



تحلیل تجربی و عددی تاثیر عمق غوطه‌وری بر فرکانس‌های طبیعی صفحه دایروی مقید محیطی مغروق در مجاورت سطح آزاد آب

امیر ناصرالاسلامی¹، محمود سالاری^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

* صندوق پستی 1655358548، msalari@ihu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 16 فروردین 1395

پذیرش: 24 خرداد 1395

ارائه در سایت: 23 تیر 1395

کلید واژگان:

فرکانس طبیعی

آنالیز تجربی

ورق دایروی

عمق غوطه‌وری

سطح آزاد آب

چکیده

شناسایی رفتار دینامیکی و ارتعاشی سازه‌های دریایی در نزدیک سطح آزاد دریا یکی از موضوعات مهم در بحث طراحی سازه‌های دریایی می‌باشد. واضح است که جنس محیط و اثرات اندرکنش سازه و سیال بر رفتار ارتعاشی سیستم‌ها تاثیرگذار می‌باشد. در چنین شرایطی که سازه تحت تاثیر اثرات نامتقارن محیطی قرار دارد، مطالعه رفتار سازه‌ها از پیچیدگی‌های بیش‌تری برخوردار خواهد بود. در این مقاله اثرات عمق غوطه‌وری بر فرکانس طبیعی مود اول یک ورق دایروی مقید محیطی که موازی با سطح آزاد آب قرار گرفته است به صورت تجربی و عددی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. تکنیک و روش به کار رفته در این مقاله برای اندازه‌گیری تجربی فرکانس‌های طبیعی یکی دیگر از نوآوری‌های این تحقیق بوده است. تحلیل‌های عددی به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شده است. مقایسه نتایج عددی و اندازه‌گیری‌های تجربی، نشان‌دهنده وجود سازگاری بسیار خوب بین آن‌هاست. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عمق غوطه‌وری تا نسبت مشخصی از قطر دیسک به عمق غوطه‌وری، فرکانس‌های طبیعی کاهش می‌یابند و پس از آن تقریباً ثابت می‌مانند.

Experimental and numerical analysis of the effect of immersion depth on the natural frequencies of a bounded circular plate submerged in vicinity of the water free surface

Amir Nasserolelami, Mahmoud Salari*

Department of Mechanical Engineering, Imam Hussein University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1655853548, Tehran, Iran, msalari@ihu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 04 April 2016
Accepted 13 June 2016
Available Online 13 July 2016

Keywords:
Natural frequency
Experimental analysis
Circular plate
Immersion depth
Water free surface

ABSTRACT

Recognition of the dynamical behavior and vibrations of marine structures, submerged in vicinity of the water free surface, is one of the most important issues in the design of marine structures. It is obvious that physical properties of the ambient fluid have some influence on vibrational frequencies of the structures. For the structures that have been exposed under the influences of asymmetric environmental conditions, prediction of their dynamic behaviors is more complicated. In this paper the effects of immersion depth on first natural frequency of a bounded circular plate that was placed parallel in the vicinity of the water surface, are studied numerically and experimentally. The techniques used for exciting the plate and measurements of natural frequencies are innovations of this research. Numerical solutions are done using ABAQUS software. Comparison of the numerical and experimental results shows a good consistency. The investigations showed that increasing the immersion depth, the ratio of the depth to plate diameter reached to a certain value and the natural frequencies were also decreased. After that it remained constant while the immersion depths of plate were increased.

1- مقدمه

است که در آن مشخصات دینامیکی سیستم یعنی فرکانس‌های طبیعی، ضریب میرایی و شکل مودها به دست می‌آیند و براساس آن مدل ریاضی رفتار دینامیکی سیستم نیز استخراج خواهد شد. این مدل ریاضی به نام مدل مودال سیستم شناخته می‌شود و اطلاعات مربوط به مشخصات سیستم را به نام داده‌های مودال در خود جای داده است. تلاش‌های بسیاری انجام شده تا بتوانند روش حل برای پیش‌بینی فرکانس‌های طبیعی یک سازه در تماس با سیال را به دست آورند که در این زمینه محققان زیادی به صورت تجربی، تحلیلی و عددی ارتعاشات ورق در تماس با آب را مورد بررسی قرار دادند.

ورق و پوسته‌های نازک در تماس با سیال، بخش اصلی بسیاری از سازه‌های دریایی را تشکیل می‌دهند. تحلیل ارتعاشات این سازه‌ها موضوع مهمی است که تاکنون با روش‌های مختلفی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در طراحی سازه‌هایی که توسط بارها و محرک‌های ارتعاشی و نوسانی تحت نوسان می‌باشند، آنالیز مودال اجتناب‌ناپذیر است. اما موضوعی که باعث پیچیده‌تر شدن آنالیز مودال پوسته‌ها می‌شود تماس آن‌ها با سیال است. آنالیز مودال فرایندی

Please cite this article using:

A. Nasserolelami, M. Salari, Experimental and numerical analysis of the effect of immersion depth on the natural frequencies of a bounded circular plate submerged in vicinity of the water free surface, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 396-402, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.mme.modares.ac.ir

در مخزن مستطیلی که به‌صورت جزیی پر از سیال شده است را مورد بررسی قرار دادند. تاری وردیلو و همکاران [22] مطالعاتی را در مورد ارتعاشات آزاد صفحه دایروی کوپل شده با سیال با استفاده از تئوری صفحه نازک انجام دادند. عسگری و همکاران [23] ارتعاشات آزاد صفحه دایروی مغروق در سیال را به روش تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها را با استفاده از روش رایلی ریتز به دست آوردند. در این تحقیق، فرکانس‌های طبیعی یک ورق مقید دایروی مغروق که به صورت موازی در مجاورت سطح آزاد آب قرار دارد به‌صورت تجربی و عددی استخراج شده است. در این تحقیق برای تحریک ورق از یک بوبین مغناطیسی با فرکانس قابل تنظیم استفاده شده و برای ثبت دامنه ارتعاشات ورق از یک هیدروفون استفاده شده است. برای تحلیل‌های عددی نیز از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است.

2- تعریف مساله، تجهیزات آزمایش و شرایط حل عددی

"شکل 1" نحوه قرار گرفتن ورق دایروی مقید محیطی در مخزن آب را نشان می‌دهد. نسبت ضخامت ورق، h به شعاع ورق، a بسیار کوچک است به‌گونه‌ای که فرض پوسته‌ای بودن برقرار گردد.

آنالیز غشای دایروی مقید محیطی در سیال تراکم‌ناپذیر در دو مرحله تحلیل عددی و آزمایشگاهی انجام می‌شود. در آنالیز تجربی از آنجایی که هدف، بررسی ارتعاشات غشای دایروی مقید محیطی در سیال تراکم‌ناپذیر است، برای ایجاد ارتعاش مناسب در ورق از یک لرزاننده الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. این دستگاه یک ترانس 8 آمپر است که با چسب سیلیکون عایق کاری شده است و طی عملیاتی روی آن تبدیل به مگنت شده است. با اعمال جریان متناوب توسط منبع تغذیه و فانکشن ژنراتور¹ به لرزاننده الکترومغناطیس، ورق که در فاصله مناسبی از آن قرار گرفته است مرتعش می‌شود. ورق گالوانیزه صنعتی به‌عنوان ورق مطلوب آزمایش انتخاب شده است چرا که سختی، قطر و ضخامت ورق انتخاب شده به‌گونه‌ای است که به

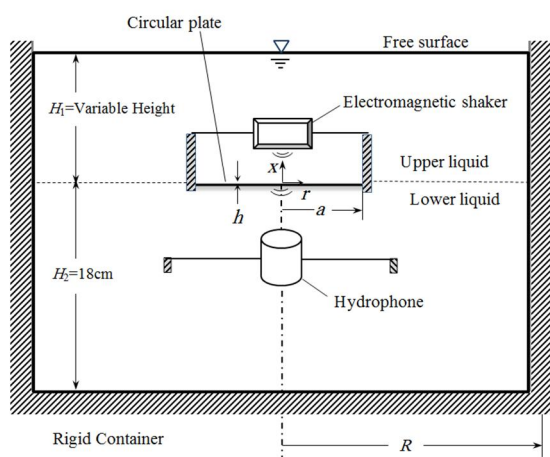


Fig. 1 A bounded circular plate Along with electromagnetic vibrator and hydrophone submerged in the rigid tank

شکل 1 ورق دایروی مقید محیطی به همراه دستگاه لرزاننده الکترومغناطیس و هیدروفون مغروق در مخزن صلب

وسیله ترانس 8 آمپر می‌توان فرکانس طبیعی اولیه را در ورق ایجاد کرد.

اسپینوسا و گالگو [1] مطالعاتی را روی ارتعاشات صفحات مغروق در آب با استفاده از روش‌های تجربی و تحلیلی با توجه و تمرکز به مودهای پایینی انجام دادند. رابینسون و پالمر [2] مطالعاتی را در مورد آنالیز مودال یک صفحه مستطیل شکل در شرایطی که روی سیال غیرقابل تراکم در فرکانس پایین و امواج سطحی با دامنه کوچک شناور است را انجام دادند و در نهایت توانستند معادلات ارتعاشی حاکم بر سیستم ورق- سیال را به‌دست آورند. گینسبرگ و چو [3] شکل مودهای یک صفحه در تماس با سیال سنگین را استخراج کردند. آمابیلی و همکاران [4] به مطالعه ارتعاشات آزاد صفحات حلقوی در تماس با سیال با استفاده از تعریف جرم افزوده و به کارگیری تابع تبدیل هنکل برای حل مساله اندرکنش سازه و سیال پرداخت. آمابیلی و دالیز [5] آنالیز ارتعاشات آزاد صفحه پایینی یک کانترینر دایروی را به‌صورت تحلیلی و آزمایشگاهی انجام دادند. کوکاک و آمابیلی [6] مطالعات تئوری و آزمایشگاهی خود را روی فرکانس‌های طبیعی یک صفحه دایره‌ای با لبه‌های آزاد به‌صورت شناور و یا کاملاً غوطه‌ور در سیال را انجام دادند. کوکاک و هان [7] تأثیر عمق سیال روی ارتعاشات صفحه دایروی که مقید نیست و در تماس با سیال است را بررسی کردند. آن‌ها پاسخ سیستم را در محدوده فرکانس‌های بالا بدون در نظر گرفتن امواج سطحی مورد ارزیابی قرار دادند. ژاو و چانگ [8] آنالیز ارتعاشات یک صفحه مستطیلی عمودی که از یک طرف با آب در تماس است را انجام دادند. آمابیلی [9] ارتعاشات آزاد ورق‌های دایره‌ای که در تماس با سطح آزاد سیال می‌باشند را تحلیل و بررسی نمود. او در این مقاله تأثیر تلاطم و عمق سیال را بر فرکانس‌های طبیعی ورق دایره‌ای به‌دست آورد. جیانگ و همکاران [10] یک ورق مستطیلی غوطه‌ور در سیال که تنها یک لبه آن گیردار است را با نسبت اضلاع مختلف مورد بررسی قرار دادند. جیانگ [11] جرم افزوده و فرکانس‌های ارتعاشات آزاد دو ورق مشخص کوپله با سیال محدود را بررسی کرد. ارگین و همکاران [12] با کارگیری روش المان مرزی به مطالعه ارتعاشات آزاد صفحاتی که به‌صورت جزیی در تماس با سیال هستند پرداخت. جیانگ و کیم [13] به بررسی ارتعاشات صفحه دایروی مغروق در سیال تراکم‌پذیر کران‌دار پرداختند. آن‌ها از سری بسط فوریه برای حل معادله تعادل دینامیکی استفاده کردند. ژاو و لیو [14] تأثیر نسبت طول به عرض در ورق‌های مستطیلی غوطه‌ور در سیال را که از یک سمت گیردار هستند، بر روی فرکانس‌های طبیعی مورد ارزیابی قرار دادند. اسماعیل‌زاده و همکاران [15] فرکانس ارتعاشات آزاد سازه‌هایی که شامل سیال و یا غوطه‌ور در آن هستند را به‌دست آوردند. آن‌ها از تابع پتانسیل برای محاسبه فشار هیدروستاتیکی روی سازه‌ها استفاده کردند. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که عمق سیال تأثیر مهمی روی برهم کنش سازه و سیال دارد. کیونگ- هون جنگ و همکارانش [16] در زمینه ارتعاشات آزاد ورق‌های دایره‌ای که در تماس با سیال لزج و غیرقابل تراکم می‌باشد، روشی تئوری ارائه کردند. عسگری و دانشمند [17] پتانسیل سرعت را در ناحیه غیرآشفته سیال فرمول‌بندی کردند. آن‌ها با صرف‌نظر کردن از امواج سطحی در فرمولاسیون با استفاده از روش رایلی ریتز مشخصه‌های دینامیکی را به‌دست آوردند. عسگری و جیانگ [18] روش تحلیلی ارائه شده توسط عسگری و دانشمند را توسعه و گسترش دادند. حسینی هاشمی و همکاران [19] به مطالعه ارتعاشات آزاد صفحه مستطیلی عمودی که روی یک فونداسیون الاستیک سوار شده است و تنها از یک طرف با سیال در تماس است پرداختند. آنالیز ارتعاشات آزاد صفحه مستطیلی مغروق در سیال یا شناور روی سطح آزاد مایع توسط حسینی هاشمی و همکاران [20] انجام شد. گودرزی و صباغ یزدی [21] میرایی هیدروستاتیکی صفحات افقی و عمودی

¹ Function generator

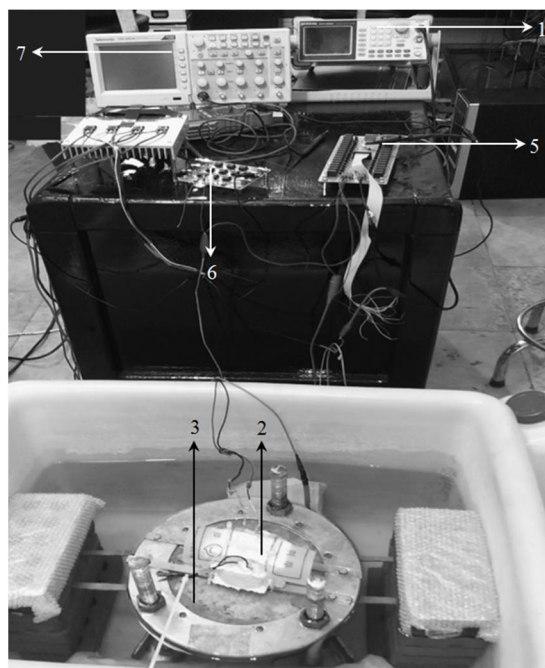


Fig. 3 Equipment used in the experimental analysis

شکل 3 تجهیزات استفاده شده در آنالیز تجربی

عملیات فیلترینگ صورت نگیرد با دامنه‌های نوسان آشفته و پراکنده در اسیلوسکوپ مواجه می‌شویم. اما در این آزمایش که ولتاژ 440 ولت است دامنه نوسانات ورق به اندازه‌ای است که نیازی به فیلترینگ نمی‌باشد. پس از این مرحله سیگنال‌ها وارد دستگاه اسیلوسکوپ می‌شود تا با توجه به دامنه نوسانات فرکانس‌های طبیعی مشخص شود.

به منظور تحلیل عددی مساله، آنالیز مودال توسط نرم‌افزار آباکوس² در عمق‌های مختلف روی ورق گالوانیزه با همان مشخصاتی که در آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است انجام می‌شود و نتایج حاصل از آن با داده‌های نتیجه گیری شده از آنالیز تجربی مقایسه خواهد شد. به منظور آنالیز عددی آب با دانسیته 1000 کیلوگرم بر متر مکعب و سرعت صوت در آب 1500 متر بر ثانیه و همچنین ورق دایروی با مشخصات موجود در جدول 1 تنظیم شده است. براساس شرایط موجود در آنالیز تجربی، سیال آب به ارتفاع 18 سانتی-متر در سطح زیرین و با عمق‌های متفاوت در سطح رویین ورق در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است که به عنوان نمونه در "شکل 4" مدل‌سازی مربوط به عمق 3 سانتی‌متر ارائه شده است. بخش‌های شبیه‌سازی شده در "شکل 4" عبارتند از: 1) سطح زیرین ورق شامل آب به طول 18 سانتی‌متر. 2) ورق گالوانیزه مقید محیطی. 3) سطح رویین ورق، شامل آب به طول 3 سانتی‌متر. 4) هوا با قید بی‌نهایت. برای المان‌بندی ورق دایروی از المان‌های S4R که مربوط به پوسته نازک است و از المان‌های آکوستیک AC3D8 برای مدل سازی سیال استفاده شده است. به منظور حل FSI یک طرفه و ایجاد شرایط کوپلینگ در سطح مشترک سیال و سازه می‌بایست از قید مناسب در فصل مشترک سطوح استفاده شود. همچنین از سطوح امپدانس برای مدل‌سازی محیط بی‌نهایت سیال و شرط انتشار و عدم بازگشت امواج می‌توان استفاده کرد چرا که قرار گرفتن هیدروفون در فاصله نسبتاً کم از ورق ایجاد فرکانس تحریک با دامنه مناسب توسط ترانس با ولتاژ 440 ولت تأثیر عوامل محیطی را ناچیز می‌کند.

همچنین ورق مذکور خاصیت جذب توسط آهنربا را دارا می‌باشد که در این آزمایش بسیار مهم است. مشخصات ورق انتخاب شده جهت آزمایش در جدول 1 عرضه شده است.

با توجه به ابعاد و جنس سازه، عمق‌های مختلف غوطه‌وری می‌تواند در نتایج آنالیز مؤثر واقع شود. به همین منظور آزمایش تعریف شده در عمق‌های مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت. دیاگرامی که براساس آن، تجهیزات آزمایش طراحی، ساخته و فراهم شد و بر این اساس آزمایش انجام شد در "شکل 2" نشان داده شده است. تجهیزات به کار رفته در "شکل 2" عبارتند از: 1- فانکشن ژنراتور. 2- لرزاننده الکترومغناطیس¹ (ترانس 8 آمپر). 3- ورق گالوانیزه دایروی مقید محیطی. 4- هیدروفون. 5- تقویت کننده. 6- فیلتر. 7- اسیلوسکوپ. شمای کلی این تجهیزات در "شکل 3" نشان داده شده و شماره های آن براساس شماره‌های بلوک دیاگرام "شکل 2" تنظیم شده است.

فانکشن ژنراتور با هدف ایجاد جریان متناوب در ترانس، به آن متصل شده است. ترانس، متناسب با فرکانس ایجاد شده در فانکشن ژنراتور، فرکانس تحریک به ورق اعمال می‌کند. پس از آن هیدروفون، ارتعاشات ایجاد شده را شناسایی می‌کند. در مرحله بعد به منظور شناسایی بهتر سیگنال‌های خروجی از هیدروفون، با اتصال هیدروفون به تقویت کننده، این سیگنال‌ها به اندازه 10000 برابر تقویت می‌شوند. از آنجایی که هدف شناسایی فرکانس‌های طبیعی اولیه است، زمانی که ولتاژ اعمال شده توسط ترانس کم باشد فرکانس‌های بالای 50 هرتز توسط فیلتر تضعیف می‌شوند زیرا در صورتی که

جدول 1 مشخصات ورق و مخزن انتخاب شده جهت آنالیز عددی و تحلیل تجربی

Table 1 Plate Specification and selected tank for numerical and experimental analysis

جنس ورق	فولاد گالوانیزه
ضخامت (متر)	0.00055
شعاع (متر)	0.1
ضریب پواسون	0.3
مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	200
چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	7850
شعاع مخزن صلب (متر)	0.45

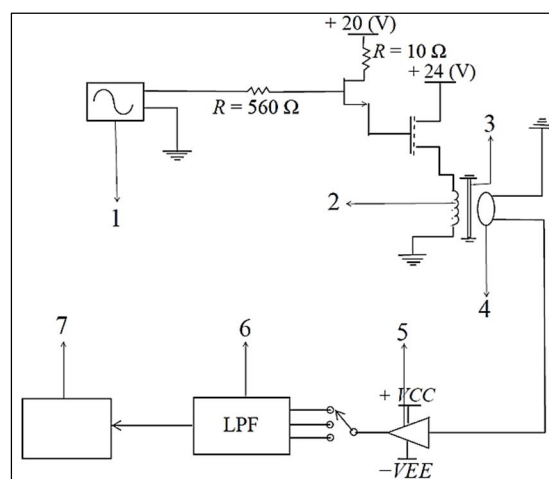


Fig. 2 Block diagram of the experimental analysis

شکل 2 بلوک دیاگرام آنالیز تجربی

² ABAQUS

¹ Electromagnetic shaker

است چرا که نسبت فرکانس تحریک به فرکانس مود دوم بسیار کم است و بر همین اساس دامنه تحریک شده (مربوط به مود دوم) به دامنه مود اول بسیار کم است. اثرات تکیه گاهی نیز در نرم‌افزار آباکوس مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد مجموعه سازه نگهدارنده ورق که شامل صفحه مقید کننده و سه پایه می‌باشد در حالت مغروق در آب فرکانس طبیعی بالای 100 هرتز را به خود اختصاص می‌دهد که از فرکانس رزونانس اول ورق دایروی بسیار فاصله دارد. البته اثر وزن لرزاننده الکترومغناطیس نیز با انجام محاسبات به صورت افزایش چگالی در سازه در نظر گرفته شد.

جدول 2 نتایج آنالیز تجربی در عمق 3 سانتی‌متر

Table 2 The results of empirical analysis in depth of 3 cm

عمق (cm)	فرکانس (Hz)	ولتاژ خروجی (mV)
3	18	392
	19	416
	20	410
	21	392
	22	440
	23	496
	24	512
	25	520
	26	376

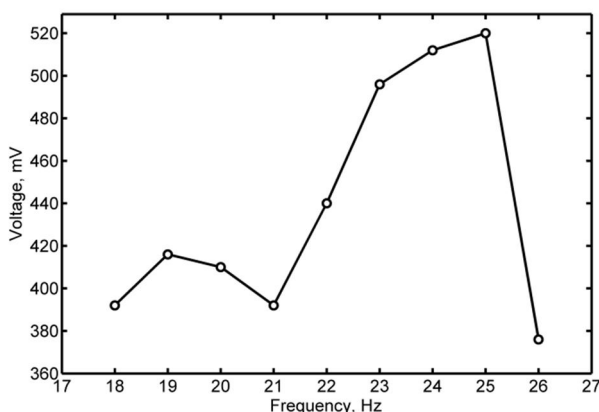


Fig. 5 The results of the empirical analysis in depth of 3 cm.

شکل 5 نتایج آنالیز تجربی در عمق 3 سانتی‌متر

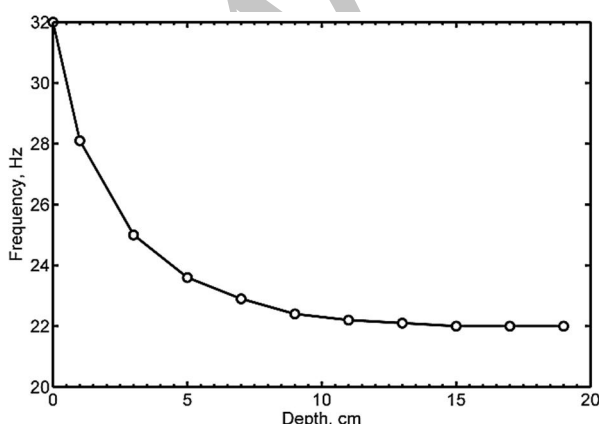


Fig. 6 The first natural frequency (0, 1) conclusions of experimental analyzes circular plate at various depths.

شکل 6 فرکانس‌های طبیعی اول (0,1) نتیجه گیری شده از آنالیز تجربی ورق دایروی در عمق‌های مختلف

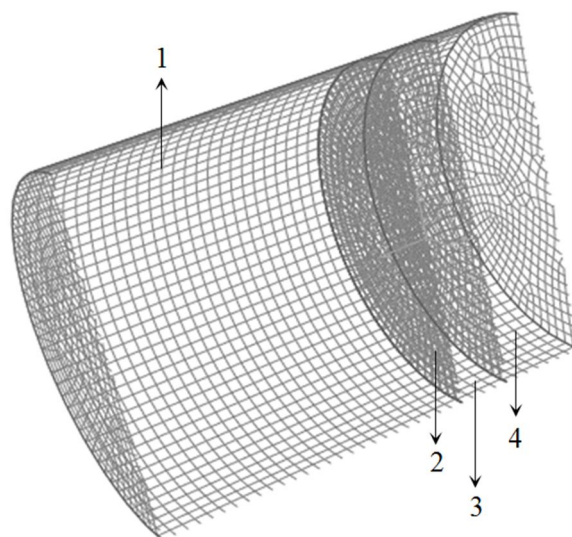


Fig. 4 Modeling at the depth of 3 cm

شکل 4 مدل سازی انجام شده در عمق 3 سانتی‌متر

3- ارائه و تحلیل نتایج تجربی

همان‌طور که در تعریف مساله اشاره شد آنالیز تجربی در عمق‌های مختلف از عمق صفر تا 20 سانتی‌متر، $H_1/a = 2.0$ انجام شده است که به‌عنوان نمونه نتایج مربوط به عمق 3 سانتی‌متر، $H_1/a = 0.3$ به ازای فرکانس‌های تحریک نزدیک به فرکانس مود اول در جدول 2 و "شکل 5" عرضه شده است. لازم به‌ذکر است که ولتاژ خروجی برابر با مقدار متوسط خروجی سنسور هیدروفونی است که در زیر صفحه با فاصله معینی نصب شده است.

تست‌های تجربی فوق برای عمق‌های مختلفی از غوطه‌وری تکرار شده است که با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از آنالیز تجربی، "شکل 6" براساس برازش منحنی¹ ترسیم شده است. در "شکل 6" دیده می‌شود که با افزایش عمق غوطه‌وری، فرکانس طبیعی مود اول ورق کاهش می‌یابد ولی تاثیر افزایش عمق غوطه‌وری تا حد معینی می‌تواند در کاهش فرکانس طبیعی ایفای نقش کند و پس از آن، افزایش عمق تاثیری در کاهش فرکانس طبیعی نخواهد داشت. در این آزمایش عمق 15 سانتی‌متر، $H_1/a = 1.5$ به‌عنوان حد عمقی شناخته شده است که پس از آن افزایش عمق تاثیری در کاهش فرکانس طبیعی ورق با مشخصات مزبور نخواهد داشت. این مطلب در نتایج "شکل 6" قابل رویت می‌باشد. بی‌بعدسازی عمق غوطه‌وری، H_1 به قطر ورق، $D=2a$ و نرمالایز کردن فرکانس طبیعی به فرکانس طبیعی ورق در محیط خلاء و یا هوا، $f_i = 137 \text{ Hz}$ ، نتایج مربوطه مجدداً در "شکل 7" ارائه شده است.

روش استخراج فرکانس رزونانس به این صورت است که در شرایط آزمایش ابتدا کلیه عوامل ایجاد اغتشاش حذف شده به‌طوری که خروجی هیدروفون دقیقاً قبل از فعال کردن لرزاننده مقادیر دامنه و فرکانس صفر را در اسیلوسکوپ نشان می‌دهد پس از آن با انجام آزمایش‌ها مشخص شد که در تمامی عمق‌های غوطه‌وری پس از رسیدن به حداکثر دامنه ارتعاشات ورق، افت شدید دامنه به‌وجود می‌آید به گونه‌ای که این افت در هیچ یک از مراحل آزمایش دیده نمی‌شود و با افزایش فرکانس تحریک دامنه ارتعاشات هیچ‌گونه افزایشی پیدا نمی‌کند. در این آزمایش مود اول (0,1) بر مود دوم (1,1) غالب

¹ curve fitting

عمق‌های غوطه‌وری با ضخامت و قطرهای مختلف مشاهده می‌شود. با تغییر قطر و ضخامت، فرکانس‌های طبیعی به‌طور مشهودی تغییر می‌کنند اما در صورتی که نتایج هر قسمت به‌صورت نرمالایز شده و بی‌بعد ارائه شوند تمامی نمودارها بر یکدیگر منطبق می‌گردند (شکل 12). در حقیقت می‌توان اذعان نمود که ورق گالوانیزه دایروی مقید محیطی در تمامی قطرهای و ضخامت‌ها با افزایش عمق غوطه‌وری رفتاری شبیه به "شکل 12" را از خود نشان می‌دهند.

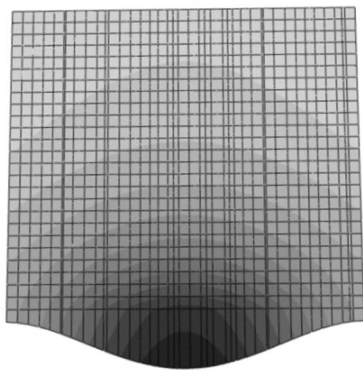


Fig. 8 The fluid pressure in the top of the circular plate

شکل 8 میدان فشار سیال در سطح رویین ورق دایروی

جدول 3 فرکانس طبیعی اول (0,1)، نتایج حاصل از آنالیزهای تجربی و عددی

Table 3 The first natural frequency (0, 1), resulting from the experimental and numerical analysis

عمق (cm)	فرکانس منتهج از آنالیز عددی (Hz)	فرکانس منتهج از آنالیز تجربی (Hz)
0 (فقط یک طرف ورق در تماس با آب است)	31.2	32
1	29.5	28.1
3	27.3	25
5	25.9	23.6
7	25	22.9
9	24.3	22.4
11	23.8	22.2
13	23.5	22.1
15	23.2	22
17	23.1	22
19	23	22

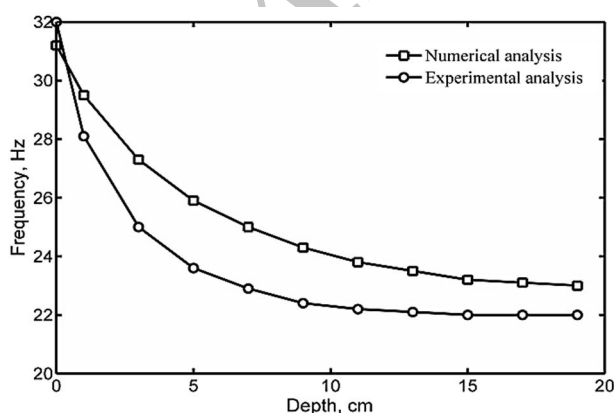


Fig. 9 The first natural frequency (0,1) resulting from the experimental and numerical analysis at various depths

شکل 9 فرکانس‌های طبیعی اول (1,0) نتیجه‌گیری شده از آنالیز تجربی و آنالیز

عددی در عمق‌های مختلف

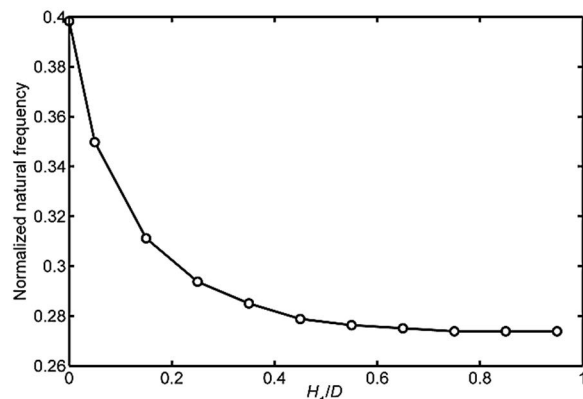


Fig. 7 The first natural frequency (0, 1) normalized resulting from experimental analysis non-dimensional circular plate at a depth of immersion

شکل 7 فرکانس‌های طبیعی اول (0,1) نرمالایز شده منتهج از آنالیز تجربی ورق دایروی در عمق‌های غوطه‌وری بی‌بعد شده

4- تحلیل نتایج عددی

به‌منظور مقایسه نتایج تحلیل تجربی و عددی، آنالیز مودال در عمق‌های مختلف در بازه صفر تا 20 سانتی‌متر، $H_1/a = 2.0$ انجام شد. داده‌های نتیجه‌گیری شده از آنالیز تجربی و نتایج مستخرج از آنالیز عددی در عمق‌های یکسان نسبت به یکدیگر در جدول 3 و "شکل 9" نشان داده شده است. در "شکل 9" مشاهده می‌شود که پس از عمق 15 سانتی‌متر، $H_1/a = 1.5$ در هر دو روش آنالیز تجربی و عددی، افزایش عمق تأثیری بر کاهش فرکانس‌های طبیعی ورق دایروی مقید محیطی با مشخصات مزبور نخواهد داشت.

در صورتی که ورق در عمق مشخصی از سیال قرار بگیرد، زمانی که ورق در اثر تحریک دچار ارتعاش آزاد می‌شود به دلیل کوپل سازه و سیال، به ذراتی از سیال که در مجاورت سازه هستند نیروی شتاب‌دهنده‌ای وارد می‌شود و این ذرات سیال به‌عنوان جرم افزوده در ارتعاشات ورق ایفای نقش می‌کنند و فرکانس طبیعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. هرچه عمق ورق بیش‌تر باشد ذراتی از سیال که در محدوده میدان فشار سیال قرار می‌گیرند بیش‌تر خواهد شد و در نتیجه جرم افزوده هم افزایش خواهد یافت و فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد. اما با افزایش عمق از محدوده مشخصی به بعد، دیگر محدوده میدان فشار سیال ثابت می‌ماند و در نتیجه جرم افزوده در معادله فرکانسی ورق نیز ثابت باقی خواهد ماند. در "شکل 8" محدوده میدان فشار سیال در سطح رویین ورق نشان داده شده است.

میانگین درصد اختلاف نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی و آنالیز عددی (DP) طبق معادله (1)، حدود 5 درصد است که این مقدار بیان‌کننده این موضوع است که تطابق خوبی بین نتایج تحلیل تجربی و عددی وجود دارد. البته توجه شود که همواره درصد خطای داده‌های تجربی کمتر از نتایج حل عددی بوده است. در معادله (1)، f_E و f_N به ترتیب نشان‌دهنده فرکانس طبیعی حاصل از تحلیل تجربی و فرکانس طبیعی حاصل از تحلیل عددی می‌باشند.

$$DP = \frac{|f_E - f_N| \times 100}{f_E} \quad (1)$$

مشابه "شکل 7"، بی‌بعدسازی عمق غوطه‌وری و نرمالایز کردن فرکانس طبیعی انجام گردیده و نتایج مربوط به آنالیز تجربی و عددی در "شکل 10" ارائه شده است. در "شکل 11" فرکانس‌های طبیعی اول ورق دایروی در

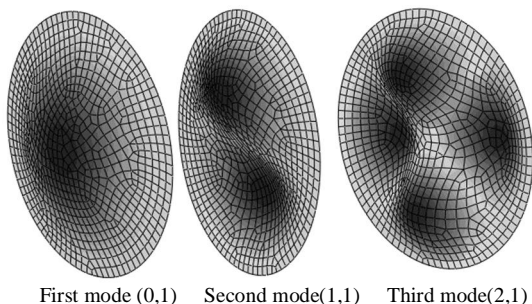


Fig. 13 Mode shapes circular plate

شکل 13 شکل مودهای ورق دایروی

فرکانس طبیعی اول ورق در خلا نیز به روش عددی محاسبه گردید و مقدار 137 هرتز را به خود اختصاص داد. اما زمانی که ورق تنها از یک طرف در تماس با سیال قرار می‌گیرد فرکانس طبیعی به میزان 106 هرتز کاهش می‌یابد و به 31 هرتز می‌رسد و در شرایطی که ورق کاملاً در آب غوطه‌ور باشد فرکانس طبیعی فقط 8 هرتز کاهش می‌یابد و به 23 هرتز می‌رسد. این موضوع نشان‌دهنده آن است که میزان کاهش فرکانس نسبت به خلا با تماس یک طرفه سیال و ورق 70.7 درصد و با تماس دو طرفه سیال و ورق 25.8 درصد است.

در این مساله ورق در محل ثابتی مستقر شده است و تغییرات عمق غوطه‌وری با تغییر ارتفاع سیال روی ورق مورد بررسی قرار گرفته است. سیال آب در سطح زیرین ورق با ارتفاع ثابت 18 سانتی‌متر قرار گرفته است. براساس محاسبات صورت گرفته عمق 18 سانتی‌متر بیشتر از حد عمقی است که با تغییر آن فرکانس طبیعی دچار تغییرات شود. اما یکی از اشکالات اساسی در کار صورت گرفته توسط عسگری و همکاران [23] این است که با تغییر ارتفاع ورق به محاسبه فرکانس‌های طبیعی پرداخته‌اند و تاثیر متغیر H_1 که بیان‌کننده ارتفاع سیال روی ورق است را در تغییرات فرکانس طبیعی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. با تغییر H_1 الزاماً H_2 نیز که نشان‌دهنده عمق آب زیر ورق است تغییر می‌کند و از آن جایی که تغییرات H_2 نیز به تنهایی می‌تواند در فرکانس‌های طبیعی ورق تاثیرگذار باشد در نتیجه تغییر مکان ورق برای بررسی تاثیر H_1 روی فرکانس‌های طبیعی کار غیرمعقولی خواهد بود که در این آزمایش همان‌طور که اشاره شد با ثابت نگه‌داشتن H_2 در عمق مناسب این مشکل مرتفع شده است.

5- نتیجه گیری

تحلیل‌های عددی و تجربی انجام شده برای استخراج فرکانس‌های طبیعی یک ورق دایروی مقید محیطی و مغروق در نزدیک سطح آب در این تحقیق انجام شده است. اثرات دانسیته محیطی به شدت بر فرکانس طبیعی ورق مذکور تاثیر داشته به‌گونه‌ای که به‌علت اثرات جرم افزوده و دمپینگ محیطی، فرکانس طبیعی در آب کاهش یافته است. علاوه بر آن ارتفاع مغروق شدگی نیز تا عمق معینی، بر فرکانس‌های طبیعی ورق تاثیر داشته و با ازدیاد عمق، اثرات ناهمگنی محیطی حذف شده و بعد از آن، فرکانس‌های طبیعی ورق دیگر ثابت می‌ماند. تاکنون از این روش برای تحلیل ارتعاشاتی ورق‌های غوطه‌ور در آب استفاده نشده است که از مزایای این روش مشاهده رفتار ورق از ما قبل رزونانس تا بعد از آن است. نتایج نشان می‌دهند که دامنه ارتعاشات سازه با شیب ملایم تا فرکانس رزونانس افزایش می‌یابد و پس از آن به یک افت شدید در دامنه مواجه می‌شود. عدم تماس لرزاننده (در این‌جا ترانس) با

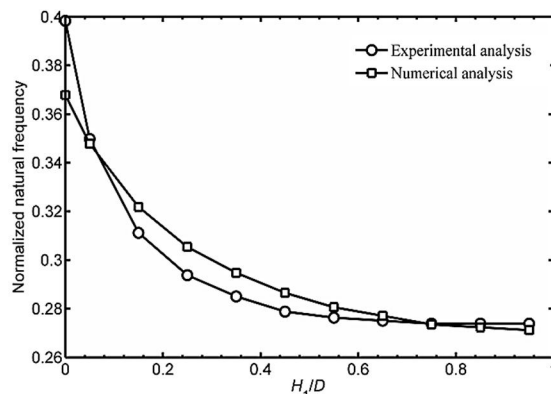


Fig. 10 The first natural frequency (0, 1) normalized resulting from experimental and numerical analysis circular plate at non-dimensional depth of immersion.

شکل 10 فرکانس‌های طبیعی اول (1,0) نرمالایز شده منتج از آنالیز تجربی و آنالیز عددی ورق دایروی در عمق‌های غوطه‌وری بی بعد شده

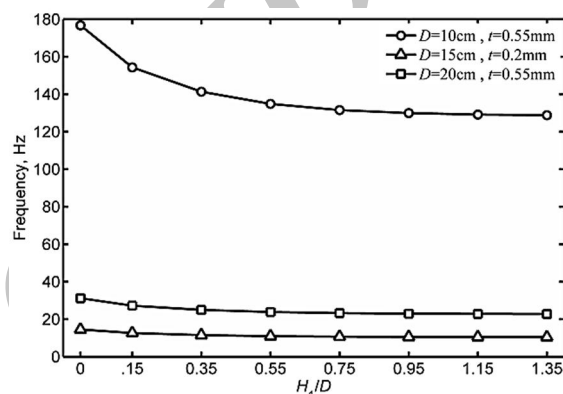


Fig. 11 The first natural frequency (0,1) numerical analysis circular plate at non-dimensional immersion depth with thickness and different diameters

شکل 11 فرکانس‌های طبیعی اول ورق دایروی در عمق‌های غوطه‌وری با ضخامت و قطرهای مختلف

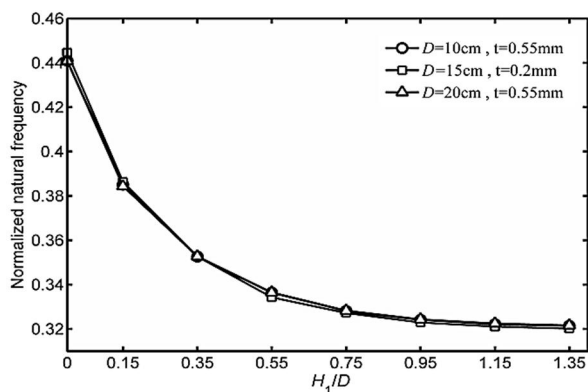


Fig. 12 The first natural frequency (0,1) normalized by numerical analysis circular plate at non-dimensional immersion depth with thickness and different diameters

شکل 12 فرکانس‌های طبیعی اول (1,0) نرمالایز شده آنالیز عددی ورق دایروی در عمق‌های غوطه‌وری بی بعد شده با ضخامت و قطرهای مختلف

در "شکل 13" مود اول، دوم و سوم ورق دایروی نشان داده شده است. شکل مودهای ورق دایروی به‌صورت (a, b) نشان داده می‌شوند که a بیان‌کننده گره قطری و b بیان‌کننده گره دایروی است. به‌عبارت دیگر a و b بیانگر قطرهای دایره‌های ثابت و بی‌حرکت در ورق دایروی هستند.

- partially submerged in fluid, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 17, No. 7, pp. 927–939, 2003.
- [13] K. H. Jeong, K. J. Kim, Hydroelastic vibration of a circular plate submerged in a bounded compressible fluid, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 283, pp. 153–172, 2005.
- [14] D. Zhou, W. Liu, Hydroelastic vibrations of flexible rectangular tanks partially filled with liquid, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 71, No. 2, pp. 149–174, 2007.
- [15] M. Esmailzadeh, A. A. Lakis, M. Thomas, L. Marcouiller, Three-dimensional modeling of curved structures containing and/or submerged in fluid, *Finite Element in Analysis and Design*, Vol. 44, No. 6, pp. 334–345, 2008.
- [16] K. H. Jeong, G. M. Lee, T. W. Kim, Free vibration analysis of a circular plate partially in contact with a liquid, *Journal of sound and vibration*, Vol. 324, No. 1, pp. 194–208, 2009.
- [17] E. Askari, F. Daneshmand, Coupled vibration of a partially fluid-filled cylindrical container with a cylindrical internal body, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 25, No. 2, pp. 389–405, 2009.
- [18] E. Askari, K. H. Jeong, Hydroelastic vibration of a cantilever cylindrical shell partially submerged in a liquid, *Ocean Engineering*, Vol. 37, No. 11, pp. 1027–1035, 2010.
- [19] S. Hosseini-Hashemi, M. Karimi, H. Rokni, T. Damavandi, Vibration analysis of rectangular Mindlin plates on elastic foundations and vertically in contact with stationary fluid by the Ritz method, *Ocean Engineering*, Vol. 37, No. 2, pp. 174–185, 2010.
- [20] S. Hosseini-Hashemi, M. Karimi, H. Rokni, Natural frequencies of rectangular Mindlin plates coupled with stationary fluid, *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 36, No. 2, pp. 764–778, 2012.
- [21] M. A. Goodarzi, S. R. Sabbagh-Yazdi, Analytical and experimental evaluation on the effectiveness of upper mounted baffles with respect to commonly used baffles, *Ocean Engineering*, Vol. 42, No. 1, pp. 205–217, 2012.
- [22] S. Tariverdilo, M. Shahmardani, J. Mirzapour, R. Shabani, Asymmetric free vibration of circular plate in contact with incompressible fluid, *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 37, No. 1, pp. 228–239, 2013.
- [23] E. Askari, K. H. Jeong, M. Amabili, Hydroelastic vibration of circular plates immersed in a liquid-filled container with free surface, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 332, No. 12, pp. 3064–3085, 2013.

ورق باعث افزایش دقت این روش نسبت به تحریک سازه توسط لرزاننده الکتروپنوماتیکی است. همچنین می‌توان اذعان نمود روش موجود قادر است تحریک مناسب برای ارتعاشات سازه در عمق زیاد آب را فراهم کند. این روش می‌تواند برای انجام آزمایش مودال در سازه‌های دریایی استفاده شود.

6- مراجع

- [1] F. M. Espinosa, A. G. Gallego-Juarez, On the resonance frequencies of water-loaded circular plate, *Journal of sound and vibration*, Vol. 94, No. 2, pp. 217–222, 1984.
- [2] N. J. Robinson, S. C. Palmer, A modal analysis of a rectangular plate floating on an incompressible liquid, *Journal of sound and vibration*, Vol. 142, No. 3, pp. 453–460, 1990.
- [3] J. H. Ginsberg, P. Chu, Asymmetric vibration of heavily fluid-loaded circular plate using variational principles, *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 91, No. 2, pp. 894–906, 1992.
- [4] M. Amabili, G. Frosali, M. K. Kwak, Free vibrations of annular plates coupled with fluids, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 191, No. 5, pp. 825–846, 1996.
- [5] M. Amabili, G. Dalpiaz, Vibrations of base plates in annular cylindrical tanks: theory and experiments, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 210, No. 3, pp. 329–350, 1998.
- [6] M. K. Kwak, M. Amabili, Hydroelastic vibration of free-edge annular plates, *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 121, No. 1, pp. 26–32, 1999.
- [7] M. K. Kwak, S. B. Han, Effect of fluid depth on the hydroelastic vibration of free-edge circular plate, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 230, No. 1, pp. 171–185, 2000.
- [8] D. Zhou, Y. K. Cheung, Vibration of vertical rectangular plate in contact with water on one side, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 29, No. 5, pp. 693–710, 2000.
- [9] M. Amabili, Vibrations of circular plates resting on a sloshing liquid: solution of the fully coupled problem, *Journal of sound and vibration*, Vol. 245, No. 2, pp. 261–283, 2001.
- [10] K. H. Jeong, G. H. Yoo, S. C. Lee, Hydroelastic vibration of two identical rectangular plates, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 272, pp. 539–555, 2003.
- [11] K. H. Jeong, Free vibration of two identical circular plates coupled with bounded fluid, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 260, No. 4, pp. 653–670, 2003.
- [12] A. Ergin, B. Ugurlu, Linear vibration analysis of cantilever plates