



## آنالیز مودال صفحه مستطیلی قائم نیمه‌مغروق در آب با شرایط تکیه‌گاهی مختلف

امیر ناصرالاسلامی<sup>۱</sup> و محمود سالاری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۸/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۰۷

### چکیده

بدنه بسیاری از شناورهای دریایی در معرض بارگذاری دینامیکی امواج سطح آزاد دریا می‌باشند، لذا شناسایی رفتار دینامیکی و ارتعاشی سازه‌های دریایی که تحت تاثیر اثرات نامتقارن و ناهمگن محیطی قرار دارند، یکی از موضوعات مهم در بحث طراحی این نوع از سازه‌ها است. در این مقاله، به آنالیز ارتعاشی صفحه مستطیلی به عنوان مدلی از پوسته فلزی بدنه شناورهای دریایی، در شرایط مغروق در مجاورت سطح آزاد توسط نرم افزار آباکوس پرداخته شده است. جهت اعتبارسنجی روش عددی، اثرات عمق غوطه‌وری بر فرکانس طبیعی مود اول ورق دایروی مقید محیطی که موازی با سطح آزاد آب قرار گرفته است، به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. با ارزیابی ۸۱ مود ارتعاشی استخراج شده، مشخص شد که افت شدید فرکانس طبیعی با افزایش ارتفاع سیال، از یک موقعیت خاص آغاز می‌شود که موقعیت آن ارتباط مستقیم با نوع شرایط مرزی دارد. در آنالیز مودال سازه‌ها می‌توان اذعان کرد که عمده فرکانس کاهش یافته بر اثر جرم افزوده، با تماس یک طرفه سیال و سازه ایجاد می‌شود و پس از آن در صورتی که طرف دیگر سازه در تماس با سیال قرار بگیرد، تاثیر بسیار کمی در کاهش فرکانس طبیعی خواهد داشت که در این تحقیق به وضوح نمایان است.

**کلمات کلیدی:** آنالیز مودال؛ آنالیز تجربی؛ صفحه مستطیلی؛ عمق غوطه‌وری؛ سطح آزاد آب.

## Modal Analysis of a Vertical Rectangular Plate Semi-Submerged in Water with Different Boundary Conditions

A. Nasseroleslami<sup>1</sup>, M. Salari<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> MSc. Student, Mech. Eng., Imam Hussein Univ., Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Imam Hussein Univ., Tehran, Iran.

### Abstract

The structure of marine vessels is usually being subjected to the dynamic loading conditions of sea-surface waves. The dynamics and vibrational characteristics of such structures is expected to be affected by sea environmental loadings. In this paper, a rectangular plate, that was immersed with water at different immersion depths and different boundary conditions was numerically analyzed by the Abaqus software, and the results have been presented and discussed in details. For validation the numerical method, the effects of immersion depth on the natural frequency of circular plate, which is parallel to the free surface of water, have been investigated experimentally and numerically. By evaluating 81 extracted vibrational modes, it became clear that a natural drop in natural frequencies begins with a rise in the fluid's height from a specific position, which is directly related to the type of boundary conditions. In the modal analysis of structures, it can be admitted that the major decreasing frequency due to increased mass is caused by one-way contact of the fluid and the structure and then, if the other side of the structure is in contact with the fluid, it will have a very small effect on the natural frequency reduction, which is clearly apparent in this study.

**Keywords:** Modal Analysis; Experimental Analysis; Rectangular Plate; Immersion Depth; Water Free Surface.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۲۱-۷۴۱۸۹۴۰۷؛ فکس: ۱۶۵۸۵۳۵۴۸

آدرس پست الکترونیک: [msalri@ihu.ac.ir](mailto:msalri@ihu.ac.ir)

## ۱- مقدمه

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 اجتناب ناپذیر است؛ اما موضوعی که باعث پیچیده تر شدن آنالیز مودال پوسته‌ها می‌شود، تماس آن‌ها با سیال است. آنالیز مودال فرایندی 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. تاکنون تلاش‌های بسیاری توسط محققان برای پیش بینی فرکانس‌های طبیعی یک سازه در تماس با سیال انجام شده است. کربوا و همکاران [۱]، به آنالیز ارتعاشی صفحات مستطیلی کاملاً مغروق و شناور در آب پرداختند، مدل ریاضی سازه در این مطالعه با ترکیب روش المان محدود و تئوری Sanders shell استخراج شده است. آن‌ها همچنین فرکانس‌های طبیعی یک صفحه عمودی یک سرگردار در عمق‌های غوطه‌وری مختلف را به دست آوردند. رابینسون و پالمرا [۲] مطالعه‌ای را انجام دادند، در مورد آنالیز مودال یک صفحه مستطیل شکل در شرایطی که روی سیال غیر قابل تراکم در فرکانس پایین و امواج سطحی با دامنه کوچک شناور است و معادلات ارتعاشی حاکم بر سیستم ورق-سیال را به دست آوردند. گینسبرگ و چو [۳]، شکل مودهای یک صفحه در تماس با سیال با چگالی زیاد را استخراج کردند. آمابیلی و همکاران [۴]، 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 [۵]، آنالیز ارتعاشات آزاد صفحه پایینی یک کانتینر دایروی را به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی انجام دادند. کواک و آمابیلی [۶]، مطالعات تئوری و آزمایشگاهی خود را روی فرکانس‌های طبیعی یک صفحه دایره‌ای با لبه‌های آزاد به صورت شناور و یا کاملاً غوطه‌ور در سیال را انجام دادند. کواک و هان [۷]، تاثیر 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 [۸]، آنالیز ارتعاشات یک صفحه مستطیلی عمودی را انجام دادند که از یک طرف با آب در تماس است. آمابیلی [۹] ارتعاشات آزاد ورق‌های دایره‌ای که در تماس با سطح آزاد سیال می‌باشند را تحلیل و بررسی نمود. او در این تحقیق، تاثیر تلاطم و عمق سیال را بر فرکانس‌های طبیعی ورق دایره‌ای به دست آورد. جیانگ و همکاران [۱۰]، یک ورق مستطیلی غوطه‌ور در سیال که تنها یک لبه آن گیردار است را با نسبت اضلاع مختلف مورد بررسی قرار دادند. جیانگ [۱۱] جرم افزوده و فرکانس‌های ارتعاشات آزاد دو ورق مشخص کوپله با سیال محدود را بررسی کرد. انصاریان و همکاران [۱۲]، با روش تحلیلی و عددی به بررسی ارتعاشات پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی محتوی سیال پرداخت. جیانگ و کیم [۱۳]، به بررسی ارتعاشات صفحه دایروی مغروق در سیال تراکم پذیر کران دار پرداختند. آن‌ها از سری بسط فوریه برای حل معادله تعادل دینامیکی استفاده کردند. ژاو و لیو [۱۴] تاثیر نسبت طول به عرض در ورق‌های مستطیلی غوطه‌ور در سیال را که از یک سمت گیردار هستند، روی فرکانس‌های طبیعی مورد ارزیابی قرار دادند. اسماعیل‌زاده و همکاران [۱۵]، فرکانس ارتعاشات آزاد سازه‌هایی را به دست آوردند که شامل سیال یا غوطه‌ور در آن هستند. آنها از تابع پتانسیل برای محاسبه فشار هیدرو دینامیکی روی سازه‌ها استفاده کردند. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که عمق سیال تاثیر مهمی روی برهم کنش سازه و سیال دارد. حسینی هاشمی و همکاران [۱۶]، به مطالعه ارتعاشات آزاد صفحه مستطیلی عمودی پرداختند که روی یک فونداسیون الاستیک سوار شده است و تنها از یک طرف با سیال در تماس است. آنالیز ارتعاشات آزاد صفحه مستطیلی مغروق در سیال یا شناور روی سطح آزاد مایع توسط حسینی هاشمی و همکاران [۱۷] انجام شد. گودرزی و صباغ یزدی [۱۸]، میرایی هیدرو دینامیکی صفحات افقی و عمودی در مخزن مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند که به صورت جزئی پر از سیال شده است. عسگری و همکاران [۱۹] ارتعاشات آزاد صفحه دایروی مغروق در سیال را به روش تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها فرکانس‌های

است. این آنالیز در شرایط مرزی و حالت‌های غوطه‌وری مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفته است. شرایط مرزی اعمال شده شامل، شرط‌های مرزی B1, B2, B3 و حالت‌های مختلف تماس سیال و ورق شامل، H00, H10, H20, H30, H40, H41, H42, H43, H44 می‌شود. مشخصات حالت‌های غوطه‌وری و شرایط مرزی در جدول ۱ و شکل ۱ نمایان است. نام‌گذاری‌های مربوط به ارتفاع آب و شرایط مرزی در جدول ۱ براساس شکل ۱ صورت گرفته است. بدیهی است که U1، U2 و U3 به ترتیب نشان‌دهنده جابه‌جایی در راستای x، y و z است و UR1، UR2 و UR3 به ترتیب نشان‌دهنده دوران در راستای x، y و z است.

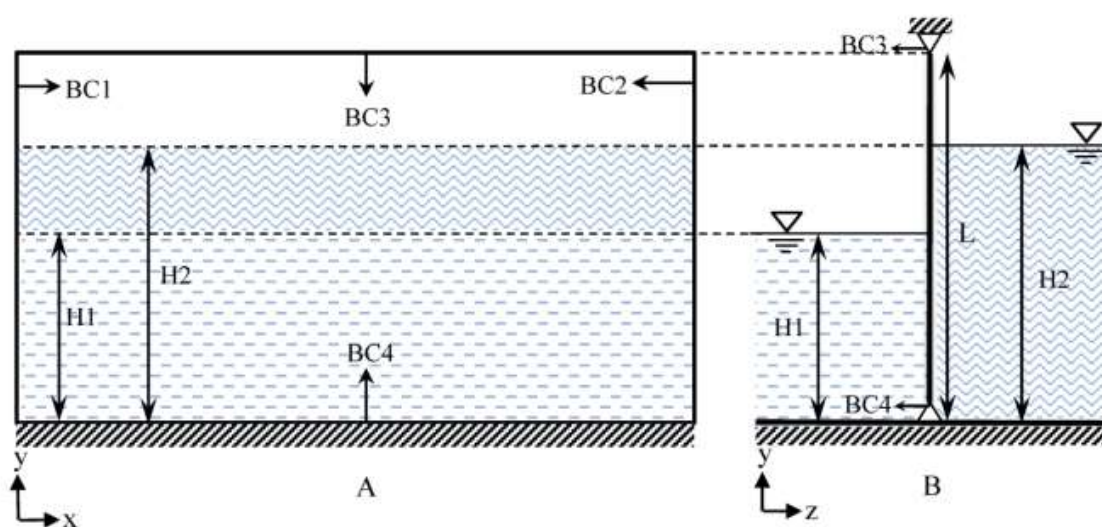
برای مدل سازی سیال با شرط مرزی بی نهایت از دو نیم استوانه استفاده شده است. در قسمتی که تماس بین سازه و سیال اتفاق می‌افتد، با استفاده از قید مناسب، حل FSI یک طرفه و مدل سازی شرایط کوپلینگ در سطح مشترک سیال و سازه رخ می‌دهد. در سطح جانبی نیم استوانه‌ها از سطوح امپدانس برای مدل‌سازی محیط بی نهایت سیال و شرط انتشار و عدم بازگشت امواج استفاده شده است و در سطح بالایی نیم استوانه‌ها قید مناسب برای در نظر گرفتن محیط هوا اعمال شده است. در شکل ۲ نمای مش خورده از سازه و سیال در حالتی نشان داده شده است که نصف صفحه در آب مغروق است.

طبیعی و شکل مودها را با استفاده از روش رایلی ریتز به دست آوردند.

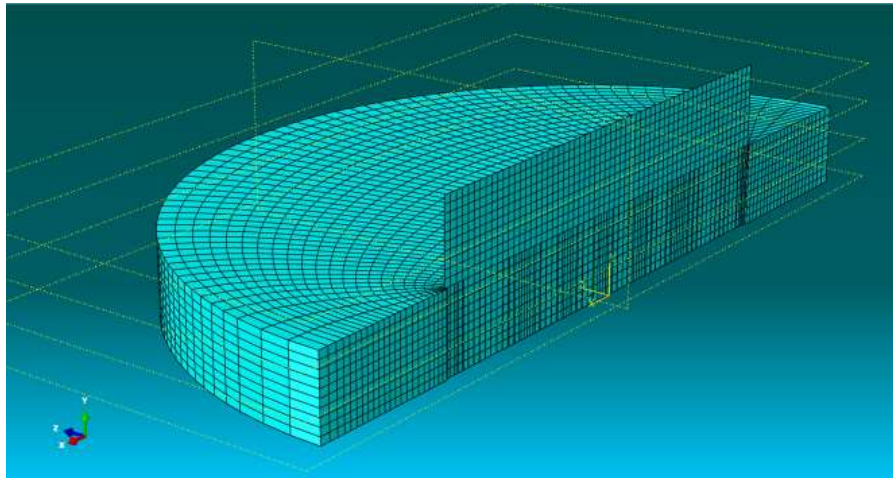
تمامی مطالعات فوق‌الذکر برای شرایط جسم کاملاً مغروق در سیال بوده است. در این تحقیق تمرکز بر رفتار ارتعاشی سازه‌هایی است که با سطح آزاد آب فاصله زیادی ندارند و این تمایز اصلی این تحقیق، با سایر کارهای انجام شده است. در بخش اول این تحقیق، به منظور اعتبارسنجی روش‌های عددی، فرکانس‌های طبیعی یک ورق مقید دایروی مغروق که به صورت موازی در مجاورت سطح آزاد آب قرار دارد، به صورت 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. تکنیک و روش به کار رفته در این تحقیق برای اندازه‌گیری تجربی فرکانس‌های طبیعی نیز، یکی دیگر از نوآوری‌های این تحقیق است. پس از اعتبارسنجی انجام شده در بخش اول، در بخش دوم تحقیق به آنالیز مودال ورق مستطیلی در شرایط مرزی و حالت‌های غوطه‌وری مختلف پرداخته می‌شود. در تمامی تحلیل‌های عددی از نرم افزار آباکوس استفاده شده است.

## ۲- تعریف مساله و شرایط حل عددی

در این تحقیق به آنالیز مودال یک ورق آلومینیوم با ضخامت  $0.005$  (m)، طول  $1/2$  (m) و عرض  $0/4$  (m) پرداخته شده



شکل ۱- (A) شرایط مرزی اعمال شده به ورق از نمای روبه‌رو (B) تماس سیال با دو طرف سازه از نمای جانبی



شکل ۲- نمای برش خورده از سازه و سیال در حالتی که نصف صفحه در آب مغروق است با شرط مرزی B1 (وجه پایین یک سر گیردار، وجوه کناری مقید در راستای حرکت افقی (x) و وجه بالا آزاد)

جدول ۱- نام‌گذاری شرایط مرزی و حالت‌های غوطه‌وری مختلف

نام شرط مرزی	شرایط مرزی				ارتفاع آب		نام حالت
	BC1	BC2	BC3	BC4	H1	H2	
B1	U1=0	U1=0	Free	U1=U2=U3=UR1 =UR2=UR3=0		0	B1H40
						L/4	B1H41
					L	L/2	B1H42
						3L/4	B1H43
						L	B1H44
						0	B1H00
						L/4	B1H10
						L/2	B1H20
						3L/4	B1H30
					B2	Free	Free
	L/4	B2H41					
L	L/2	B2H42					
	3L/4	B2H43					
	L	B2H44					
	0	B2H00					
	L/4	B2H10					
	L/2	B2H20					
	3L/4	B2H30					
B3	Free	Free	U1=U2=U3=0	U1=U2=U3=UR1 =UR2=UR3=0			
						L/4	B3H41
					L	L/2	B3H42
						3L/4	B3H43
						L	B3H44
						0	B3H00
						L/4	B3H10
						L/2	B3H20
						3L/4	B3H30

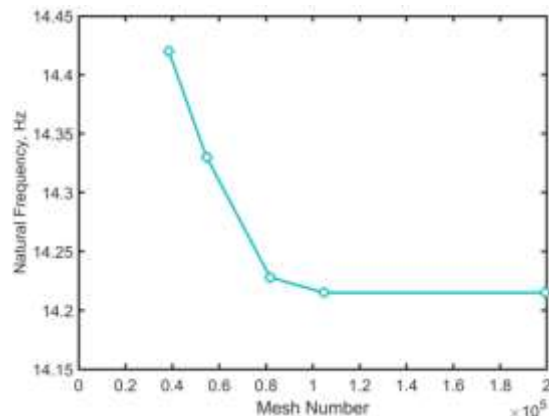
ضخامت ورق،  $h$  به شعاع ورق،  $a$  بسیار کوچک است؛ به گونه ای که فرض پوسته‌ای بودن برقرار گردد.

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 ۸ 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 ژنراتور به لرزاننده الکترومغناطیس، ورق مرتعش می‌شود که در فاصله مناسبی از آن قرار گرفته است. ورق گالوانیزه صنعتی با ضخامت  $0.5$  میلی‌متر و قطر  $20$  سانتی‌متر، با چگالی  $7850$  کیلوگرم بر متر مکعب و مدول  $200$  گیگاپاسکال به عنوان ورق مطلوب آزمایش انتخاب شده است؛ چراکه سختی، قطر و ضخامت ورق انتخاب شده به گونه ای است که به وسیله ترانس ۸ آمپر می‌توان فرکانس طبیعی اولیه را در ورق ایجاد کرد. همچنین ورق مذکور خاصیت جذب توسط آهنربا را دارا است که در این آزمایش بسیار مهم است. با توجه به ابعاد و جنس سازه، عمق‌های مختلف غوطه‌وری می‌تواند در نتایج آنالیز موثر واقع شود. به همین منظور آزمایش تعریف شده در عمق‌های مختلف انجام شده است. نمایی از تجهیزات آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. تجهیزات به کار رفته در شکل ۴ عبارتند از:

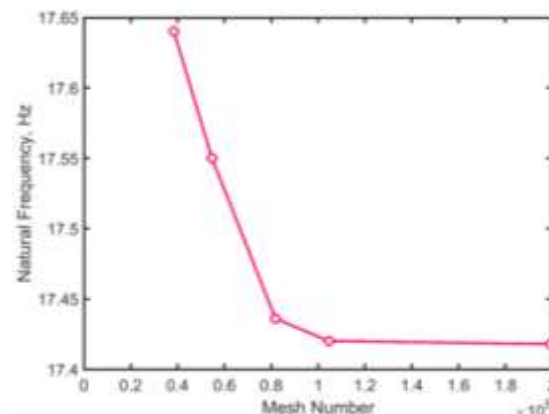
- ۱- فانکشن ژنراتور AFG-2125 از شرکت Goodwill
- ۲- لرزاننده الکترومغناطیس (ترانس ۸ آمپر).
- ۳- ورق گالوانیزه دایروی مقید محیطی
- ۴- هیدروفون
- ۵- تقویت کننده TA8210AHQ
- ۶- فیلتر میان گذر MFB
- ۷- اسیلوسکوپ TDS2024C Digital Storage از شرکت Tektronix.

ساز و کار استفاده شده در آزمایش به این صورت است که 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

در شکل‌های ۳ و ۴ نمودار همگرایی شبکه‌بندی مربوط به فرکانس‌های طبیعی اول و دوم سازه مورد نظر نمایش داده شده است.



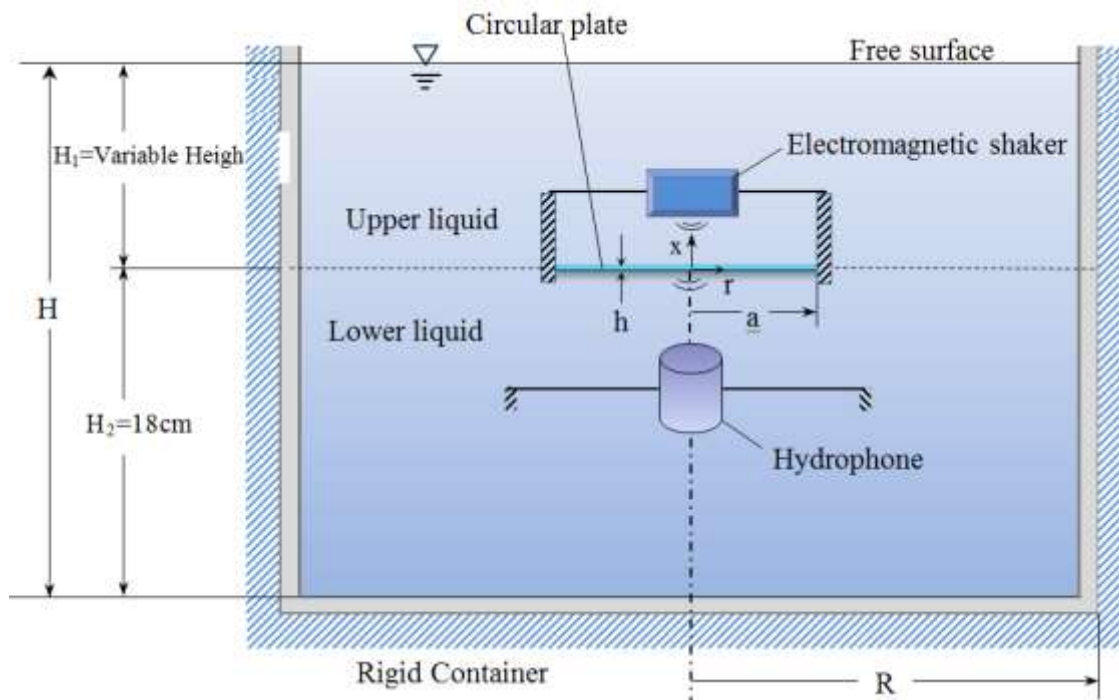
شکل ۳- همگرایی شبکه‌بندی فرکانس طبیعی اول در حالت B2H44 (وجه پایین و بالا یک سر گیردار و وجوه کناری آزاد)



شکل ۴- همگرایی شبکه‌بندی فرکانس طبیعی دوم در حالت B2H44 (وجه پایین و بالا یک سر گیردار و وجوه کناری آزاد)

### ۳- اعتبارسنجی روش عددی

در بخش اعتبارسنجی تحقیق، آنالیز غشای دایروی مقید محیطی در سیال تراکم‌ناپذیر در دو مرحله تحلیل عددی و آزمایشگاهی انجام می‌شود. شکل ۳ نحوه قرار گرفتن ورق دایروی مقید محیطی در مخزن آب را نشان می‌دهد. نسبت



شکل ۳- ورق دایروی مقید محیطی به همراه دستگاه لرزاننده الکترومغناطیس و هیدروفون مغروق در مخزن صلب [۲۰]

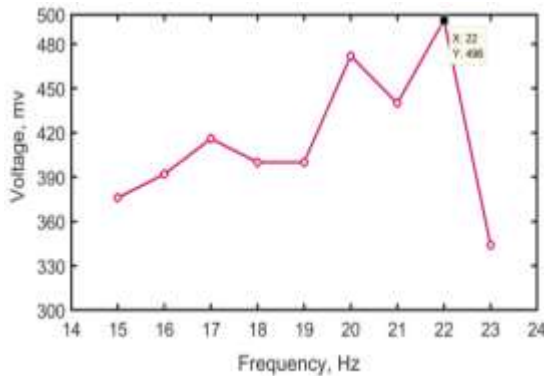
در آنالیز تجربی، سیال آب به ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر در سطح زیرین و با عمق‌های متفاوت در سطح رویین ورق در نرم افزار شبیه سازی شده است که به عنوان نمونه در شکل ۵ مدل سازی مربوط به عمق ۳ سانتی‌متر ارائه شده است. بخش‌های شبیه سازی شده در شکل ۵ عبارتند از: (۱) سطح زیرین ورق شامل آب به طول ۱۸ سانتی‌متر (۲) ورق گالوانیزه مقید محیطی (۳) سطح رویین ورق، شامل آب به طول ۳ سانتی‌متر (۴) هوا با قید بی نهایت. برای المان بندی 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 تداخل سازه و سیال 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 مدل سازی محیط بی نهایت سیال و شرط انتشار و عدم بازگشت امواج می‌توان استفاده کرد؛ چراکه قرار گرفتن هیدروفون در فاصله نسبتاً کم از ورق ایجاد فرکانس تحریک با دامنه مناسب توسط ترانس با ولتاژ ۴۴۰ ولت تاثیر عوامل محیطی را ناچیز می‌کند.

هیدروفون، با اتصال هیدروفون به تقویت کننده، این سیگنال‌ها به اندازه ۱۰۰۰۰ برابر تقویت می‌شوند. از آن جایی که هدف شناسایی فرکانس‌های طبیعی اولیه است، زمانی که ولتاژ اعمال شده توسط ترانس کم باشد، فرکانس‌های بالای ۵۰ هرتز توسط فیلتر تضعیف می‌شوند؛ زیرا در صورتی که عملیات فیلترینگ صورت نگیرد با دامنه‌های نوسان آشفته و پراکنده در اسیلوسکوپ مواجه می‌شویم؛ اما در این آزمایش که ولتاژ ۴۴۰ 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. جزئیات کامل مرتبط با تست تجربی در مرجع [۲۰] ارائه شده است.

همچنین برای همین مساله و شرایط، آنالیز مودال توسط نرم افزار آباکوس در عمق‌های مختلف روی ورق گالوانیزه با همان مشخصاتی انجام شده که در آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج حاصل از آن با داده‌های نتیجه‌گیری شده از آنالیز تجربی مقایسه شده‌اند. در آنالیز عددی آب با دانسیته ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و سرعت صوت در آب ۱۵۰۰ متر بر ثانیه تنظیم شده است. براساس شرایط موجود



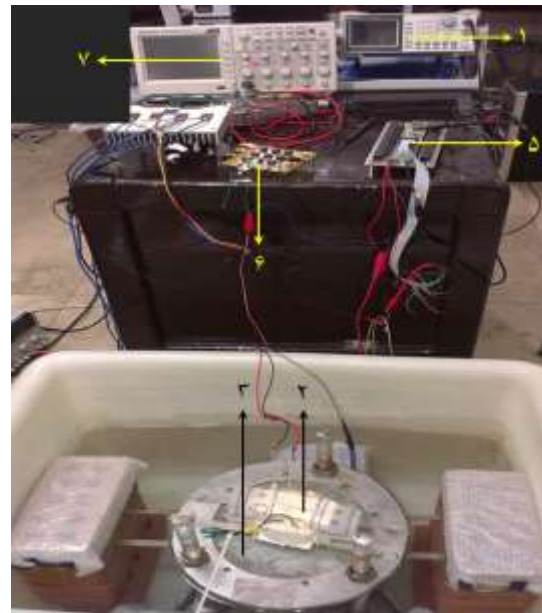
متناسب با دامنه ارتعاشات ورق بوده است (یک سیگنال کاملا سینوسی). در هر یک از تست‌ها تنها دو عدد (فرکانس هارمونیک و دامنه ولتاژ خروجی) متغیر بوده است که تغییرات آنها در حین تست ثبت شده است که یک نمونه از آن در شکل ۶ آورده شده است.



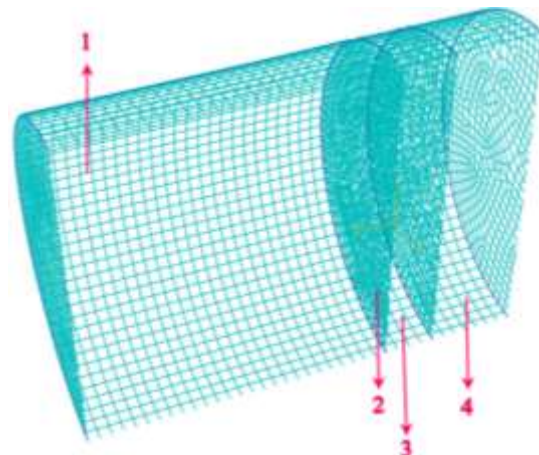
شکل ۶- نتایج آنالیز تجربی در عمق ۱۹ سانتیمتر

تست‌های تجربی فوق برای عمق‌های مختلفی از غوطه‌وری تکرار گردیده است که با استفاده از داده‌های به دست آمده از آنالیز تجربی، شکل ۷ بر اساس برازش منحنی ترسیم شده است. در شکل ۷ 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 منحنی عمق غوطه‌وری H1 با قطر ورق D بی بعد شده و فرکانس طبیعی به صورت نرمالایزیشن برداری ارائه شده است.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که 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 شتاب دهنده‌ای وارد می‌شود و این ذرات سیال به عنوان جرم افزوده در ارتعاشات ورق ایفای نقش می‌کنند و فرکانس طبیعی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. البته باید توجه داشت که عملاً سهم هر دوی "جرم افزوده" و "دمینگ" در این مساله مشهود است؛ ولی باید توجه داشته باشیم که از آنجا



شکل ۴- تجهیزات استفاده شده در آنالیز تجربی [۲۰]



شکل ۵- مدل سازی انجام شده در عمق ۳ سانتیمتر

آنالیز تجربی تحقیق در عمق‌های مختلف از عمق صفر تا ۲۰ سانتیمتر،  $H1/a = 2.0$  انجام شده است که به عنوان نمونه نتایج مربوط به عمق ۱۹ سانتی‌متر،  $H1/a = 1.9$  به ازای فرکانس‌های تحریک نزدیک به فرکانس مود اول در شکل ۶ نشان شده است. لازم به ذکر است که ولتاژ خروجی مربوط به مقدار متوسط ولتاژ خروجی سنسور هیدروفونی است که در زیر صفحه با فاصله معینی نصب شده است. سیگنال حاصله از هیدروفون، برای هر یک از تست‌ها به صورت یک سیگنال هارمونیک با فرکانسی برابر با فرکانس ارتعاش ورق و ولتاژی

جدول ۲- فرکانس‌های طبیعی اول تا سوم ورق در شرایط مرزی و حالت‌های غوطه‌وری مختلف

Name	Natural Frequency , Hz		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3
B1H00	26.8	33.5	51.7
B1H10	26.8	33.5	51.6
B1H20	24.9	31	47
B1H30	17	21.5	32.6
B1H40	9.8	13.1	21.1
B1H41	9.8	13	21.1
B1H42	9.7	12.9	20.7
B1H43	9	11.8	18.8
B1H44	7.2	9.6	15.5
B2H00	74.8	81.3	103.2
B2H10	68.5	74.7	94.7
B2H20	39.6	44.6	57.6
B2H30	25.1	29.4	39.7
B2H40	19.8	24.2	34
B2H41	19.7	24	33.6
B2H42	18.3	22	30.6
B2H43	15.9	19.2	26.6
B2H44	14.2	17.4	24.6
B3H00	117.4	122.3	139.9
B3H10	115.8	120.6	137.7
B3H20	75.7	80.6	92.5
B3H30	43.9	48.7	58.6
B3H40	33	38.2	47.9
B3H41	32.9	38.1	47.8
B3H42	31.4	36	44.8
B3H43	27.1	31	38.4
B3H44	23.8	27.6	34.8

که حرکت و سرعت ذرات سیال در این وضعیت قابل توجه و زیاد نمی‌باشد، سهم دمپینگ کمتر بوده و بیشتر نقش " اثر جرم افزوده" که در محاسبات مکانیک سیالات نیز مهم هست سبب کاهش فرکانس طبیعی در این نوع سیستم‌ها می‌شود. 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 است و در نتیجه جرم افزوده در معادله فرکانسی ورق نیز ثابت باقی خواهد ماند.

به منظور مقایسه نتایج تحلیل تجربی و عددی، آنالیز مودال توسط نرم‌افزار آباکوس در عمق‌های مختلف در بازه صفر تا ۲۰ سانتیمتر،  $H1/a=2.0$  انجام شد. داده‌های نتیجه گیری شده از آنالیز تجربی و نتایج مستخرج از آنالیز عددی در عمق‌های یکسان نسبت به یکدیگر در شکل ۷ نشان داده شده است. بی بعد سازی عمق غوطه‌وری و نرمالایز کردن فرکانس طبیعی انجام گردیده و نتایج مربوط به آنالیز تجربی و عددی در شکل ۷ ارائه شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که پس از عمق ۱۵ سانتی‌متر،  $H1/a=1.5$  در هر دو روش آنالیز تجربی و عددی، افزایش عمق تاثیری بر کاهش فرکانس‌های طبیعی ورق دایروی مقید محیطی با مشخصات مزبور نخواهد داشت.

مقایسه نتایج عددی و تجربی نشان می‌دهد که میانگین درصد اختلاف نتایج حاصل از آزمایش و آنالیز عددی، حدود ۵ درصد است که بیان کننده وجود تطابق خوب بین نتایج تحلیل تجربی و عددی است. با استفاده از این اعتبارسنجی در بخش بعد به آنالیز مودال صفحه مستطیلی قائم نیمه مغروق در آب با شرایط تکیه‌گاهی مختلف پرداخته می‌شود.

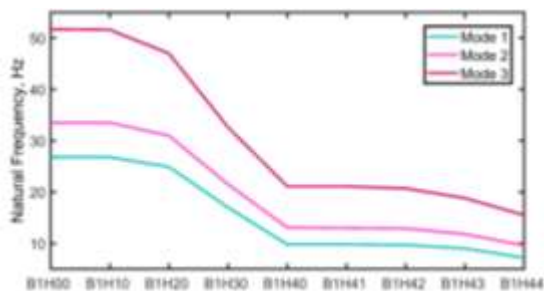
#### ۴- تحلیل نتایج عددی

با توجه به تطابق خوب داده‌های حاصل از آنالیز تجربی و عددی با میانگین اختلاف نتایج ۵ درصد، به آنالیز مودال یک ورق ۴ ضلعی پرداخته شد که نتایج حاصل از آنالیز براساس شرایط مرزی و حالت‌های غوطه‌وری مختلف، در جدول ۲ عرضه شده است.

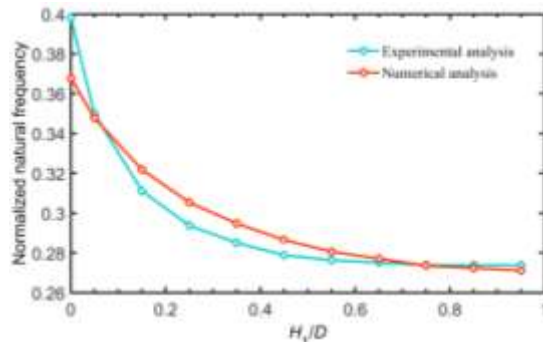


بالا طبق جدول ۱ به صورت Fix یا Joint هستند، ارتفاع آب در صورتی که بیش تر از  $\frac{1}{4}$  باشد، جرم افزوده قابل توجهی در سازه ایجاد می کند و به همین دلیل در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ از حالت غوطه وری H10 به بعد افت شدید فرکانس در همه مودها ایجاد می شود.

همان طور که در شکل های ۸ و ۱۱ و ۱۲ مشاهده می شود، وابسته به شرایط مرزی، کاهش فرکانس های طبیعی سازه با افزایش عمق غوطه وری با شیب های متفاوتی اتفاق می افتد؛ ولی در نهایت شیب همه آن ها بعد از تماس یک طرفه سیال و سازه نسبتاً هموار می شود؛ چراکه تاثیر جرم افزوده در کاهش فرکانس طبیعی با تماس یک طرفه سازه و سیال بسیار زیاد است و پس از آن با افزایش بیشتر سطح تماس، کاهش فرکانس طبیعی در برابر کاهشی که قبلاً اتفاق افتاده، کم رنگ تر نشان داده می شود.

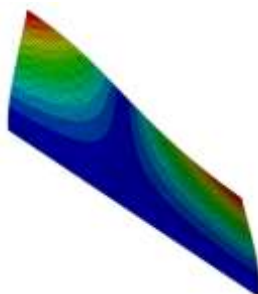


شکل ۸- فرکانس های طبیعی مربوط به شرایط مرزی شماره ۱ (B1) در عمق های مختلف

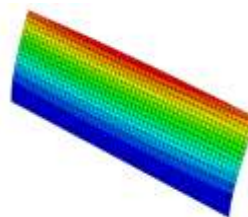


شکل ۷- فرکانس های طبیعی اول (۰,۱) نرمالایز شده منتج از آنالیز تجربی و آنالیز عددی ورق دایروی در عمق های غوطه وری بی بعد شده

فرکانس های طبیعی مربوط به شرایط مرزی شماره ۱ (B1) در عمق های مختلف در شکل ۸ عرضه شده است. در این شکل نحوه کاهش فرکانس طبیعی با افزایش ارتفاع آب در مودهای اول تا سوم نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود، از موقعیت B1H20 تا B1H40 این کاهش فرکانس با افت شدیدتری مواجه شده است؛ چراکه در شرط مرزی B1 پایه صفحه کاملاً Fix و وجه بالایی به صورت Free است و با توجه به شکل ۹ نیمه پایینی سازه جابه جایی زیادی ندارد و در صورتی که ارتفاع سیال از نصف ارتفاع سازه بیشتر شود، می تواند نقش خود را در ایجاد جرم افزوده و کاهش فرکانس طبیعی به طور موثرتری ایفا کند؛ بنابراین در شرط مرزی B1 افت شدید فرکانس از حالت غوطه وری H20 به بعد ایجاد می شود. در شرط های مرزی B2 و B3 با توجه شکل ۱۰ از آن جایی که وجه پایه و

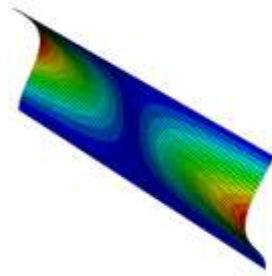


B (ب)

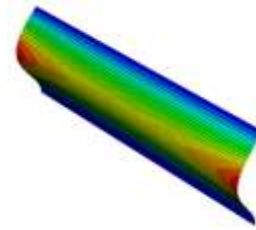


A (الف)

شکل ۹- الف) (A) فرکانس طبیعی اول ورق با شرط مرزی B1 (وجه پایین یک سر گیردار، وجوه کناری مقید در راستای حرکت افقی (x) و وجه بالا آزاد) و ب) (B) فرکانس طبیعی دوم ورق با شرط مرزی B1 (وجه پایین یک سر گیردار، وجوه کناری مقید در راستای حرکت افقی (x) و وجه بالا آزاد)



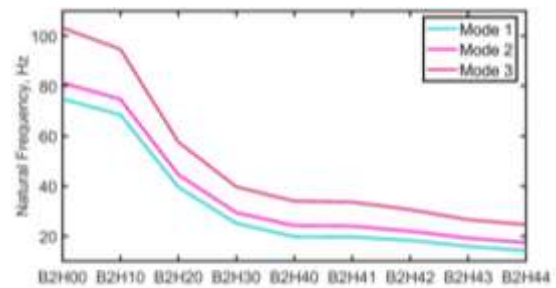
D (ب)



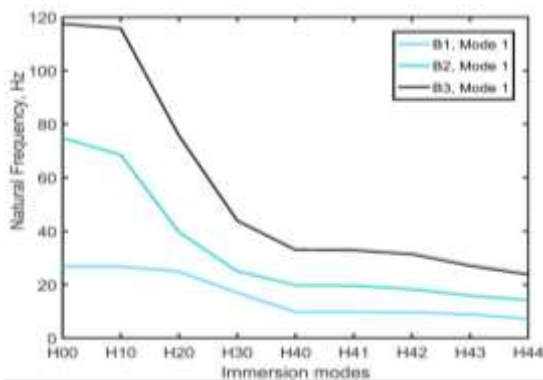
C (الف)

شکل ۱۰- الف) (C) فرکانس طبیعی اول ورق با شرط مرزی B2, B3 (وجه کناری آزاد و وجه بالا و پایین مقید در راستای حرکت X و Y و Z) و ب) (D) فرکانس طبیعی دوم ورق با شرط مرزی B2, B3 (وجه کناری آزاد و وجه بالا و پایین مقید در راستای حرکت X و Y و Z)

طبیعی خواهد داشت. در مجموع با توجه به تحقیقات صورت گرفته می توان اذعان نمود که سازه ها، فارغ از شکل هندسی که دارند، در صورتی که یک طرف آن ها به طور کامل در تماس با سیال قرار بگیرد با کاهش فرکانس طبیعی روبه رو می شوند و در این صورت چنانچه طرف دیگر سازه در تماس با سیال قرار بگیرد، کاهش فرکانس طبیعی در مقابل کاهشی که قبلا اتفاق افتاده است، چندان محسوس نخواهد بود. آنالیز انجام گرفته روی مخزن استوانه ای توسط ناصرالاسلامی و همکاران [۲۱] نیز روی این موضوع صحه می گذارد.

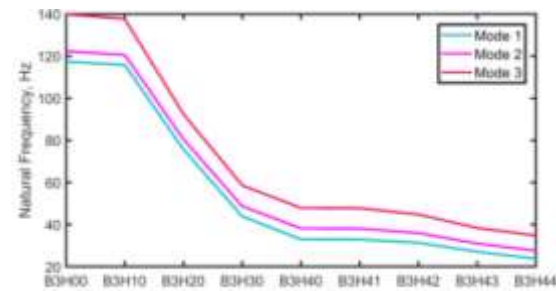


شکل ۱۱- فرکانس های طبیعی مربوط به شرایط مرزی شماره ۲ (B2) در عمق های مختلف



شکل ۱۳- فرکانس های طبیعی مود اول در شرایط مرزی و عمق های غوطه وری مختلف

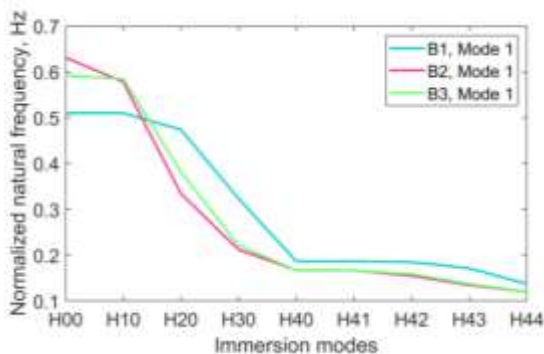
در شکل ۱۴ می توان به صورت همه جانبه تری تغییرات فرکانسی را نظاره کرد. با توجه به شکل مذکور می توان اذعان نمود که تغییرات شدید فرکانس طبیعی بر اثر تغییر شرایط



شکل ۱۲- فرکانس های طبیعی مربوط به شرایط مرزی شماره ۳ (B3) در عمق های مختلف

شکل ۱۳ نشان دهنده تغییرات فرکانس طبیعی مود اول ورق در تمامی شرایط مرزی نسبت به تغییرات ارتفاع آب در دو طرف آن است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، از حالت غوطه وری H40 به بعد، یعنی زمانی که یک طرف ورق کاملا در تماس با آب قرار می گیرد، افزایش ارتفاع آب در طرف دیگر ورق تاثیر بسیار کمی در کاهش فرکانس

تماس با سیال قرار می‌گیرد، افت فرکانس طبیعی با شیب زیاد شروع می‌شود و پس از تماس کاملاً یک طرفه سازه و سیال، شیب افت فرکانس هموار می‌شود؛ همچنین اختلاف بین فرکانس‌های طبیعی صفحات در شرایط مرزی B1، B2 و B3، در حالتی که یک طرف صفحات کاملاً با سیال در تماس است (H40) به حداقل می‌رسد و این تفاوت ناچیز با افزایش سطح تماس سازه و سیال تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

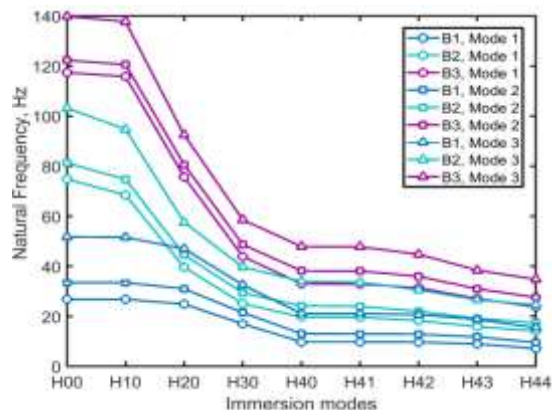


شکل ۱۵- فرکانس‌های طبیعی اول نرمالایز شده در شرط مرزی B1، B2 و B3 با حالت‌های غوطه‌وری مختلف

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق آنالیز مودال صفحه مستطیلی قائم که دو سمت آن را آب تا ارتفاع مشخصی احاطه کرده است، تحت شرایط تکیه‌گاهی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در این آنالیز مشخص شد که بسته به شرایط مرزی، کاهش فرکانس‌های طبیعی سازه با افزایش عمق غوطه‌وری با شیب‌های متفاوتی اتفاق می‌افتد؛ با افزایش عمق غوطه‌وری، صفحاتی که وجه بالا و پایه آن‌ها مقید می‌باشند، خیلی زوتر از صفحاتی که تنها پایه آن‌ها مقید است، دچار افت شدید فرکانس طبیعی می‌شوند. در آنالیز مودال ورق مستطیلی عمده جرم افزوده به وجود آمده، با تماس یک طرفه سیال و سازه ایجاد می‌شود؛ در حقیقت زمانی که یک طرف ورق کاملاً در تماس با آب قرار می‌گیرد، افزایش ارتفاع آب در طرف دیگر ورق تاثیر بسیار کمی در کاهش فرکانس طبیعی خواهد داشت. در نهایت زمانی که تمام سازه در تماس با سیال قرار می‌گیرد، در تمامی شرایط مرزی، اختلاف فرکانس‌های طبیعی آن‌ها بسیار کم می‌شود و این نشان دهنده تاثیر زیاد عمق غوطه‌وری در کاهش فرکانس‌های

مرزی اتفاق می‌افتد، به گونه‌ای که هرچه سازه مقیدتر باشد، سطح فرکانس‌های طبیعی سازه در تمامی مودها بالاتر می‌رود. در شکل ۱۴ محل افت ناگهانی فرکانس طبیعی سازه و عدم تغییرات قابل توجه سازه از موقعیت غوطه‌وری H40 به بعد را در تمامی شرایط مرزی و مودهای مختلف نمایان است.



شکل ۱۴- فرکانس‌های طبیعی مود اول و دوم و سوم در شرایط مرزی و عمق‌های غوطه‌وری مختلف

بدیهی است که در شرایط یکسان، هرچه سازه مقیدتر باشد، فرکانس‌های طبیعی آن افزایش می‌یابد. با توجه به جدول ۱ در شرط مرزی B3، بیش‌ترین و در شرط مرزی B1، کم‌ترین قید حاکم شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ و ۱۴ نمایان است، در این دو شرط مرزی در شرایطی که سازه با سیال در تماس نباشد (حالت غوطه‌وری H00)، در تمامی مودها اختلاف بین فرکانس‌های طبیعی B1 و B3 ۹۰ هرتز است؛ اما زمانی که تنها یک طرف سازه در تماس با سیال قرار می‌گیرد، اختلاف فرکانس طبیعی آن‌ها به ۲۴ هرتز و در نهایت با تماس دو طرفه سازه و سیال به ۱۶ هرتز می‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد، زمانی که صفحات با شرایط مرزی مختلف دارای اختلاف زیاد در فرکانس‌های طبیعی هستند، در صورتی که در تماس یک طرفه با سیال واقع شوند، این اختلاف به شدت کمتر می‌شود. جهت نمایش بهتر تاثیر شرایط مرزی و حالت غوطه‌وری بر فرکانس‌های طبیعی صفحه، از نرمالایز کردن اعداد فرکانس طبیعی استفاده شده است که در شکل ۱۵ نتایج آن عرضه شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که از زمانی که تنها یک طرف سازه در

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

- [13] Jeong KH, Kim KJ (2005) Hydroelastic vibration of a circular plate submerged in a bounded compressible fluid. *J Sound Vibration* 283: 153-172.
- [14] Zhou D, Liu W (2007) Hydroelastic vibrations of flexible rectangular tanks partially filled with liquid. *J Numerical Methods Eng* 71: 149-174.
- [15] Esmailzadeh M, Lakis AA, Thomas M, Marcouiller L (2008) Three-dimensional modeling of curved structures containing and/or submerged in fluid. *Finite Element Analys Design* 44: 334-345.
- [16] Hosseini-Hashemi S, Karimi M, Rokni Damavandi Taher H (2010) Vibration analysis of rectangular Mindlin plates on elastic foundations and vertically in contact with stationary fluid by the Ritz method. *Ocean Eng* 37: 174-185.
- [17] Hosseini-Hashemi S, Karimi M, Rokni H (2012) Natural frequencies of rectangular Mindlin plates coupled with stationary fluid. *Appl Math Model* 36: 764-778.
- [18] Goudarzi MA, Sabbagh-Yazdi SR (2012) Analytical and experimental evaluation on the effectiveness of upper mounted baffles with respect to comm only used baffles. *Ocean Eng* 42: 205-217.
- [19] Askari E, Jeong KH, Amabili M (2013) Hydroelastic vibration of circular plates immersed in a liquid-filled container with free surface. *J Sound Vibration* 332: 3064-3085.
- [20] Nasserolelami A, Salari M (2016) 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* 16(6): 396-402. (in Persian)

[۲۱] ناصرالاسلامی ا، سالاری م (۱۳۹۴) آنالیز مودال مخزن استوانه‌ای غوطه‌ور در سیال تراکم ناپذیر با شرایط تکیه‌گاهی مختلف. کنفرانس بین المللی یافته‌های نوین پژوهشی در مهندسی صنایع و مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران.

طبیعی سازه است، هرچند که شرایط مرزی بسیار از یکدیگر متفاوت باشند.

## ۶- مراجع

- [1] Kerboua Y, Lakis AA, Thomas M, Marcouiller L (2008) Vibration analysis of rectangular plates coupled with fluid. *Appl Math Model* 32: 2570-2586.
- [2] Robinson NJ, Palmer SC (1990) A modal analysis of a rectangular plate floating on an incompressible liquid. *J Sound Vibration* 142(3): 453-460.
- [3] Ginsberg JH, Chu P (1992) Asymmetric vibration of heavily fluid-loaded circular plate using variational principles. *J Acoustic America* 91(2): 894-906.
- [4] Amabili M, Frosali G, Kwak MK (1996) Free vibrations of annular plates coupled with fluids. *J Sound Vibration* 191(5): 825-846.
- [5] Amabili M, Dalpiaz G (1998) Vibrations of base plates in annular cylindrical tanks: theory and experiments. *J Sound Vibration* 210: 329-350.
- [6] Kwak MK, Amabili M (1999) Hydroelastic vibration of free-edge annular plates. *ASME J Vibration Acoustics* 121: 26-32.
- [7] Kwak MK, Han, SB (2000) Effect of fluid depth on the hydroelastic vibration of free- edge circular plate. *J Sound Vibration* 230(1): 171-185.
- [8] Zhou D, Cheung YK (2000) Vibration of vertical rectangular plate in contact with water on one side. *Earthquake Eng Struct Dynam* 29: 693-710.
- [9] Amabili M (2001) Vibrations of circular plates resting on a sloshing liquid: solution of the fully coupled problem. *J Sound Vibration* 245(2): 261-283.
- [10] Jeong KH, Yoo GH, Lee SC (2003) Hydroelastic vibration of two identical rectangular plates. *J Sound Vibration* 272: 539-555.
- [11] Jeong KH (2003) Free vibration of two identical circular plates coupled with bounded fluid. *J Sound Vibration* 260: 653-670.