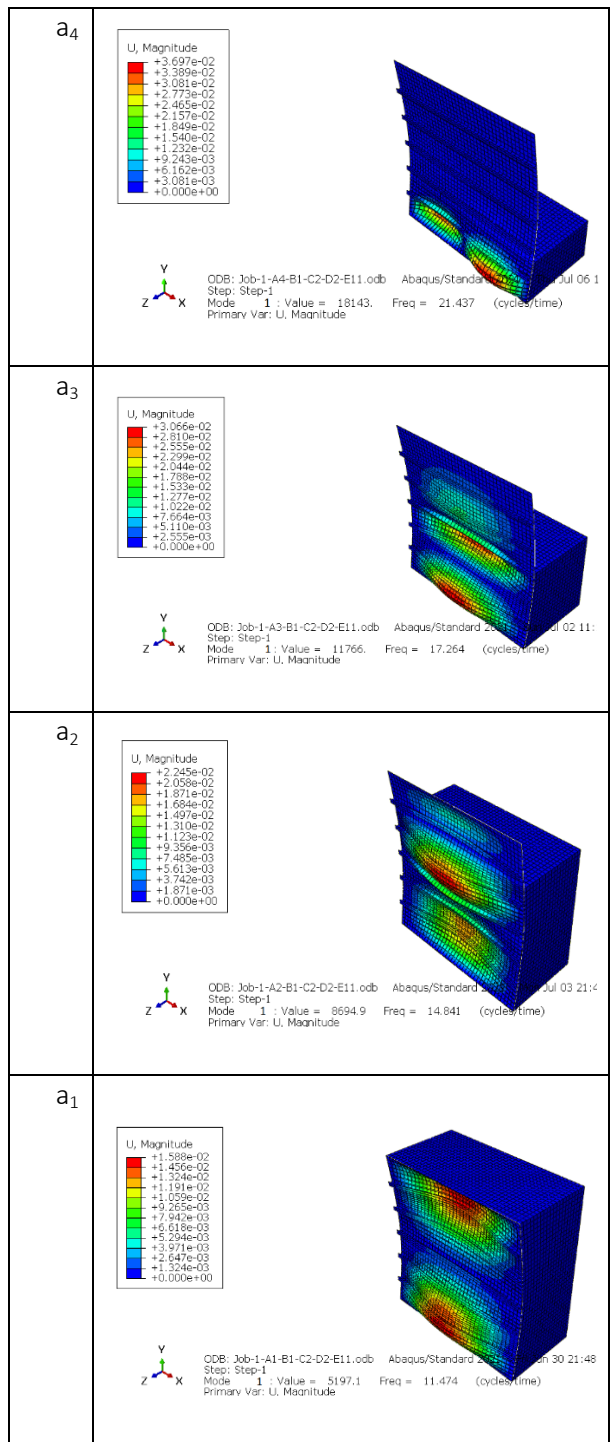
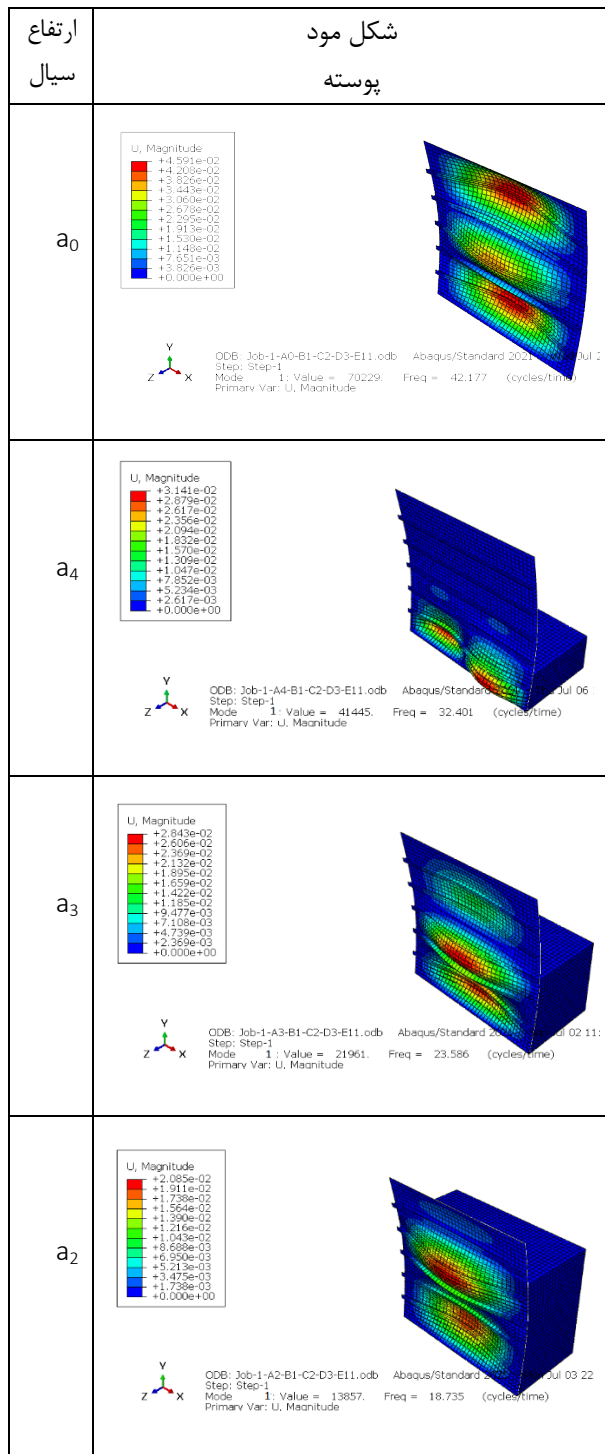


جدول ۱۵: تغییرات شکل مود پوسته سهموی در نسبت انحناء قبل از پیک فرکانسی ($C/b=0.05$) به ازاء ضخامت 10 میلی متر

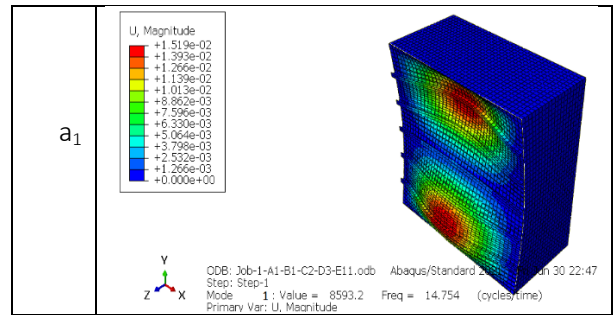
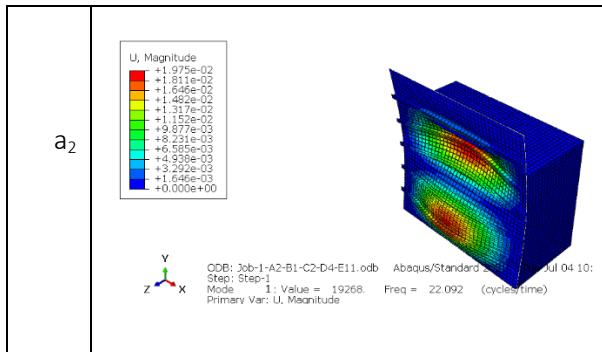


جدول ۱۴: تغییرات شکل مود پوسته سهموی در نسبت انحنای بحرانی ($C/b=0.1$) به ازاء ضخامت ۲۰ میلی متر

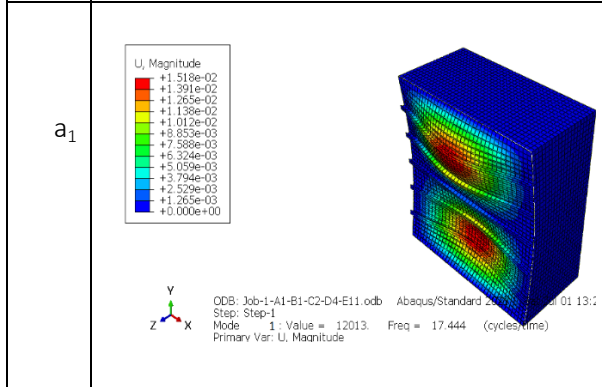




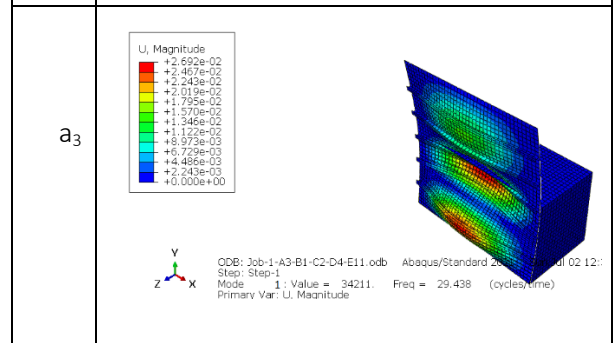
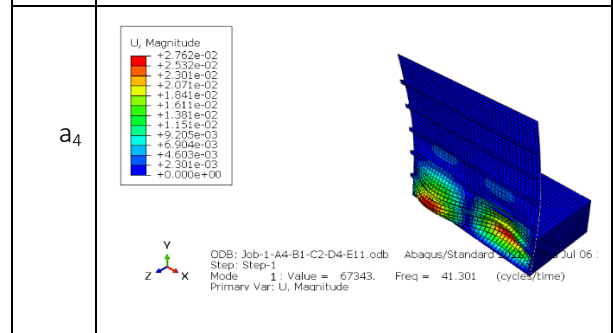
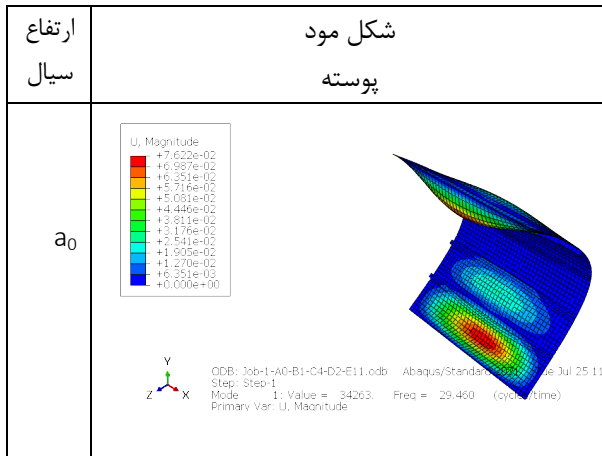
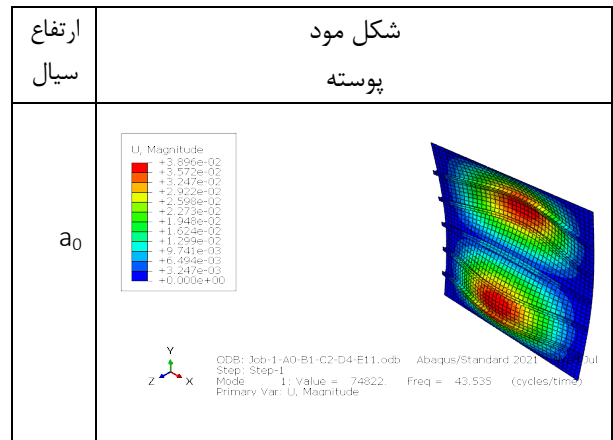
جدول ۱۶: تغییرات شکل مود پوسته سهموی در نسبت انحنای قبل از پیک فرکانسی ($C/b=0.05$) به ازاء ضخامت 15 میلی متر

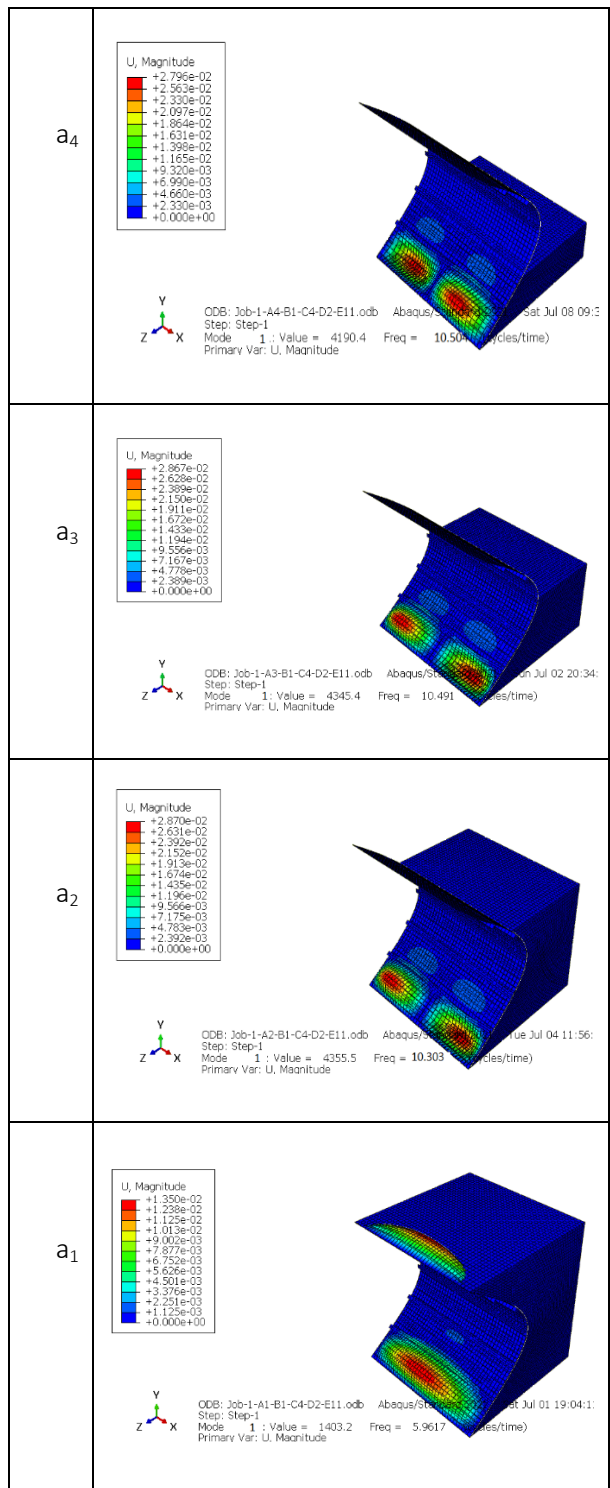
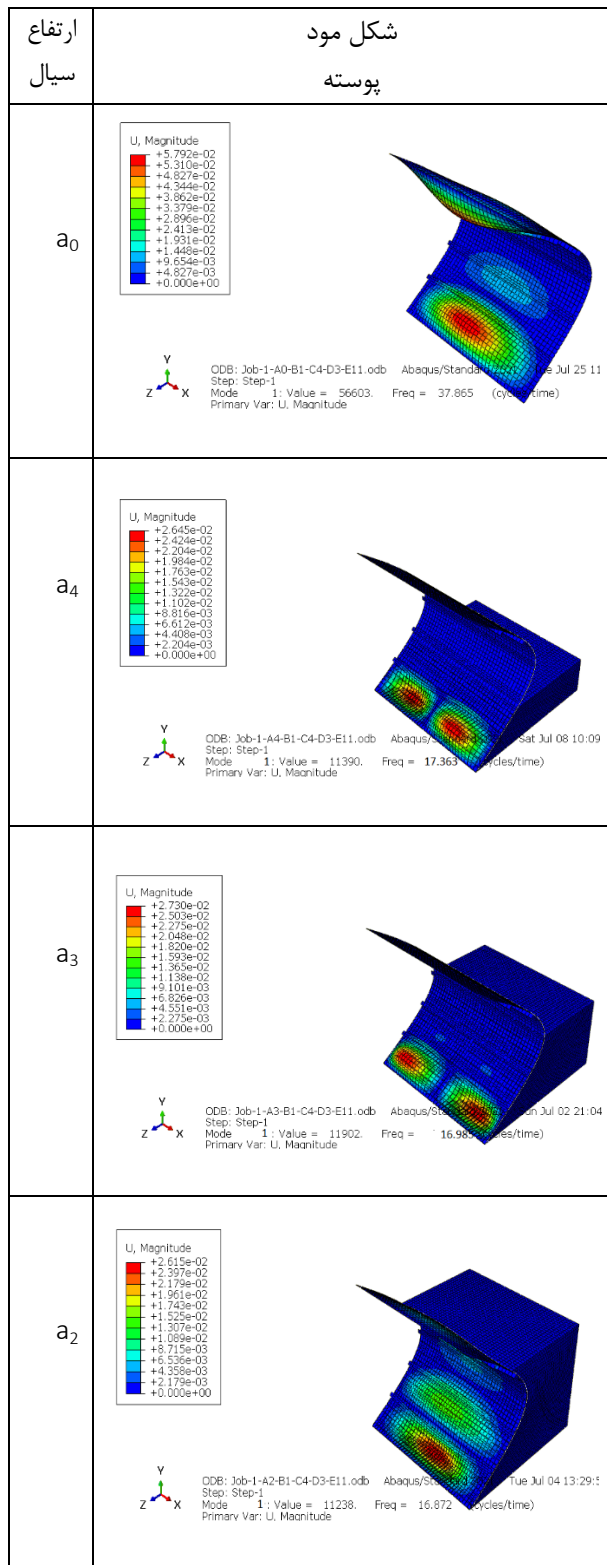


جدول ۱۷: تغییرات شکل مود پوسته سهموی در نسبت انحنای قبل از پیک فرکانسی ($C/b=0.05$) به ازاء ضخامت 20 میلی متر

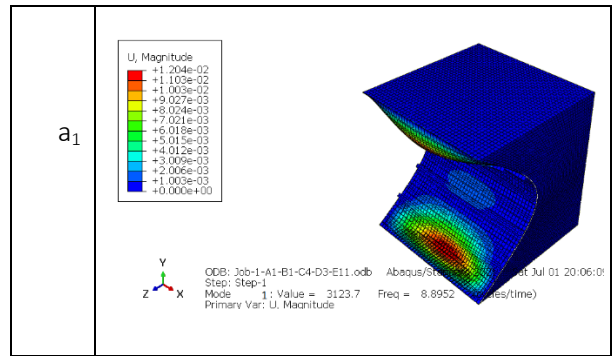
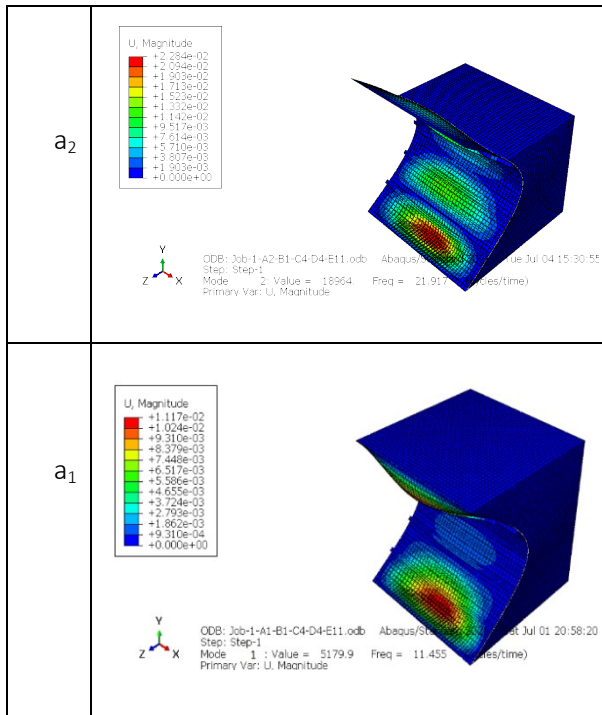


جدول ۱۸: تغییرات شکل مود پوسته سهموی در نسبت انحنای پس از پیک فرکانسی ($C/b=0.5$) به ازاء ضخامت ۱۰ میلی متر





جدول ۱۹: تغییرات شکل مود پوسته سهموی در نسبت انحنای پس از پیک فرکانسی ($C/b=0.5$) به ازاء ضخامت ۱۵ میلی متر



جدول ۲۰: تغییرات شکل مود پوسته سهموی در نسبت انحنای پس از پیک فرکانسی ($C/b=0.5$) به ازاء ضخامت ۲۰ میلی متر

