



بررسی اثر سطح خیس شده پوسته استوانه‌ای بر فرکانس‌های ارتعاشی در عمق‌های مختلف غوطه‌وری به صورت عددی و تجربی

محمد رضا نجفی^۱، سعید محجوب مقدس^{۲*}، سید محمد مرتضوی^۳ و محمود سالاری^۴

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران

^۳ کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران

^۴ استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۱/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۳

چکیده

در پژوهش حاضر، اثر سطح خیس شده پوسته‌های استوانه‌ای در تماس با آب بر فرکانس‌های ارتعاشی در عمق‌های مختلف غوطه‌وری به روش‌های تجربی و عددی بررسی شده است. سه پوسته استوانه‌ای با نسبت قطر به طول متفاوت مورد بررسی قرار گرفتند. هشت نوع حالت مختلف تماس با آب در شبیه‌سازی عددی و آزمون‌های تجربی مورد مقایسه واقع شدند. اثرات عمق غوطه‌وری، تفاوت تماس بیرونی و درونی پوسته با سطح خیس شده یکسان و تأثیر سطح خیس شده یکسان برای پوسته نیمه مغروق در حالت عمودی و افقی مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که در آغاز غوطه‌وری و در غوطه‌وری کامل، کاهش فرکانسی به صورت ناگهانی است. میزان کاهش فرکانس‌های طبیعی پوسته در دو حالت تماس سطح داخلی و تماس سطح خارجی آن با آب، برابر است و می‌توان فرکانس‌های طبیعی یک پوسته را به جای حالت مغروق افقی، در حالت پر شده عمودی به دست آورد؛ همچنین در مساحت خیس شده برابر، کاهش فرکانسی در حالت افقی بیشتر از حالت عمودی است.

کلمات کلیدی: سطح خیس؛ پوسته استوانه‌ای؛ ارتعاشات زیرآب؛ فرکانس طبیعی؛ عمق غوطه‌وری.

Investigation Effect of Wetted Surface of Cylindrical Shell on Vibrational Frequency in Different Immersion Depth Numerically and Experimentally

M.R. Najafi¹, S. Mahjoub Moghadas^{2,*}, S.M. Mortazavi³, M. Salari⁴

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., IHU Univ., Tehran, Iran.

² Assoc. Prof., Mech. Eng., IHU Univ., Tehran, Iran.

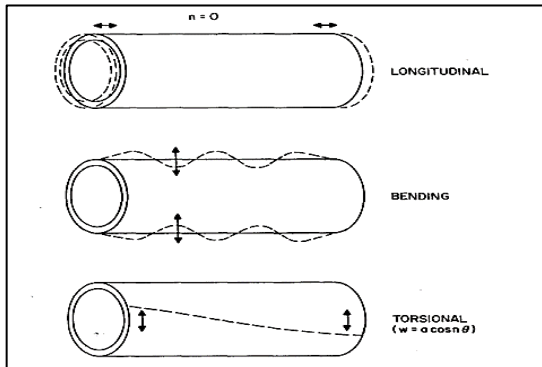
³ M.A. Student, Mech. Eng., IHU Univ., Tehran, Iran.

⁴ Prof., Mech. Eng., IHU Univ., Tehran, Iran.

Abstract

In this paper, effect of wet surface of cylindrical shell on vibrational frequency in contact with water in different immersion depth is investigated vertically and numerically. Three steel cylindrical shells with different D/L ratio are investigated. Numerical simulation and experimental tests were compared in eight different type of water-shell contact. Effects of immersion depth, effect of difference of water-shell contact between the inner and outer surface with water and wet surface geometry for semi-immersed in vertical and horizontal direction are evaluated. The results show that the natural frequencies are suddenly reduced at the beginning of immersion and its end (full immersion). The reduction of natural frequencies in two modes of contact between the inner surface of the cylindrical shell and water as well as its outer surface contact with water is equal. For the equal wet area, more natural frequency reduction was observed at a horizontal position compared with the vertical position. Also, in the equal wetted surface, more frequency reduction is observed in horizontal than vertical directions.

Keywords: Wet Surface, Cylindrical Shell, Underwater Vibrations, Natural Frequency, Immersion Depth.



شکل ۱- انواع شکل مود پوسته استوانه‌ای [۱]

نیروهای ناشی از شرایط مرزی بر ارتعاش پوسته استوانه‌ای پر شده با آب توسط تاتسو و ماتسومی ارائه گردید که مقدار این نیروها در معادلات فشار هیدرواستاتیکی قابل صرفه نظر است [۲۶]. به دلیل تفاوت فرکانس‌های طبیعی قطعه در هوای آزاد با محیط‌های نیمه مغروق و مغروق، بررسی ارتعاشات اهمیت دارد [۲۷].

در پژوهش حاضر ابتدا ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای در عمق‌ها و حالت‌های مختلف (افقی دو سر باز و دو سر بسته و عمودی دو سر باز و یک سر بسته) به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته و اعتبارسنجی صورت می‌گیرد. شرایط مرزی در همه‌ی حالت‌ها به صورت دو سر آزاد است. بررسی تفاوت تماس بیرونی و درونی پوسته با سطح خیس شده یکسان و تأثیر سطح خیس شده یکسان برای پوسته نیمه مغروق در حالت عمودی و افقی از نوآوری‌های این پژوهش است.

۲- معادلات حاکم بر مسئله

معادله ۱ ارتعاش سازه در حالت ماتریسی را نشان می‌دهد.

$$[M]\{u_i\} + [C_v]\{u_i\} + [K]\{u_i\} + [F] = 0 \quad (1)$$

در این رابطه [M] ماتریس جرم، [C] ماتریس میرایی، [K] ماتریس سختی و [F] ماتریس نیرو است. برای حالتی که سازه داخل سیال ارتعاش می‌کند، ماتریس نیرو را می‌توان به صورت معادله ۲ نوشت: [۲۸]:

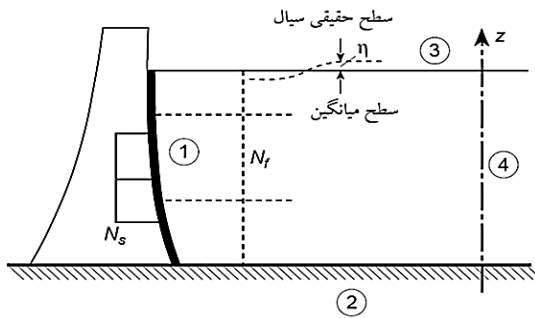
$$[F] = \frac{-1}{\rho_f} [Q]^T \{P_i\} + \{R\} \quad (2)$$

که $\frac{-1}{\rho_f} [Q]^T \{P_i\}$ نیروی فشار سیال وارد بر سازه محسوب می‌شود و R نیروی خارجی تعمیم‌یافته وارد بر سازه است. با

۱- مقدمه

پوسته‌های استوانه‌ای دارای سه مود در حالت طولی، خمشی و پیچشی هستند [۱]. تئوری پایه پوسته‌ها اولین بار در قرن ۱۹ میلادی ارائه و برای نوشتن معادلات از اصل کار مجازی و اصل همیلتون استفاده شد [۱]. در این روابط مواد اولیه تشکیل‌دهنده ورق و پوسته، همگن و همسانگرد هستند [۲]. در شکل ۱ انواع شکل مودهای پوسته استوانه‌ای نشان داده شده است.

جلوگیری از آسیب‌های ناشی از ارتعاشات مانند روزنانس در ورق‌ها و پوسته‌ها در صنایع مختلف همچون، هوافضا و نیروگاه‌ها مورد تأکید است. ارتعاشات ناشی از تماس سیال با دیواره‌ی پوسته‌های استوانه‌ای در پژوهش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است [۳-۱۷]. ارتعاشات غیرخطی پوسته‌های استوانه‌ای مدور یک‌سر گیردار در تماس با سیال ساکن توسط پاک و همکاران بررسی شد که نتایج نشان داد با افزایش سطح مایع، مقدار فرکانس طبیعی و مود محیطی مربوطه کاهش می‌یابد [۱۸]. نانالیا و همکاران، با مدل‌سازی ارتعاشات پوسته استوانه‌ای مغروق، یک فرمول تحلیلی برای ارزیابی انحراف عمودی و مماسی سطح مقطع پوسته ارائه دادند [۱۹]. پژوهش بوچکارف و همکاران نشان داد، پوسته یک‌سر گیردار با سیال، کمترین فرکانس را داشته و به شدت به کاهش ضخامت و افزایش بار اعمالی واکنش نشان می‌دهد [۲۰]. رحمانیان و همکاران فرمولاسیون سریع و کارآمد برای مطالعه دینامیک و پاسخ ارتعاش آزاد و اجباری همچنین پایداری پوسته‌های مخروطی و استوانه‌ای در معرض جریان سیال در داخل آن را ارائه دادند [۲۱]. گنو و همکاران ارتعاش و تابع آکوستیک پوسته استوانه‌ای کوتاه مغروق در آب و دارای سطح آزاد را بررسی کردند. با ارتعاش پوسته و مایع اطراف آن به روش تحلیلی بر مبنای تئوری فلوژ و معادله لاپلاس نشان داده شد که ارتعاش پوسته در آب کم‌عمق، شبیه آب با عمق نامحدود است [۲۲]. وانگ و همکاران به بررسی ارتعاش آزاد خمشی پوسته استوانه‌ای افقی مغروق در آب کم‌عمق با استفاده از روش انتشار موج پرداختند [۲۳]. در پژوهش گنو و همکاران در نزدیکی مرزهای پوسته مغروق در آب، تأثیر زیادی بر فرکانس‌های طبیعی ایجاد می‌شود [۲۴]. ارتعاش هیدروالاستیک پوسته استوانه‌ای یک‌سر بسته نیمه مغروق در مایع توسط عسکری و ژئونگ بررسی شد [۲۵]. بررسی



شکل ۲- انواع شرایط مرزی سیال

$$\begin{pmatrix} [M] & 0 \\ [V] & [S] \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i \\ \dot{p}_i \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} [C] & 0 \\ 0 & [C_f] \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_i \\ \dot{p}_i \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} [K] & -\frac{[Q]^T}{\rho} \\ 0 & [H] \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ p_i \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} R \\ 0 \end{Bmatrix} = 0 \quad (9)$$

۳- مدل سازی پوسته و سیال در نرم افزار

شبیه سازی عددی پوسته استوانه ای و سیال در نرم افزار آباکوس انجام شده است. مدل سازی پوسته به صورت شل و سیال اطراف به صورت سالیید، انجام گرفته است. پوسته های استوانه ای مورد آزمایش از جنس فولاد با مدول الاستیسیته ۲۰۰ GPa و چگالی ۷۹۰۰ Kg/m³ و نسبت پواسون ۰/۳ هستند که مشخصات آنها در جدول ۱ آمده است.

در شکل ۳ نمودار بررسی استقلال از مش آورده شده است. تعداد مش در جهت طولی، از ۲۰ تا ۱۰۰ و در جهت محیطی، از ۴۰ تا ۱۱۲ بررسی شده است. با توجه به نمودار، تعداد مش در جهت طولی ۷۰ و در جهت محیطی ۱۰۰ انتخاب شد. نمونه مدل مش بندی شده در شکل ۴ قابل مشاهده است.

۴- آزمایش تجربی

برای انجام آزمایش تجربی از سه پوسته استوانه ای با مشخصات ذکر شده استفاده شد (شکل ۵).

جدول ۱- مشخصات پوسته های استوانه ای استفاده شده

شماره پوسته	طول (mm) L	ضخامت (mm) t	قطر بیرونی (mm) D
۱	۴۰۰	۲	۱۱۴
۲	۶۰۰	۲	۱۱۴
۳	۶۰۰	۲	۸۹

جایگذاری معادلات ۲ در معادله ۱، ارتعاش سازه به صورت معادله ۳ به دست می آید.

$$[K]\{u_i\} + [C] \frac{\partial \{u_i\}}{\partial t} + [M] \frac{\partial^2 \{u_i\}}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho_f} [Q]^T \{P_i\} + \{R\} = 0 \quad (3)$$

برای به دست آوردن معادله کلی موج آکوستیکی، می توان معادله ارتعاش سیال را محاسبه کرد. از این رو، در ابتدا معادله پیوستگی محیط و سپس معادله دینامیکی محیط محاسبه شده و معادله ۴ به دست می آید که مبنای مسائل آکوستیکی است [۲۹-۳۰].

$$\nabla^2 P = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (4)$$

شکل ۱ نشان دهنده کلیه شرایط مرزی سیال است. معادله

۵ شرایط مرز ۱ را نشان می دهد.

$$\dot{v}_n = \ddot{u}_n = \psi^T \ddot{u} \quad (5)$$

که بردار کسینوس هادی بردار عمود بر سطح و \dot{v}_n سرعت در راستای عمودی است.

در راستای عمودی برای مرز ۲ سرعت به صورت $\dot{v} = 0$ بیان شده و شرایط مرزی ۳ و ۴ نیز از طریق معادلات ۶ و ۷ بیان می شود.

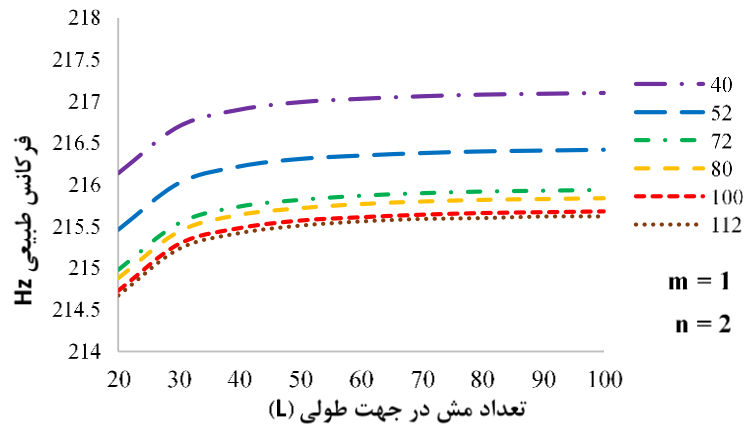
$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = -\frac{1}{g} \ddot{p} \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\frac{1}{C} \dot{p} \quad (7)$$

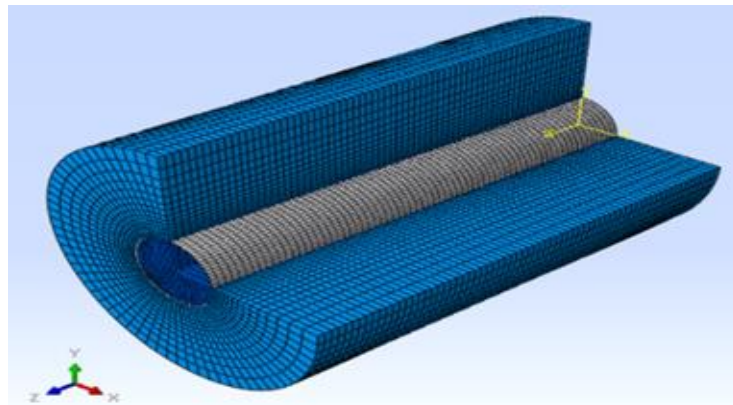
با اعمال شرایط مرزی و انتگرال گیری و اعمال روش گالرکین بر معادله ۴، فرم ضعیف شده معادله سیال-سازه، به صورت رابطه (۸) خواهد شد.

$$[S] \frac{\partial}{\partial t^2} \{P_i\} + [C_f] \frac{\partial}{\partial t} \{P_i\} + [H] \{P_i\} + [V] \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{u_i\} = 0 \quad (8)$$

در معادله بالا S ماتریس جرم سیال، C ماتریس میرایی سیال و H ماتریس سفتی سیال هستند. برای حل مسائل سیال-سازه باید معادله ۳ و معادله ۸ را به طور همزمان حل کرد. شکل ماتریسی حل این معادلات به صورت معادله ۹ برای بررسی ارتعاشات سازه در محیط سیال بوده و اساس حل این نوع مسائل در نرم افزارهای المان محدود همچون آباکوس این معادله است.



شکل ۳- نمودار بررسی استقلال از مش



شکل ۴- مدل سیال و سازه مش‌بندی شده در نرم‌افزار

برای تجزیه و تحلیل ارتعاشات از دستگاه شرکت *National Instruments* و از شتاب‌سنج پیزوالکتریک ساخت شرکت PCB و دارای محدوده فرکانس $0.5 \text{ Hz} < f_r < 3000 \text{ Hz}$ برای ثبت تغییرات سرعت ارتعاشی استفاده شد. در شکل ۶ دستگاه اندازه‌گیری فرکانس و نحوه نصب شتاب‌سنج نمایش داده شده است. برای انجام آزمایش در حالت مغروق، از یک حوضچه پلاستیکی با قطر ۱/۵ متر و ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر استفاده شد. داده‌های تجربی به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار متلب و با روش FFT، از حوزه زمان به حوزه فرکانسی تبدیل شد. نمونه‌ای از این داده‌ها در شکل ۷ آمده است.

شرط مرزی در همه آزمایش‌ها به صورت آزاد یا به اصطلاح Free-Free است که نمونه آن در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۵- پوسته‌های استوانه‌ای مورد آزمایش در طول و قطرهای مختلف

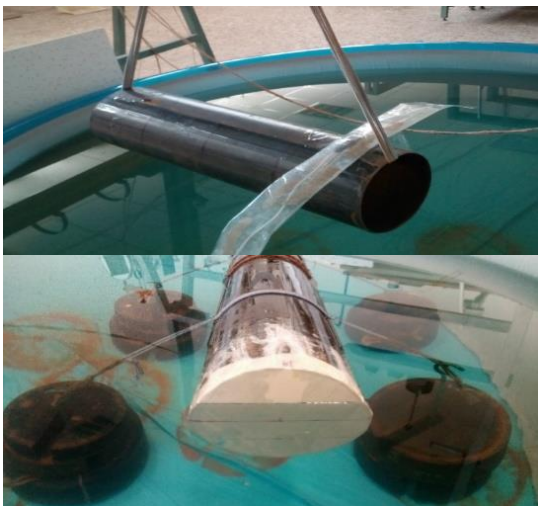
با توجه به اینکه اغلب شتاب‌سنج‌ها و اتصالات آن‌ها ضد آب نیستند، شتاب‌سنج با استفاده از پلاستیک، ضد آب شد. در شکل ۹ روش ضد آب کردن شتاب‌سنج قابل مشاهده است. چهار حالت مختلف مورد آزمایش قرار گرفت که حالت افقی دو سر باز و افقی دو سر بسته در شکل ۱۰ و حالت عمودی پر شده از آب (یک‌طرف باز) و حالت عمودی دو طرف باز در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

۵- نتایج و بحث

در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی در عمق‌های مختلف غوطه‌وری آمده است. نتایج آزمایش‌های تجربی با حرف E و به صورت نقطه و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با حرف N به صورت خط‌چین نمایش داده شده است.



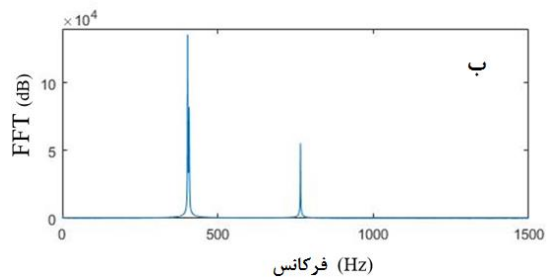
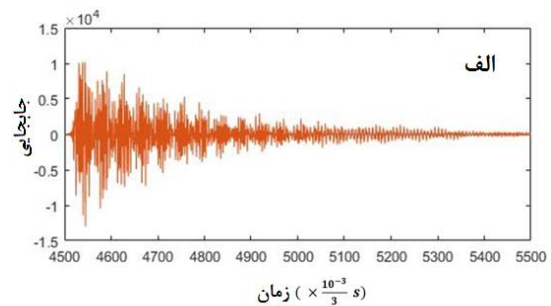
شکل ۹- نحوه نصب شتاب‌سنج روی پوسته در حالت خشک و مغروق



شکل ۱۰- حالت افقی دو سر باز و افقی دو سر بسته



شکل ۶- نمایش دستگاه اندازه‌گیری فرکانس و نحوه نصب شتاب‌سنج به پوسته استوانه‌ای



شکل ۷- الف) جابجایی ایجاد شده در حوزه زمان و ب) استفاده از تبدیل FFT و آوردن نتایج در حوزه فرکانس



شکل ۸- نمونه‌ای از نحوه اعمال شرط مرزی



شکل ۱۱- حالت عمودی پرشده از آب (یک طرف باز) و عمودی دو طرف باز

ضمناً در حالت‌های یکسان آزمایش تجربی (نقطه) و شبیه‌سازی عددی (خط‌چین)، از یک نوع رنگ، استفاده شده است. هشت نوع حالت مختلف تماس با آب که سه مورد به صورت غوطه‌وری افقی، سه مورد به صورت غوطه‌وری عمودی، یک حالت خشک و یک حالت مغروق کامل است، در مسائل شبیه‌سازی و آزمون‌های تجربی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

۱-۵- صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی

جدول ۲ صحت سنجی نتایج تجربی و عددی برای ۹۵ حالت مختلف برای پوسته شماره ۱ و ۲ را نمایش می‌دهد. اعداد

جدول ۲ - مقایسه نتایج تجربی و عددی فرکانس‌های طبیعی (Hz) به دست آمده برای برخی از حالات پوسته شماره ۱ و ۲

حالت آزمایش	شماره مود		خشک		عمق غوطه‌وری		مغروق		n	m
	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی	تجربی		
افقی دو طرف پرشده	۴۰۸	۴۱۴	۳۷۹	۳۵۷	۳۴۰	۳۶۰	۳۲۴	۳۰۸	۲	۰
	۱۱۴۷	۱۱۷۱	۱۰۱۶	۱۰۵۳	۹۷۲	۹۷۵	۹۳۲	۹۴۰	۳	۰
افقی دو طرف باز	۴۰۸	۴۱۴	۳۳۸	۳۴۰	۲۹۳	۲۹۰	۲۵۴	۲۵۰	۲	۰
	۱۱۴۷	۱۱۷۱	۹۶۰	۹۶۸	۸۵۰	۸۴۳	۸۰۴	۸۱۲	۳	۰
عمودی دو طرف باز	۱۳۹۸	۱۴۱۰	۱۳۹۳	۱۳۵۰	۱۲۳۳	۱۱۹۴	۱۰۸۷	۹۶۹	۳	۲
	۴۲۱	۴۲۷	۴۰۹	۴۱۶	۳۸۷	۳۸۵	۳۱۳	۳۱۹	۲	۱
عمودی پرشده	۱۱۶۳	۱۱۸۸	۱۱۴۴	۱۱۶۹	۱۰۱۷	۹۷۲	۹۵۱	۹۱۶	۳	۰
	۱۳۷۳	۱۳۷۸	۱۲۲۸	۱۱۹۱	۱۰۴۶	۹۸۸	۹۸۸	۹۳۰	۲	۲
افقی دو طرف باز	۱۳۹۸	۱۴۱۰	۱۲۹۱	۱۲۸۳	۱۱۷۱	۱۲۰۹	۱۰۹۴	۱۱۲۰	۳	۰
	۱۳۷۳	۱۳۷۸	۱۲۹۳	۱۲۴۸	۱۱۰۳	۱۰۹۱	۱۰۹۲	۱۰۴۹	۲	۲
عمودی پرشده	۱۳۹۸	۱۴۱۰	۱۳۲۴	۱۳۳۵	۱۲۳۴	۱۲۲۸	۱۲۱۰	۱۱۴۱	۳	۰
	۴۰۳	۴۱۴	۳۳۰	۳۴۲	۲۹۳	۳۰۴	۲۴۵	۲۵۲	۲	۰
افقی دو طرف باز	۱۱۴۰	۱۱۷۲	۹۳۴	۹۹۴	۸۶۶	۸۸۹	۷۹۵	۸۰۱	۳	۰
	۷۵۱	۷۴۶	۵۷۶	۵۷۱	۵۲۶	۵۰۰	۴۶۷	۴۴۴	۲	۲
افقی دو طرف پرشده	۱۲۲۴	۱۲۴۵	۱۰۷۴	۱۰۶۷	۹۴۵	۹۱۹	۸۴۰	۹۴۹	۳	۰
	۴۰۳	۴۱۴	۳۷۱	۳۶۰	۳۴۴	۳۴۲	۳۱۳	۳۱۰	۲	۰
عمودی پرشده	۱۱۴۰	۱۱۷۲	۱۰۲۹	۱۰۶۱	۹۶۸	۹۸۲	۹۱۱	۹۴۶	۳	۰
	۷۵۱	۷۴۶	۶۵۳	۶۲۰	۶۱۵	۵۹۵	۵۳۳	۵۵۲	۲	۲
عمودی پرشده	۱۲۲۴	۱۲۴۵	۱۱۲۴	۱۱۳۱	۱۰۴۲	۹۹۴	۹۶۰	۹۷۹	۳	۰
	۸۹۲	۸۷۵	۸۹۲	۸۷۵	۸۹۲	۸۷۵	۸۹۲	۸۷۵	۲	۲

۵-۳- بررسی تفاوت در تماس بیرونی و درونی پوسته با سطح خیس شده یکسان

با توجه به تطابق خوب نتایج تجربی و عددی، اثر سطح خیس شده بر فرکانس‌های ارتعاشی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۱۴ شمایی از تماس سیال با سطح خارجی و داخلی پوسته در دو حالت افقی مغروق دو سر بسته (تماس بیرونی) و عمودی یک‌طرف بسته (تماس داخلی) را نشان می‌دهد. مطابق نتایج شکل ۱۵ کاهش فرکانس در حالت داخلی و خارجی یکسان بوده و مقایسه آن‌ها مطابقت دو حالت را نشان می‌دهد. دلیل این موضوع این است که با توجه به ضخامت بسیار کم پوسته، مساحت سطح داخلی و خارجی یکسان بوده و اثر جرم افزوده در هر دو حالت برابر است. از طرف دیگر نیز سطح خیس شده خارجی با سطح خیس شده داخلی برابر بوده و در طول‌های مساوی با آب در تماس هستند. این نتیجه نشان می‌دهد که می‌توان فرکانس‌های طبیعی یک پوسته را به‌صورت تجربی، به‌جای حالت مغروق افقی، در حالت پر شده عمودی به دست آورد که این نتیجه نقش مهمی در انجام آزمایش آنالیز مودال زیرآب دارد.

۵-۴- بررسی تفاوت تأثیر سطح خیس شده یکسان برای پوسته نیمه مغروق در حالت عمودی و افقی

میزان تغییر فرکانس طبیعی پوسته وابسته به مقدار سطح خیس شده آن است. شکل ۱۶ هندسه سطح خیس شده و تأثیر آن بر فرکانس طبیعی پوسته در حالت عمودی (نصف طول) و در حالت افقی (نصف قطر) را بررسی می‌کند. سطح خیس شده هر دو حالت، برابر و به اندازه نصف مجموع سطح داخلی و خارجی پوسته است و در این حالت فقط هندسه تماس متفاوت است. شکل ۱۷ که مربوط به پوسته شماره ۱ است، بیان می‌کند که کاهش فرکانس طبیعی در حالت افقی بیشتر از حالت عمودی است و نشان‌دهنده اثر هندسه سطح خیس شده است. می‌توان گفت با وجود آن که سطح خیس شده در هر دو حالت برابر است، اما به دلیل این که در حالت افقی، طول بیشتری از استوانه با آب در تماس بوده و اثر جرم افزوده بر آن بیشتر است، فرکانس طبیعی آن با کاهش بیشتری روبرو شده است.

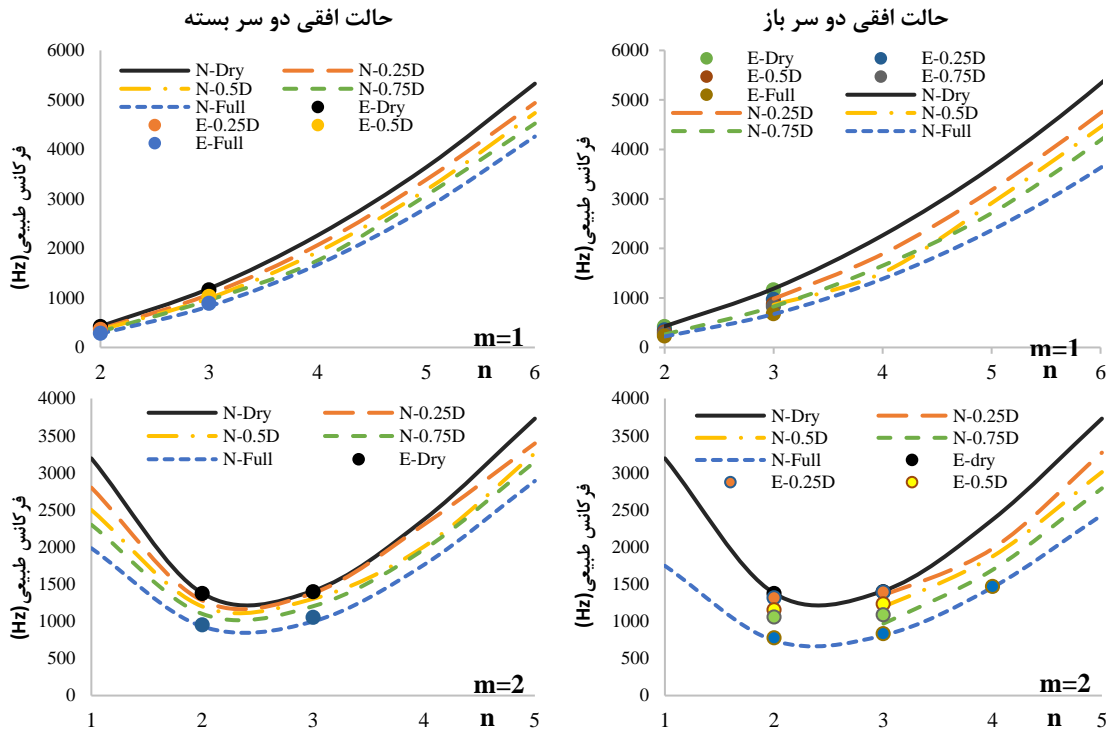
موجود در ردیف اول از هر بخش (m,n) فرکانس طبیعی مربوط به آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی را نشان می‌دهد. در حالت افقی ملاک عمق غوطه‌وری بر اساس قطر (D) بوده و در حالت‌های عمودی بر اساس طول استوانه (L) است. همان‌طور که مشخص است، خطای بین نتایج تجربی و عددی در اکثر موارد کم و قابل قبول بوده و از دقت خوبی برخوردار است و می‌توان به نتایج عددی برای بررسی سایر پارامترها اعتماد کرد.

۵-۲- بررسی تغییرات فرکانس طبیعی در عمق‌های مختلف غوطه‌وری

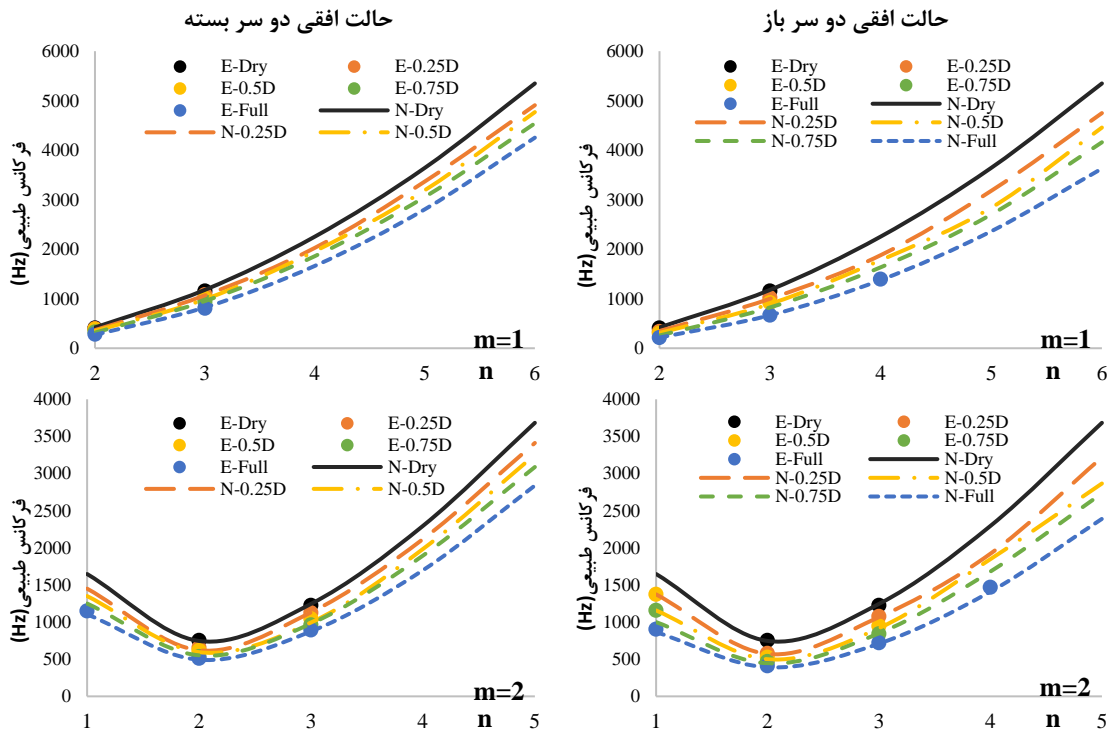
تغییر فرکانس طبیعی پوسته در حالت مغروق افقی دو سر باز و در حالت افقی دو سر بسته در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش عمق غوطه‌وری، فرکانس‌های طبیعی کاهش می‌یابند. این کاهش فرکانسی به‌صورت یکنواخت نبوده و کاهش فرکانس‌های طبیعی در نیم موج‌های محیطی (n) مختلف، یکسان نیست؛ به‌طوری که برای نیم موج‌های محیطی ابتدایی و انتهایی (ابتدای غوطه‌وری و در حالت مغروق کامل)، زیاد و ناگهانی بوده و برای نیم موج‌های محیطی مربوط به فرکانس مینیمم، کم است. می‌توان گفت، اثر جرم افزوده در نیم‌موج‌های محیطی مربوط به فرکانس کمینه، کمتر است. با افزایش فرکانس طبیعی اثرات جرم افزوده افزایش می‌یابد؛ همچنین در حالت افقی، چه هنگام آغاز غوطه‌وری و چه هنگام مغروق شدن کامل، میزان تغییرات در سطح مرطوب نسبت به کل مساحت سطح پوسته، قابل توجه است.

شکل ۱۳ تغییر فرکانس طبیعی پوسته در حالت مغروق شده عمودی دوسر باز و در حالت پر (نیمه‌پر) شده با آب را نشان می‌دهد. کاهش ناگهانی نیم موج‌های محیطی ابتدایی در آغاز غوطه‌وری اتفاق افتاده و در حالت مغروق کامل، کاهش ناگهانی نداریم و با افزایش نیم موج‌های محیطی، این حالت معکوس شده است؛ به‌طوری که در آغاز غوطه‌وری بدون کاهش ناگهانی و در پایان غوطه‌وری و مغروق کامل، شاهد کاهش ناگهانی فرکانس طبیعی هستیم. این پدیده نشان می‌دهد، نحوه تماس سازه با سیال در نحوه تغییرات فرکانس طبیعی آن مؤثر است. از طرفی تطابق خوب نتایج آزمایش‌های تجربی با شبیه‌سازی عددی، نشان‌دهنده صحت نتایج است.

پوسته شماره ۱

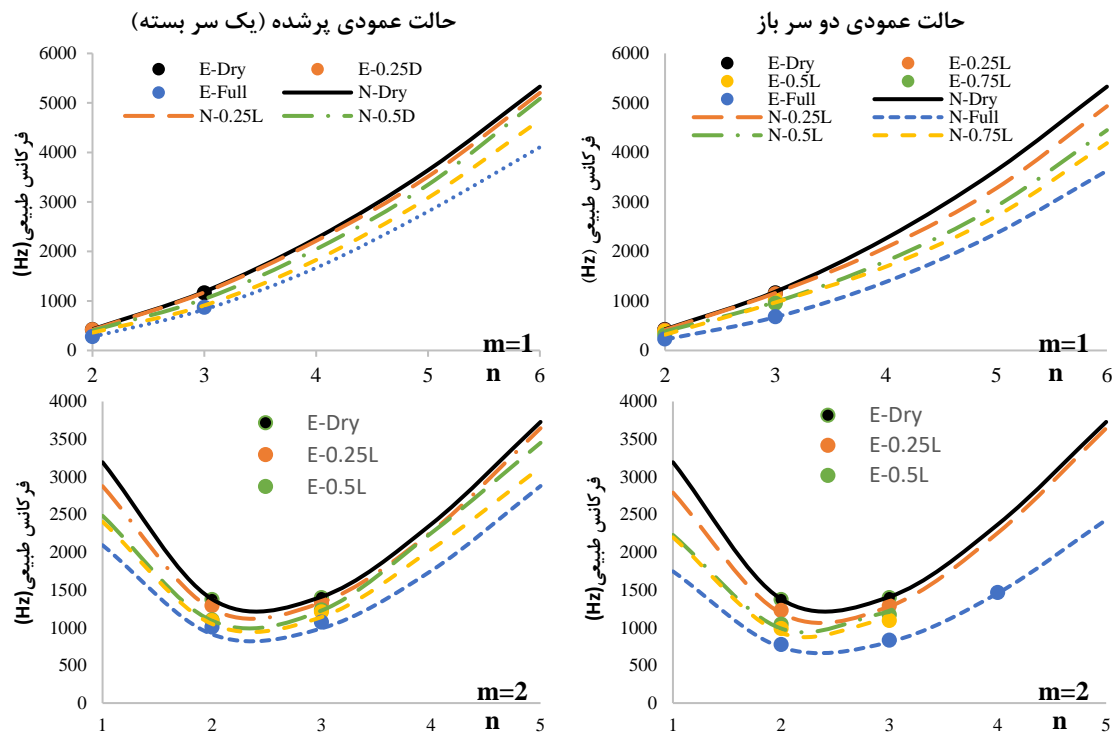


پوسته شماره ۲

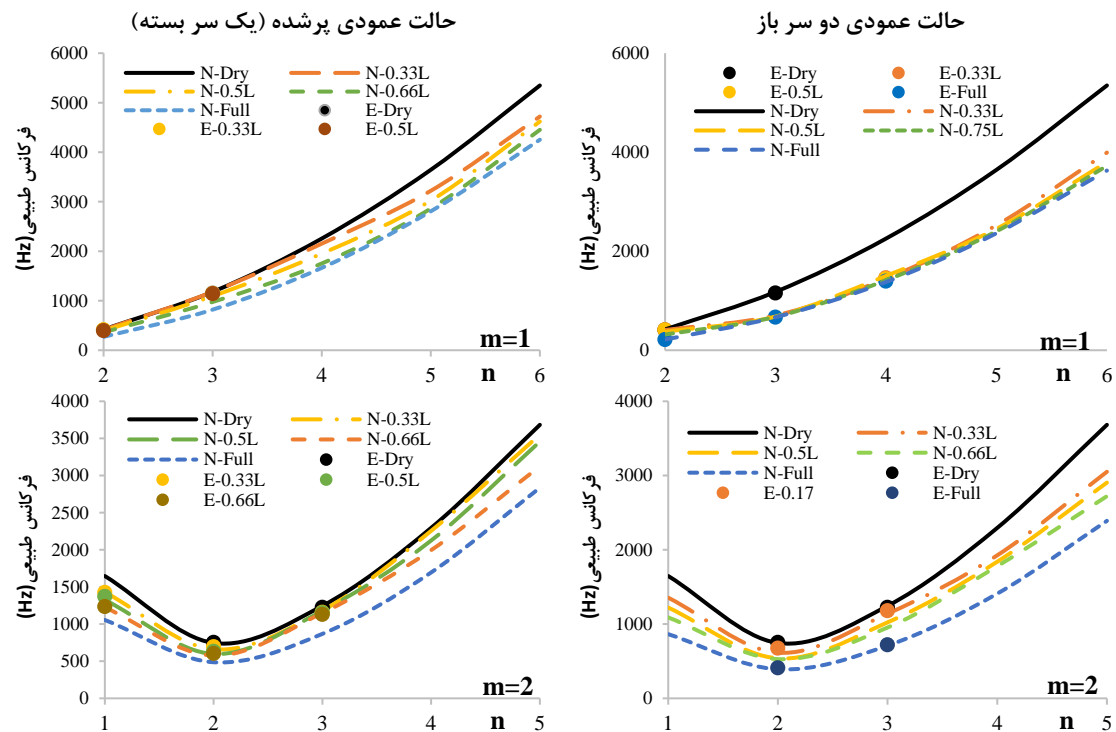


شکل ۱۲- تغییرات فرکانس طبیعی پوسته‌ها در عمق‌های مختلف غوطه‌وری به صورت تجربی و عددی برای دو حالت افقی

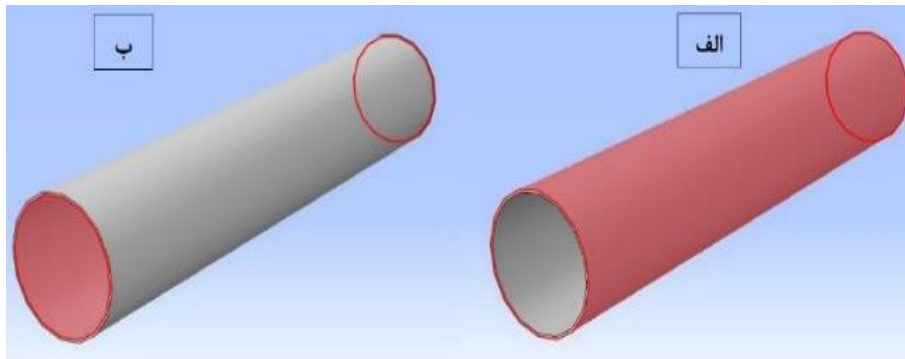
پوسته شماره ۱



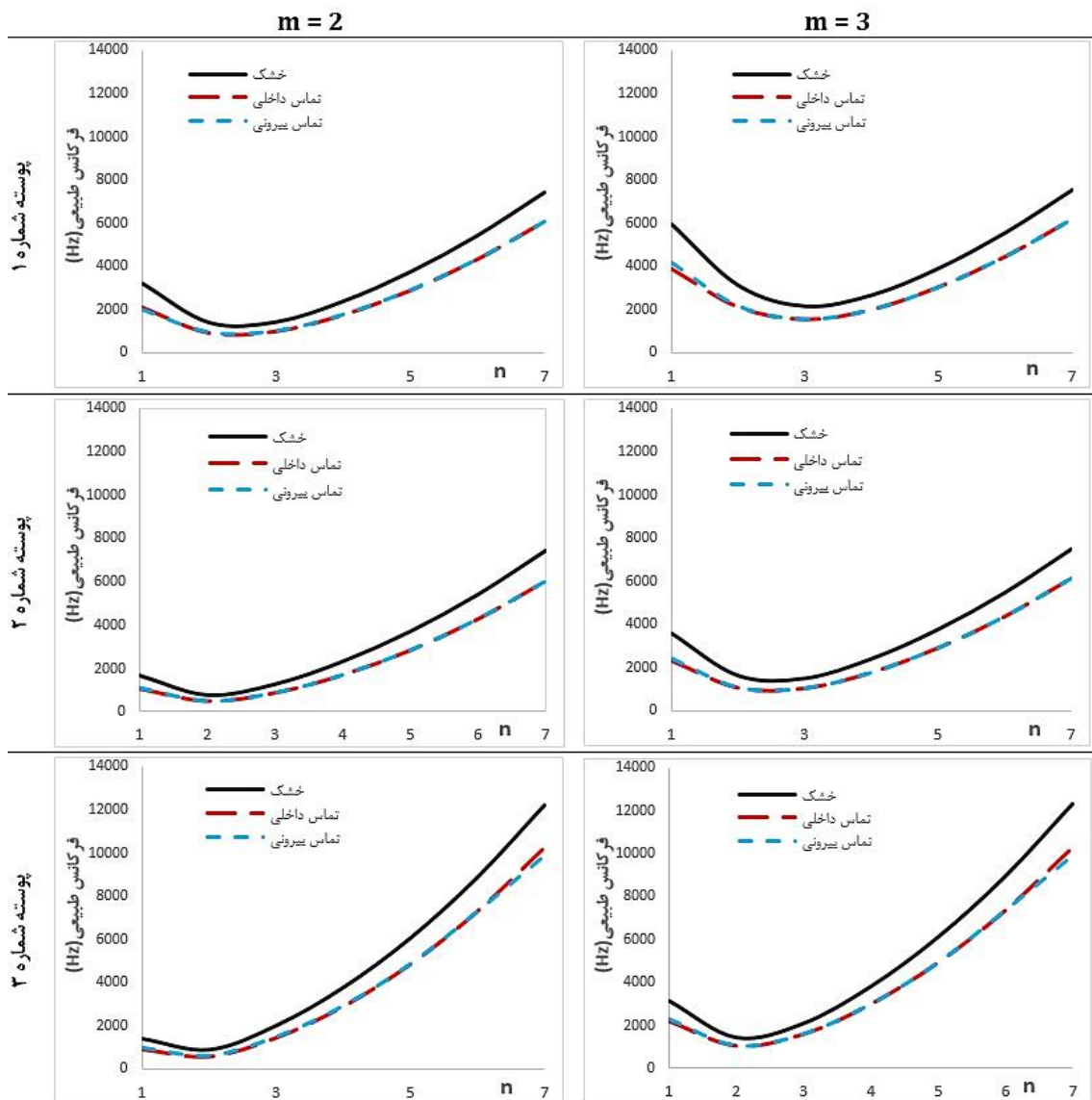
پوسته شماره ۲



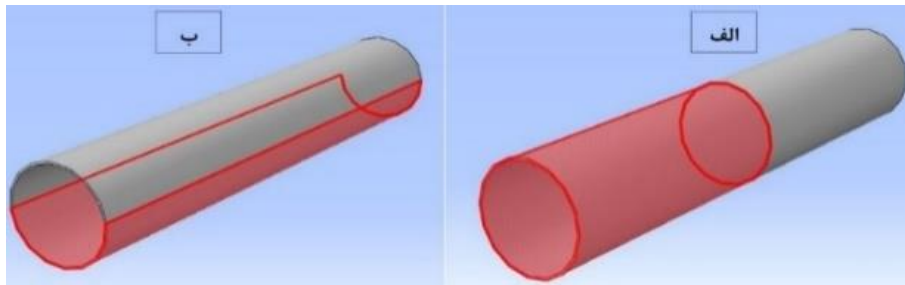
شکل ۱۳- تغییرات فرکانس طبیعی پوسته‌ها در عمق‌های مختلف غوطه‌وری به صورت تجربی و عددی برای دو حالت عمودی



شکل ۱۴- الف) تماس خارجی حالت افقی مغروق دو سر بسته و ب) تماس داخلی حالت عمودی یک طرف بسته



شکل ۱۵- تغییرات فرکانس طبیعی با سطح خیس شده یکسان در حالت مغروق دو سر بسته (بیرونی) و پرشده با آب (درونی)

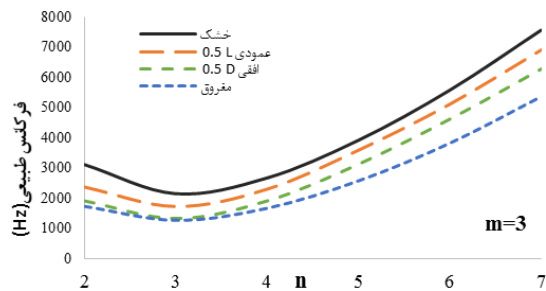


شکل ۱۶- الف) پوسته عمودی نیمه پر شده دو سر باز به اندازه نصف طول و ب) پوسته مغروق شده افقی دو سر باز به اندازه نصف قطر

در تغییرات فرکانس طبیعی مؤثر است و علت این موضوع می‌تواند تفاوت تأثیر جرم افزوده در شکل مودهای طولی و محیطی باشد.

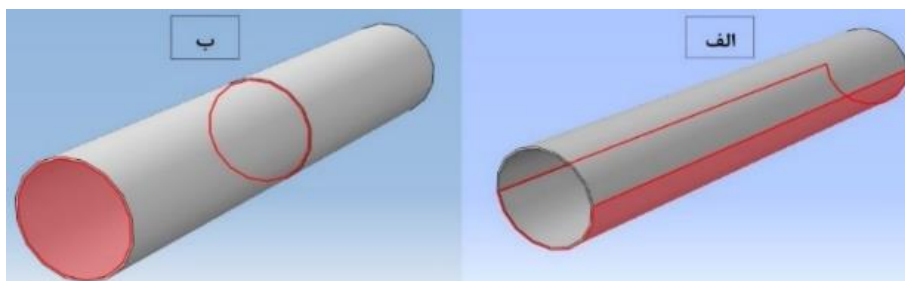
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ارتعاشات پوسته استوانه‌ای فلزی در تماس با آب به روش تجربی و شبیه‌سازی عددی با شرط مرزی آزاد-آزاد مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با آزمایش‌های تجربی با دقت قابل‌قبولی اعتبارسنجی شدند. در این تحقیق نشان داده شد که کاهش فرکانس‌های طبیعی پوسته استوانه‌ای یکنواخت نیست. در حالت غوطه‌وری افقی، در ابتدای غوطه‌وری و پایان آن (مغروق کامل) کاهش فرکانسی برای همه نیم موج‌های محیطی ناگهانی است، اما در حالت غوطه‌وری عمودی، کاهش ناگهانی فرکانس طبیعی در ابتدای غوطه‌وری (تبدیل حالت خشک به نیمه مغروق)، برای نیم موج‌های پایین اتفاق می‌افتد، اما در انتهای غوطه‌وری (تبدیل حالت نیمه مغروق به مغروق کامل) این کاهش ناگهانی برای نیم موج‌های بالا مشاهده می‌شود.



شکل ۱۷- تغییرات فرکانس طبیعی پوسته افقی دوسر باز (نصف قطر پوسته)، عمودی دوسر باز (نصف طول پوسته)، مغروق کامل و خشک

در حالت دیگر، پوسته مغروق شده افقی دو سر بسته و پوسته عمودی نیمه پر با آب که در هر دو حالت، فقط سطوح داخلی با آب در تماس هستند و سطح خیس شده در هر دو حالت یکسان بوده و برابر با یک‌چهارم مجموع سطح داخلی و خارجی پوسته است (شکل ۱۸) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شکل ۱۹ بیان می‌کند که با کاهش سطح مورد بررسی، نتایج دو نمودار تغییرات فرکانس طبیعی پوسته در حالت عمودی و افقی نسبت به حالت قبل مطابقت بیشتری یافته است. این حالت نشان می‌دهد که هندسه‌ی سطح مرطوب با جرم افزوده



شکل ۱۸- الف) پوسته مغروق شده افقی دو سر بسته به اندازه نصف قطر و ب) پوسته عمودی دو سر بسته به اندازه نصف طول

[9] Zhang G, Li T, Zhu X, Yang J, Miao Y (2017) Free and forced vibration characteristics of submerged finite elliptical cylindrical shell. Ocean Eng 129: 92-106.

[۱۰] عیسوند زیبایی م (۱۳۹۷) تحلیل فرکانس‌های طبیعی یک پوسته استوانه‌ای ایزوتروپیک چند لایه تقویت شده با سه رینگ تحت فشارهای خارجی بر اساس تئوری مرتبه اول برشی. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۲۳۳-۲۴۶: (۳)۸.

[۱۱] انصاریان ی، جعفری ع (۱۳۹۶) بررسی ارتعاشات آزاد و اجباری پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی محتوی سیال. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۹۳-۱۰۹: (۲)۷.

[۱۲] شاطرزاده ع (۱۳۹۲) تحلیل ارتعاش آزاد پوسته‌های نیم کره کامپوزیتی دارای برش در رأس. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۳۳-۴۲: (۱)۳.

[۱۳] همتی ر، طالبی توتی م (۱۳۹۸) بررسی اثر شرایط مرزی، زاویه رأس و جنس هسته بر ارتعاشات آزاد پوسته کوپل مخروطی-مخروطی ساندویچی. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۱۸۰-۱۶۷: (۴)۹.

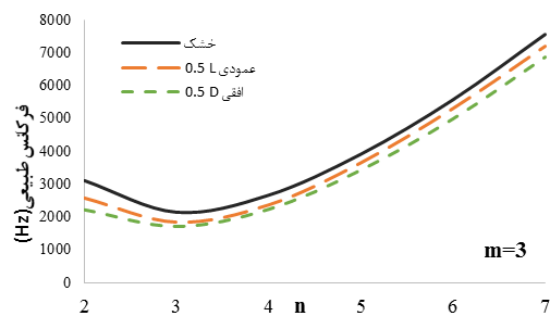
[۱۴] فایض م، داور ع، اسکندری جم ج، حیدری بنی م (۱۳۹۹) تحلیل ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی با استفاده از تئوری برشی مرتبه اول. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۷۷-۹۶: (۴)۱۰.

[۱۵] محمدی مهر م، قربان پور آرانی ع، روستا ناوی ب (۱۳۹۴) تحلیل ارتعاشات آزاد پانل استوانه‌ای ساخته شده از مواد مدرج تابعی قرار گرفته بر روی بستر الاستیک پاسترناک تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی با استفاده از تئوری برشی مرتبه اول. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۱۴۹-۱۶۳: (۱)۵.

[۱۶] جعفری نیاسر م، جعفری ع، ایرانی رهی م (۱۳۹۹) ارتعاشات آزاد پوسته مخروطی مدرج تابعی چرخان با وصله‌های از جنس مواد هوشمند. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۱۲۷-۱۴۰: (۲)۱۰.

[۱۷] قناد کهنوئی م، فارونی ح (۱۳۹۳) جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها در پوسته‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم چرخان

هم‌چنین نتایج نشان داد که میزان کاهش فرکانس‌های طبیعی پوسته در دو حالت تماس سطح داخلی و تماس سطح خارجی آن با آب، برابر است و می‌توان فرکانس‌های طبیعی یک پوسته را به جای حالت مغروق افقی، در حالت پرشده عمودی به دست آورد که در آزمایش‌های تجربی بسیار حائز اهمیت است. در صورت برابر بودن سطح خیس شده نیز، هندسه سطح خیس شده اهمیت پیدا می‌کند، به طوری که کاهش فرکانس طبیعی در حالت افقی بیشتر از حالت عمودی است و علت آن تأثیر طول سطح خیس و جرم افزوده بیشتر در حالت افقی است.



شکل ۱۹- تغییرات فرکانس طبیعی حالت مغروق پوسته افقی دوسربسته (نصف قطر پوسته)، عمودی نیمه‌پر (نصف طول پوسته) و خشک

۷- مراجع

- [1] Palacios Gomez OF (1970) Vibrations of preloaded cylindrical shells. University of Leicester.
- [2] Ugural AC (1999) Stresses in plates and shells. McGraw-Hill Boston.
- [3] Goncalves P, Batista R (1987) Frequency response of cylindrical shells partially submerged or filled with liquid. J Sound Vib 59-70.
- [4] Maheri M, Severn R (1992) Experimental added-mass in modal vibration of cylindrical structures. Eng Struct 163-175.
- [5] Missaoui J, Cheng L, Richard M (1996) Free and forced vibration of a cylindrical shell with a floor partition. J Sound Vib 190(1): 21-40.
- [6] Lakis A, Neagu S (1997) Free surface effects on the dynamics of cylindrical shells partially filled with liquid. J Sound Vib 207(2): 175-205.
- [7] Jeong K.-H, Kim K.-J. (1998), Free vibration of a circular cylindrical shell filled with bounded compressible fluid. J Sound Vib 217(2): 197-221.
- [8] Ergin A, Temarel P (2002) Free vibration of a partially liquid-filled and submerged, horizontal cylindrical shell. J Sound Vib 951-965.

- shallow water using the wave propagation approach. Ocean Eng 142: 280-291.
- [24] Guo W, Li T, Zhu X, Miao Y (2018) Sound-structure interaction analysis of an infinite-long cylindrical shell submerged in a quarter water domain and subject to a line-distributed harmonic excitation. J Sound Vib 422: 48-61.
- [25] Askari E, Jeong KH (2010) Hydroelastic vibration of a cantilever cylindrical shell partially submerged in a liquid. Ocean Eng 37: 1035-1027.
- [26] Tatsuzo K, Mutsumi T (1990) Breathing vibrations of a liquid-filled circular cylindrical shell. Int J Solids Struct 1005-1015.
- [27] Shariati SK, Mogadas SM (2011) Vibration analysis of submerged submarine pressure hull. J Vib Acoust 133(1): 11-13.
- [28] Zienkiewicz OC (1969) Coupled vibrations of a structure submerged in a compressible fluid. In Proc. of Symposium on Finite Element Techniques held at the University of Stuttgart.
- [29] Zienkiewicz O, Taylor R (2000) The finite element method. Butterworth Heinemann, Oxford, Auckland, Boston, Johannesburg, Melbourne, New Delhi.
- [30] Paidoussis MP (1998) Fluid-structure interactions: Slender structures and axial flow. Academic press.
- FGM تحت فشار به کمک تئوری تغییر شکل برشی مرتبه سوم. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۷۸-۶۵ (۴): ۱.
- [18] Paak M, Paidoussis M, Misra A (2014) Nonlinear vibrations of cantilevered circular cylindrical shells in contact with quiescent fluid. J Fluids Struct 49: 283-302.
- [19] Naumova N, Ivanov D, Voloshinova T, Ershov B (2015) Mathematical modelling of cylindrical shell vibrations under internal pressure of fluid flow. In Mechanics-Seventh Polyakhov's Reading International Conference.
- [20] Bochkarev S, Lekomtsev S, Matveenko V (2015) Natural vibrations of loaded noncircular cylindrical shells containing a quiescent fluid. Thin Wall Struct 90: 12-22.
- [21] Rahmanian M, Firouz-Abadi R, Cigeroglu E (2017) Dynamics and stability of conical/cylindrical shells conveying subsonic compressible fluid flows with general boundary conditions. Int J Mech Sci 120: 42-61.
- [22] Guo W, Li T, Zhu X, Miao Y, Zhang G (2017) Vibration and acoustic radiation of a finite cylindrical shell submerged at finite depth from the free surface. J Sound Vib 393: 338-352.
- [23] Wang P, Li T, Zhu X (2017) Free flexural vibration of a cylindrical shell horizontally immersed in