اثر شرایط مرزی سطح آزاد و بستر کف روی ضرایب هیدرودینامیکی ورق هیو صلب و ترکیبی صلب-الاستیک در سکوهای شناور

ابوذر اباذری[۱]، مهدی بهزاد[۲]*

[۱] دانشگاه صنعتی شریف؛ abouzarabazari@mech.sharif.edu
[۲] هیئت علمی دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ m_behzad@sharif.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۰۵

کلمات کلیدی:
ورق هیو
ضرایب هیدرودینامیکی
نزدیکی به مرزها
فرکانس
دیسک الاستیک-صلب

چکیده

ارتعاشات سازه‌های شناور تحت نیروهای محیطی با نصب ورق‌های هیو در انتهای پایینی ستون‌های آنها می‌تواند کاهش یابد. فرکانس و نزدیکی به مرزها پارامترهای مهمی هستند که تاثیر آنها روی ضرایب هیدرودینامیکی ورق‌ها در این تحقیق به صورت تجربی بررسی می‌شود. از طرفی تمامی ورق‌های هیو که تا کنون استفاده شده‌اند، کاملا صلب می‌باشند و بر اساس تحقیقات منتشر شده میرایی و جرم افزوده به طور همزمان با افزایش دامنه، بزرگ می‌شوند. پیش‌بینی می‌شود که استفاده از یک بخش صلب در مرکز و الاستیک در لبه بیرونی دیسک، امکان کارایی بهتر میرایی را در مقایسه با جرم افزوده داشته باشد که این خصوصیات دینامیکی موجب پاسخگویی بهتر سازه در شرایط خاص بارگذاری خواهد شد. آزمایش های انجام شده تحت تحریک اجباری هارمونیک در فرکانس‌ها و عمق‌های مختلف در مطالعه کنونی نشان می‌دهد که افزایش فرکانس موجب کاهش ضرایب هیدرودینامیکی در نزدیک سطح و افزایش ضرایب مربوطه در مجاورت بستر کف می‌شود. از طرفی، فرکانس تأثیر قابل توجهی روی ضرایب هیدرودینامیکی دیسک ترکیبی با سهم الاستیک بزرگتر خواهد داشت. میزان این تاثیر بستگی به نوع مد برانگیخته شده لبه ورق الاستیک دارد.

Effects of Free Surface or Floor Wall on the Hydrodynamic Coefficients of the Rigid and Combined Rigid–Elastic Heave Plates in Offshore Platforms

Abuzar Abazari[1], Mehdi Behzad*

[1] Sharif University of technology; abouzarabazari@mech.sharif.edu
[2] Faculty member, Sharif University of technology; m_behzad@sharif.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 20 Nov. 2018
Accepted: 26 Dec. 2018

Keywords:
Heave plate
Hydrodynamic coefficients
Boundary proximity
Frequency
Elastic-composite disk

ABSTRACT

Instability and vibration of offshore platforms in harsh environmental force can be reduced by installing heave plates underneath of platform columns. Effect of parameters such as excitation Frequency and boundaries are investigated experimentally in this research. On the other hand, regarding to the published papers, both the added mass and damping gradually increase versus vibration amplitude for a rigid heave plate. It is predicted that using a combination of a rigid disk in center and an elastic plate around it can increase the damping. It is generally observed from forced harmonic vibrations that frequency can decrease and increase hydrodynamic coefficients respectively near free surface and floor wall. Furthermore, frequency has considerable effect on the hydrodynamic coefficients of a rigid heave plate with large elastic part around it. This definitely depends on the excited mode shapes of the elastic edge.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.10.9]

۱ - مقدمه

توسعه جمعیت و تعدد صنایع نیاز به انرژی را روز به روز افزایش داده است. به همین دلیل بشر به دنبال استحصال انرژی به روش-های جدید و از مکان‌هایی است که به علت چالش‌های پیش رو کمتر به آن پرداخته است. وجود سوخت‌های فسیلی در مکان‌های با عمق زیاد در اقیانوس‌ها و حتی پتانسیل بالای منابع انرژی‌های نو مثل باد و موج در این موقعیت‌ها، استفاده از سازه‌ها و سکوهای شناوری مثل پایه کششی[1] و اسپار[2] و.. را ناگزیر کرده است. یکی از چالش‌های فعالیت در چنین مکان‌هایی، امکان وقوع ارتعاشات زیاد سکوها تحت شرایط محیطی سخت می‌باشد.

یکی از روش‌ها برای کنترل و پایداری چنین سازه‌هایی، استفاده از ورق‌های به اندازه کافی صلب و با ضخامت کم در انتهای پایین ستون‌های آنها می‌باشد. ابعاد این ورق در مقایسه با ابعاد و قطر ستون‌ها بزرگتر است به طوری که با حرکت سکو به بالا و پایین از لبه تیز این ورق‌ها ورتکس‌هایی القا می‌شود که وابسته به اندازه آن-ها میزان میرایی کل سیستم افزایش می‌یابد. علاوه بر این، به علت جابجا شدن حجمی ازسیال اطراف ورق، جرم معادل کل سیستم افزایش می‌یابد. این موضوع به مهندس طراح اجازه می‌دهد با تنظیم ابعاد این ورق‌ها جرم معادلی به سیستم القا کند که فرکانس طبیعی بدست آمده سیستم از فرکانس تحریک نیروهای محیطی به اندازه کافی دور باشد تا تشدید اتفاق نیافتد. مفاهیم جرم افزوده و میرایی به شدت تحت تأثیر دو پارامتر بی‌بعد β و KC می‌باشند که به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شوند

$$KC = \frac{2\pi A}{D}, \quad \beta = \frac{D^2 f}{\vartheta}, \tag{۱}$$

به طوری که A دامنه ارتعاشات، D قطر دیسک، f فرکانس ارتعاشات و ϑ ویسکوزیته سینماتیکی می‌باشد. از این رو، تحقیقات گوناگونی روی ضرایب هیدرودینامیک ورق‌ها صورت گرفته است. آزمایش‌های تیاگاراجان و همکاران [۱, ۲] روی استوانه تنها و طرح ترکیبی استوانه با دیسک متصل به انتهای پایین، مشخص کرد که میزان درگ شکلی طرح ترکیبی تقریبا دو برابر درگ شکلی استوانه تنها می‌باشد. کارایی بالای ورق با ضخامت کم در افزایش میرایی با مطالعه عددی [۳] تایید شد. فاصله بیشتر ورق هیو و استوانه پارامتری است که باعث بهبود عملکرد ورق از جنبه میرایی و جرم افزوده خواهد شد هر چند که قطرِ ورق هیو، عاملی تأثیرگذارتر روی افزایش جرم افزوده در مقایسه با پارامتر فاصله بین دیسک و استوانه می‌باشد [۴].

تحلیل عددی تایو و همکاران[۵] و همچنین تحقیقات آزمایشگاهی سودهاکار [۶] و فیلیپ [۷] نشان داد که افزایش تعداد ورق‌های هیو به صورت آرایه پشت سر هم، ضرایب هیدرودینامیک سیستم را افزایش می‌دهد. این محققان بر وجود یک فاصله بحرانی بین ورق‌ها صحه گذاشتند که بعد از آن مقدار، ضرایب هیدرودینامیک مستقل از فاصله می‌باشند.

تست‌های انجام شده روی ورق‌های تنها، بدون استوانه، توسط لی و همکارن [۸] عدم وابستگی ضرایب هیدرودینامیک ورق مربعی به فرکانس را نشان داد. همچنین، لوپز [۹] اثر تقویت کننده‌ها روی ورق‌ها را که در واقعیت وجود دارد با آزمایش‌هایی مورد مطالعه قرار داد که مشخص گردید ورق تقویت شده در مقایسه با ورق صاف میرایی کمتر و جرم افزوده بیشتر دارد.

اثر شرایط مرزی سطح آزاد و بستر کف روی ضرایب هیدرودینامیکی ورق صلب با قطر ۰,۲ متر در فرکانس تحریک ۱ هرتز با تحقیقات تجربی [۱۰, ۱۱] و تحلیل عددی [۱۲] بررسی شده است. نتایج، افزایش شیب منحنی‌های میرایی و جرم افزوده بر حسب KC با نزدیکی به مرز را نشان می‌دهد. ضمنا با نزدیکی به مرزها در نتایج منحنی‌های ضرایب هیدرودینامیکی بر حسب KC یک مقدار بحرانی مشاهده شد. همچنین منحنی‌های هر دو ضرایب هیدرودینامیکی، افزایش افست با نزدیکی فاصله تا مرز را تایید کردند. یکی از نکاتی که کمتر مورد بررسی قرار گرفته تأثیر فرکانس روی ضرایب هیدرودینامیک ورق‌های نزدیک به سطح آزاد و یا بستر کف می‌باشد. این موضوع برای دیسک نزدیک به سطح به خاطر وابستگی امواج تشعشعی به فرکانس تحریک از اهمیت بیشتر برخوردار است که در این مقاله به صورت تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

استفاده از ورق هیو صلب در سکوها هر دو پارامتر میرایی و جرم افزوده را افزایش می‌دهد این درحالی است که بستگی به خصوصیات دینامیکی سیستم، امکان دارد افزایش جرم معادل کل سیستم باعث انطباق فرکانس طبیعی و تحریک و وقوع تشدید شود. لذا پیشنهاد استفاده از ورق الاستیک در بخش بیرونی دیسک امکان تغییر شکل بیشتر لبه بیرونی را بوجود می‌آورد که این نکته از نرخ افزایش بالای جرم افزوده هنگام افزایش دامنه ارتعاشات ممانعت می‌کند. از طرفی بواسطه دامنه ارتعاشات بیشتر در لبه و سرعت بالاتر لبه ورق، امکان دستیابی به میرایی بیشتر فراهم می-شود. لازم به ذکر است که تحقیقاتی در زمینه بررسی ویژگیهای دینامیکی ورق‌های فلزی الاستیک انجام پذیرفته است.

امابیلی و همکاران [۱۳, ۱۴] با تحلیل مودال به روش عددی و تجربی نشان دادند که آب تأثیر زیادی روی کاهش فرکانس طبیعی سازه در مقایسه با هوا می‌گذارد. بررسی ارتعاش آزاد ورق الاستیک در تحقیق [۱۵]، کاهش میرایی را با نزدیکی به سطح آزاد آب نشان می‌دهد. همچنین عسکری و همکاران [۱۶] نشان دادند که میرایی ورق در آب بیشتر از سیال هوا می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.10.9]

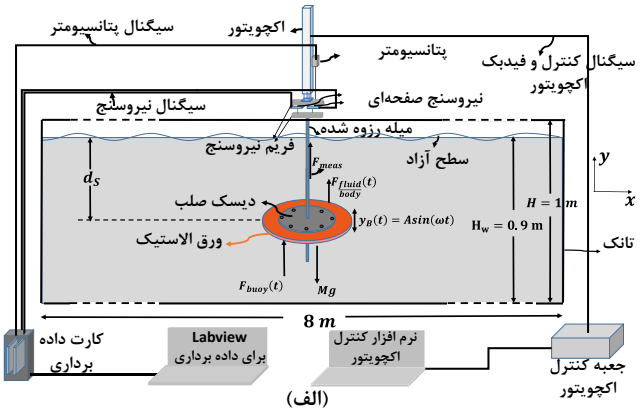
اسکالر و همکاران [۱۷] ویژگی‌های دینامیکی دیسک را به صورت تجربی با ارتعاش اجباری و روش عددی کوپل مدل اجزا محدود سازه‌ای اکوستیکی بررسی کردند. آنها اندازه مودهای متقارن محوری را در آب و هوا با هم مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که فاکتور کاهش فرکانس طبیعی در آب تقریبا ۶۴٪ می‌باشد.

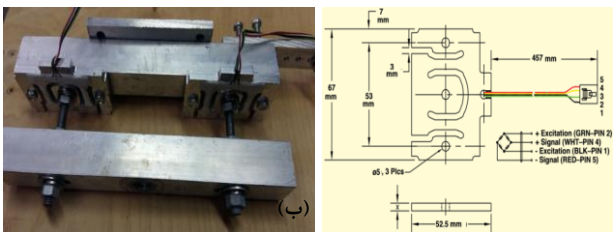
تا کنون اکثر تحقیقات انجام شده در مورد ورق‌های الاستیک کاملا یکنواخت بوده است و تمرکزی روی طرح ترکیبی شامل ورق الاستیک در بخش بیرونی و ورق صلب در بخش مرکزی وجود نداشته‌است. همچنین بیشتر مقالات به بررسی آنالیز مودال با ارتعاشات آزاد پرداخته‌اند که ورق‌های مورد مطالعه قابلیت تغییر شکل‌های بزرگ را نداشته‌اند.

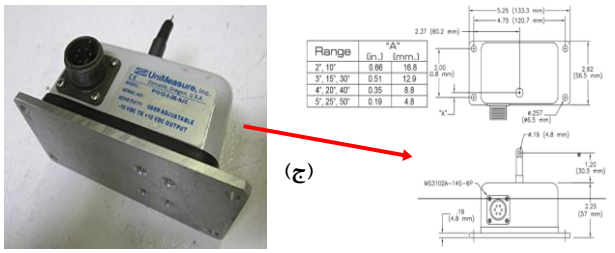
بنابراین در بخش دیگر تحقیق کنونی با استفاده از یک ورق پلیمری انعطاف‌پذیر با قابلیت تغییر شکل بزرگ، طرح ترکیبی صلب الاستیک مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به طور خاص، اثرات نزدیکی به مرزها و فرکانس روی ضرایب هیدرودینامیکی چنین ورق‌هایی با تحریک هارمونیک اجباری در دامنه‌های مختلف بررسی می‌شود.

۲-تجهیزات و سامانه آزمایش

تست‌ها در تانک تحقیقاتی دانشگاه مین آمریکا[۳] با طول، ارتفاع و پهنای به ترتیب ۱،۸و۱ متر انجام شده است. تانک هنگام تست‌ها تا ارتفاع ۰،۹ متر پر شد، برای این‌که امواج تشعشعی احتمالی قابلیت مانور در سطح آزاد آب تانک را داشته باشند. یک موتور الکتریکی پارکر از نوع BE341F ۱۵۰ کیلو وات، یک اکچویتور الکتریکی از نوع Parker ETH032 را تحریک می‌کند تا ارتعاشات هارمونیک در راستای قائم را ایجاد کند (شکل ۱-الف).







شکل ۱- الف)چیدمان کلی در تانک، ب) فریم نیروسنج و شماتیک سنسورهای صفحه‌ای، ج)پتانسیومتر برای اندازه‌گیری جابجایی

سیگنال‌های نیروهای اعمالی از طرف سیال به دیسک با یک فریم نیروسنج اندازه‌گیری می‌شود که بین اکچویتور و دیسک قرار گرفته است. سنسورها از نوع LCPW±37.5 kg می‌باشند (**شکل ۱**-الف و ب). یک جابجایی‌سنج از نوع پتانسیومتر سیمی که براساس اختلاف پتانسیل کار می‌کند وظیفه اندازه‌گیری موقعیت دیسک در راستای قائم را برعهده دارد (شکل ۱-ج). تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال و داده‌برداری از طریق کارت NI 9205 و نرم افزارلبویو[۴] انجام می‌پذیرد. نرخ داده برداری با فرکانس 1 KHz می‌باشد.

۳-فرآیند تحلیل نتایج

برای بدست آوردن ضرایب هیدرودینامیکی یک دیسک باید ارتباط بین نیروهای اعمالی به مجموعه دیسک در حال ارتعاش را با قانون دوم نیوتن بدست آورد. همانند آنچه که در شکل ۱-الف نمایش داده شده است نیروهای اعمالی به دیسک شامل نیروهای وزن Mg ، بویانسی $F_{buoy}(t)$، نیروهای هیدرودینامیکی وارد از طرف سیال به جسم $F_{fluid/body}(t)$ و نیروی وارد شده از طرف میله رزوه‌دار به مجموعه دیسک F_{meas} می‌باشند. نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر جسم به دو ترم هم‌فاز با شتاب و سرعت تفکیک می‌شوند که، به ترتیب، نماینده نیروهای اینرسی و میرایی اعمالی به مجموعه دیسک می‌باشند. در نهایت رابطه(۲) نیروی اندازه‌گیری شده توسط سنسورهای نیرو را به دیگر پارامترها به صورت منطقی ارتباط می‌دهد.

$$F_{meas} = (M + m_a)\ddot{y}(t) + B\dot{y}(t) + C_k y(t) + C \quad (۲)$$

در این رابطه m_a جرم افزوده، B ضریب میرایی و C_k ضریب سفتی مجموعه در آب ناشی از بویانسی می‌باشد. با توجه به مقدار ناچیز بویانسی بواسطه سطح مقطع کوچک میله رزوه‌دار با قطر ۱۲ میلیمتر می‌توان از ضریب C_k صرف نظر کرد. مقدار ثابت در رابطه(۲) ناشی از وزن ثابت دیسک و فریم نیروسنج است که به کل مجموعه حین ارتعاشات اعمال می‌شود. تحلیل داده‌ها و مشتق-گیری مرکزی[۵] با نرم افزار متلب انجام می‌گیرد. فیلتراسیون سیگنال‌ها به روش فیلتر پایین گذر باترورث[۶] می‌باشد. مقدار تجربی سیگنال F_{meas} بدست آمده، با مقدار تئوری تخمین زده شده در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.10.9]

رابطه(۲) برابر قرار داده می‌شود که مجهولات رابطه بدست آمده، ضرایب جرم افزوده m_a و میرایی B می‌باشند که با استفاده از روش حداقل مربعات[۷] با کمینه کردن خطا بین سیگنال تئوری و آزمایش بدست می‌آیند[۸]. این ضرایب در هر سیکل به طور جداگانه محاسبه می‌شوند و در نهایت متوسط ضرایب کل سیکل‌ها به عنوان ضرایب هیدرودینامیکی مشخص می‌شود. برای محاسبه دقیق‌تر، میرایی هنگام وقوع پیک سرعت و جرم افزوده هنگام وقوع پیک شتاب محاسبه می‌شود[۱۸]. برای یک مقایسه مناسب بین دیسک-های با اندازه‌های مختلف، جرم افزوده و ضریب میرایی به صورت رابطه (۳) بی‌بعد می‌شوند.

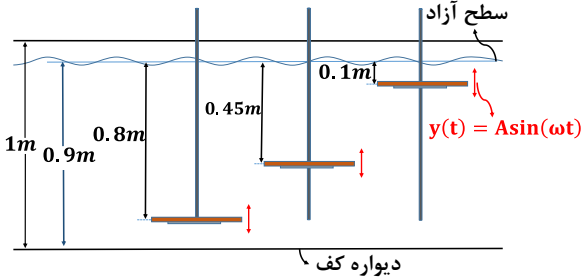
$$A' = \frac{m_a}{m_{ath}}, \quad B' = \frac{B}{2m_{ath}\omega} \qquad (۳)$$

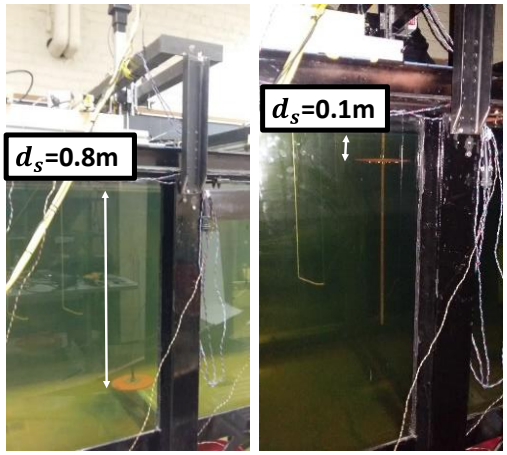
که $m_{ath} = {}^1/_3\,\rho D^3$ جرم افزوده تئوری دیسک می‌باشد.

۴- جزئیات مدل تست

در مطالعه حال حاضر دو سری تست انجام می‌شود. در سری اول اثرات شرایط مرزی سطح آزاد و بستر کف روی دیسک کاملا صلب (FRD[۸]) بررسی می‌شود. در سری دوم تست‌ها، اثر شرایط مرزی روی دیسک ترکیبی شامل بخش مرکزی فولادی صلب و بخش بیرونی پلیمری الاستیک تحقیق می‌شود (شکل ۲). ماده الاستیک یورتان[۹] می‌باشد و برای ساده نویسی دیسک ترکیبی صلب الاستیک یورتان، UCRED[۱۰] نامیده می‌شود. نسبت قطر D_r برای UCRED حاصل تقسیم قطر بخش صلب به قطر الاستیک می-باشد که مقدار کمتر آن به مفهوم سفتی کمتر لبه دیسک است. $D_r = 1$ را می‌توان همان دیسک کاملا صلب در نظر گرفت. از شکل ۱-الف و شکل ۳ واضح است که فاصله دیسک از سطح آزاد d_S می‌باشد که با تغییر آن تأثیر شرایط مرزی روی ضرایب هیدرودینامیک دیسک بررسی می‌گردد. نمای شماتیک و تصویر واقعی شرایط نزدیک به سطح آزاد و بستر کف حین تست در شکل ۳ نمایش داده شده است. ماتریس تست برای بررسی پارامترهای مختلف به صورت **جدول ۱** تنظیم می‌شود.

شکل ۲- چیدمان‌های مختلف دیسک الاستیک-صلب و کاملا صلب





شکل ۳- موقعیت UCRED در عمق‌های مختلف

۵- نتایج و بحث

میدان فشار و سرعت سیال اطراف یک دیسک مرتعش نزدیک مرزها، دیوار صلب یا سطح آزاد، می‌تواند به شدت تحت تأثیر قرار گیرد. دیسک FRD با قطر $D = 0.2\ m$ و چیدمان‌های مختلف UCRED با $D_r = 0.4,0.8$ در عمق‌های مختلف $d_{Sr} =$ 1,4.5,8 همانند شکل ۳ به صورت هارمونیک تحریک می‌شوند تا ضرایب هیدرودینامیکی بدست آورده شود.

۵-۱ تأثیر نزدیکی به مرزها روی ضرایب هیدرودینامیک دیسک FRD در β ثابت

اندازه عمق مغروق دیسک‌ها، ۰٫۱ و ۰٫۸ متر، بر اساس ناحیه پیشنهادی در تحقیقات وادهوا و همکاران [۱۰, ۱۱] و مندوزا و همکاران [۱۲] به اندازه‌ای می‌باشد که اثرات شرایط مرزی روی حجم سیال اطراف دیسک و خصوصیات هیدرودینامیکی منتجه به وضوح مشاهده گردد. این مقادیر نزدیک‌ترین فاصله نسبت به مرزها می‌باشند که برای دیسک مورد نظر بر اساس تجهیزات موجود قابل دستیابی است. در ابتدا اثر شرایط مرزی روی جرم افزوده و میرایی یک دیسک FRD بررسی می‌گردد.

شکل ۴-الف نشان می‌دهد که میرایی ماکزیمم در $d_{Sr} = 1$، نزدیک به سطح آزاد، و میرایی مینیمم در $d_{Sr} = 4.5$، عمق میانه حوضچه، اتفاق می‌افتد. در تمام محدوده KCهای مورد آزمایش، ضریب میرایی در نمونه با $d_{Sr} = 1$ نسبت به نمونه با $d_{Sr} = 8$ بیشتر می‌باشد. مقدار افست در منحنی میرایی بر حسب KC مربوط به میرایی اصطکاکی می‌باشد [۱].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.10.9]

جدول ۱- ماتریس تست نمونه‌های FRD و UCRED

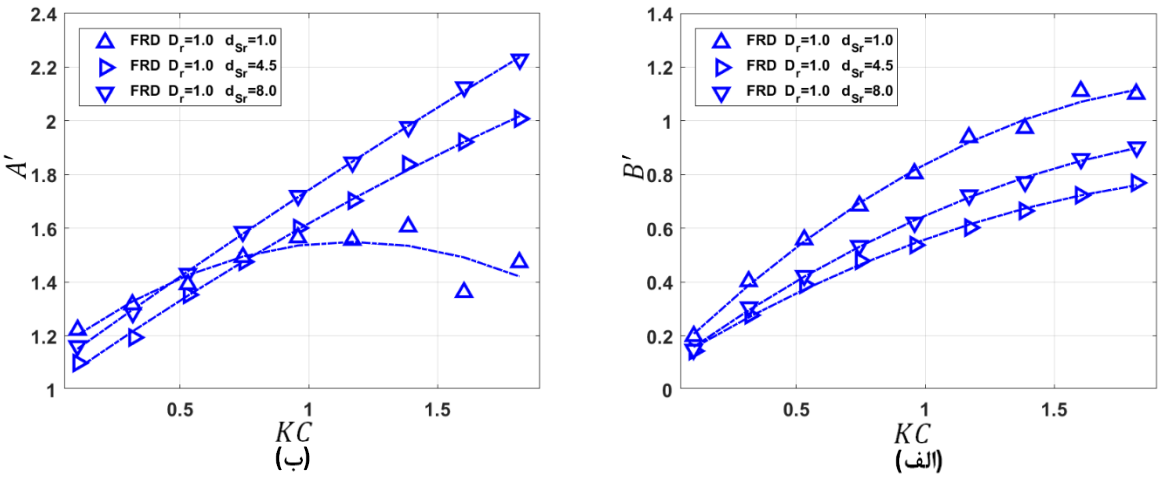
نوع دیسک	قطر (D_R)و ضخامت (h) و دیسک صلب	قطر (D_E)و ضخامت ورق(h) الاستیک و مدول E	$D_r = \frac{D_R}{D_E}$	KC	$d_{Sr} = \frac{d_S}{H_W}$	فرکانس f(Hz)
صلب	0.2m & 2mm	-----	1	0.1-1.8	1,4.5,8	1,2,3Hz
ترکیبی الاستیک-صلب	0.16, 0.12, 0.08m & 2mm	0.2m& 6mm & Red $E \cong 0.33$ Mpa	0.8,0.6,0.4	0.1-1.8	1,4.5,8	1,2,3Hz

این در حالی است که بیشترین مقدار ضریب جرم افزوده برای نمونه با $d_{Sr} = 1$ در مقادیر کوچک KC اتفاق می‌افتد. این نمونه و نمونه با $d_{Sr} = 8$، به ترتیب، کمترین و بیشترین جرم افزوده را برای KCهای بزرگ‌تر از ۰٫۵ دارا می‌باشند (شکل ۴-ب).

به طور کلی روند تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی بر حسب KC در اینجا مشابه با تحقیقات قبلی می‌باشد. مثلا روند افزایشی جرم افزوده و میرایی برای نمونه نزدیک به بستر کف در KCهای کوچک در مقایسه با مقدار عمق میانی، $d_{Sr} = 4.5$، تقریبا مشابه با مطالعات وادهوا و مندوزا [۱۰ و ۱۲] در نظر گرفته شده (شکل ۴). این موضوع ناشی از محدود شدن حرکت سیال بین دیسک و دیواره است که باعث افزایش میدان فشار اطراف دیسک می‌شود. این امر منجر به افزایش هر دو بخش نیروهای اعمال شده هم‌فاز با شتاب و سرعت خواهد شد. منطبق بودن میرایی نمونه نزدیک به دیواره با نمونه دور از مرزها، $d_{Sr} = 4.5$، در KC نزدیک به مقدار صفر منطبق با نتایج عددی مندوزا [۱۲] است. از طرفی افزایش مقدار افست منحنی جرم افزوده دیسک نزدیک به سطح در مقایسه با نمونه دور از مرزها نیز با نتایج عددی مندوزا [۱۲] سازگاری دارد. نکته مهم این است که در مطالعه کنونی هیچ مقدار بحرانی KC در منحنی‌های جرم افزوده و میرایی، مشابه با تحلیل عددی مندوزا مشاهده نشده است، هر چند که روند تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به $d_{Sr} = 8$ در تحقیق حاضر مشابه با نتایج تجربی وادهوا می‌باشد. برای مقادیر KC بزرگ‌تر از مقدار بحرانی، افت ناگهانی در منحنی‌های ضرایب هیدرودینامیک پدید می‌آید. لذا به نظر می‌رسد تحلیل عددی از نوع دینامیک سیالات محاسباتی [۱۲]، نمی‌تواند دقیقا فاصله بحرانی را پیش‌بینی کند. برای مقادیر کم‌تر از این فاصله، افت ناگهانی در منحنی‌های هیدرودینامیکی مشاهده می‌شود. به عنوان نمونه در تحلیل عددی برای $d_{Sr} = 1$ وجود یک پیک بحرانی طبق مطالعه مندوزا [۱۲] کاملا مشهود است در حالی که در تحقیق حاضر برای $d_{Sr} = 1$ تغییرات افت شدید در منحنی‌های هیدرودینامیکی مشاهده نمی‌گردد.

در نمونه نزدیک به سطح، $d_{Sr} = 1$، افزایش در مقدار شیب و میزان افست منحنی جرم افزوده در مقادیر کوچک KC مشاهده می‌شود که تدریجا با افزایش مقدار KC یک افت ناگهانی برای آن اتفاق می‌افتد (شکل ۴-ب). در دامنه‌های کوچک ارتعاشات، سیال اطراف نمونه نزدیک به سطح، به علت فاصله زیاد دیسک از دیواره صلب آزادی حرکت بیشتری دارد به طوری که دیسک قادر است تعداد ذرات بیشتری از سیال را شتاب دهد و این منجر به جرم افزوده بیشتر در مقایسه با نمونه‌های نزدیک به دیواره صلب می‌شود. اما با نزدیکی KC به مقدار بحرانی، حجم آب موجود در بالای دیسک و نزدیک به سطح کاهش می‌یابد. به طوری که علی‌رغم اعمال انرژی ورودی کافی از دیسک به سیال، حجم ذرات کمتری اطراف دیسک برای شتاب‌دار شدن وجود دارد. لذا افزایش تدریجی دامنه ارتعاشات، جرم افزوده را کم خواهد کرد.

میرایی برای نمونه نزدیک به سطح در مقایسه با عمق‌های دیگر بیشتر است و این به دلیل میرایی تشعشعی ناشی از موج‌های ایجاد شده روی سطح آزاد آب می‌باشد (شکل ۴-الف).



شکل ۴- تاثیر d_{Sr} روی ضرایب هیدرودینامیک دیسک FRD در فرکانس تحریک ثابت $\beta = 4 \times 10^4$.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.10.9]

لازم به ذکر است که کاهش شدید میرایی در KC به اندازه کافی بزرگ، همانند آنچه برای جرم افزوده مشاهده گردید، می‌تواند امکان‌پذیر باشد. افزایش دامنه ارتعاشات و کاهش حجم آب بالای دیسک، امکان رشد ورتکس‌ها را محدودتر می‌کند.

علی‌رغم مشابهت اندازه دیسک و فرکانس ارتعاشات در مطالعه پیش‌رو و وادهوا [۱۱]، کاهش شدید مقادیر میرایی در تحقیق وداهوا که بعد از مقدار بحرانی KC رخ می‌دهد می‌تواند به علت ابعاد کوچک حوضچه مورد آزمایش باشد. این ابعاد تأثیر مهمی روی جمع آثار موج تشعشعی و بازتابی از دیواره حوضچه دارد به طوری که به نظر می‌رسد حجم سیال اطراف دیسک حین ارتعاش در حوضچه کوچک وادهوا با ابعاد $1 \times 1 \times 1\ m$ بیشتر بوده است. ضمنا افزایش افست منحنی‌های جرم افزوده و میرایی در نمونه نزدیک به سطح در مقایسه با نمونه دور از مرز نیز مشابه با نتایج وادهوا [۱۱] می‌باشد.

۵-۲ تأثیر فرکانس β روی ضرایب هیدرودینامیک FRD در فاصله نزدیک ثابت از مرزها

انتظار می‌رود که فرکانس تأثیر بیشتری روی رفتار هیدرودینامیکی نمونه نزدیک به سطح آزاد در مقایسه با نمونه‌های در عمق‌های بیشتر داشته باشد. از این رو اثر فرکانس تحریک با اعمال فرکانس-های مختلف $f = 1, 2, 3$ Hz روی ضرایب هیدرودینامیکی ورق‌ها در این بخش بررسی می‌گردد. این فرکانس‌ها متناظر با فرکانس-های بی بعد شده $\beta = 4 \times 10^4, 8 \times 10^4, 1.2 \times 10^5$ می-باشند. از منحنی شکل ۵ مشاهده می‌شود که روند تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی نسبت به فرکانس برای نمونه نزدیک سطح آزاد مشابهتی با دو نمونه دیگر در عمق‌های میانی و نزدیک به بستر کف ندارد.

در نمونه نزدیک به دیوار و نمونه در عمق میانی با افزایش فرکانس تحریک، ضریب میرایی (شکل ۵-ب، ج) و جرم افزوده (شکل ۵-و، ه) هر دو افزایش می‌یابند، هر چند که نرخ تغییرات میرایی در مقایسه با جرم افزوده بیشتر می‌باشد. این بدین مفهوم است که تغییرات ضرایب هیدرودینامیک بر حسب فرکانس قابل توجه می-باشد. این در حالی است که محققان [۸, ۱۹, ۲۰] با توجه به تست‌های انجام شده در مطالعاتشان نتیجه گرفتند که فرکانس تأثیر چندانی روی ضرایب نمی‌گذارد که البته نتیجه تحقیقاتشان بایستی با توجه به شرایط تست آن‌ها تعمیم داده شود. لازم به ذکر است این اختلاف نتیجه می‌تواند به چند دلیل مرتبط باشد.

۱- مقادیر فرکانس‌های تحریک در تحقیق کنونی نسبت به مقالات اشاره شده، بسیار بالاتر است که منجر به ضرایب Re و β بزرگ‌تری خواهد شد.

۲- مطالعات صورت گرفته [۸, ۱۹] برای ورق‌های مربعی انجام شده‌اند.

۳- همه این مطالعات با وجود اثرات سوراخ‌کاری روی ورق‌ها انجام گرفته است در حالی‌که مطالعه حاضر برای دیسک بدون سوراخ-کاری می‌باشد.

بر خلاف روند تغییرات معمول، یک استثنا برای منحنی جرم افزوده نزدیک به بستر کف وجود دارد که در آن شیب نمودارها با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد (شکل ۵-و). افزایش مقدار افست منحنی در فرکانس‌های بالاتر باعث شده هم‌چنان مقادیر جرم افزوده در فرکانس‌های بزرگ‌تر و دامنه‌های کوچک، بیشتر باشد اما با افزایش دامنه ارتعاشات با توجه به کاهش شیب در فرکانس‌های بالاتر این روند معکوس می‌گردد، به گونه‌ای که در نهایت فرکانس بیشتر، جرم افزوده کم‌تری را نتیجه می‌دهد. نکته قابل توجه این می‌باشد که نیروهای اعمالی از طرف سیال به دیسک متصل شده در انتهای پایین میله عمودی رزوه‌دار، باعث ارتعاشات جانبی در فرکانس‌های بالا می‌شود به طوری که این ارتعاشات در دامنه‌های بالا حین آزمایش قابل مشاهده است. این نکته می‌تواند عامل دیگری برای کاهش تعداد ذرات شتاب‌دار شده در راستای قائم گردد که در نهایت موجب کاهش جرم افزوده می‌گردد.

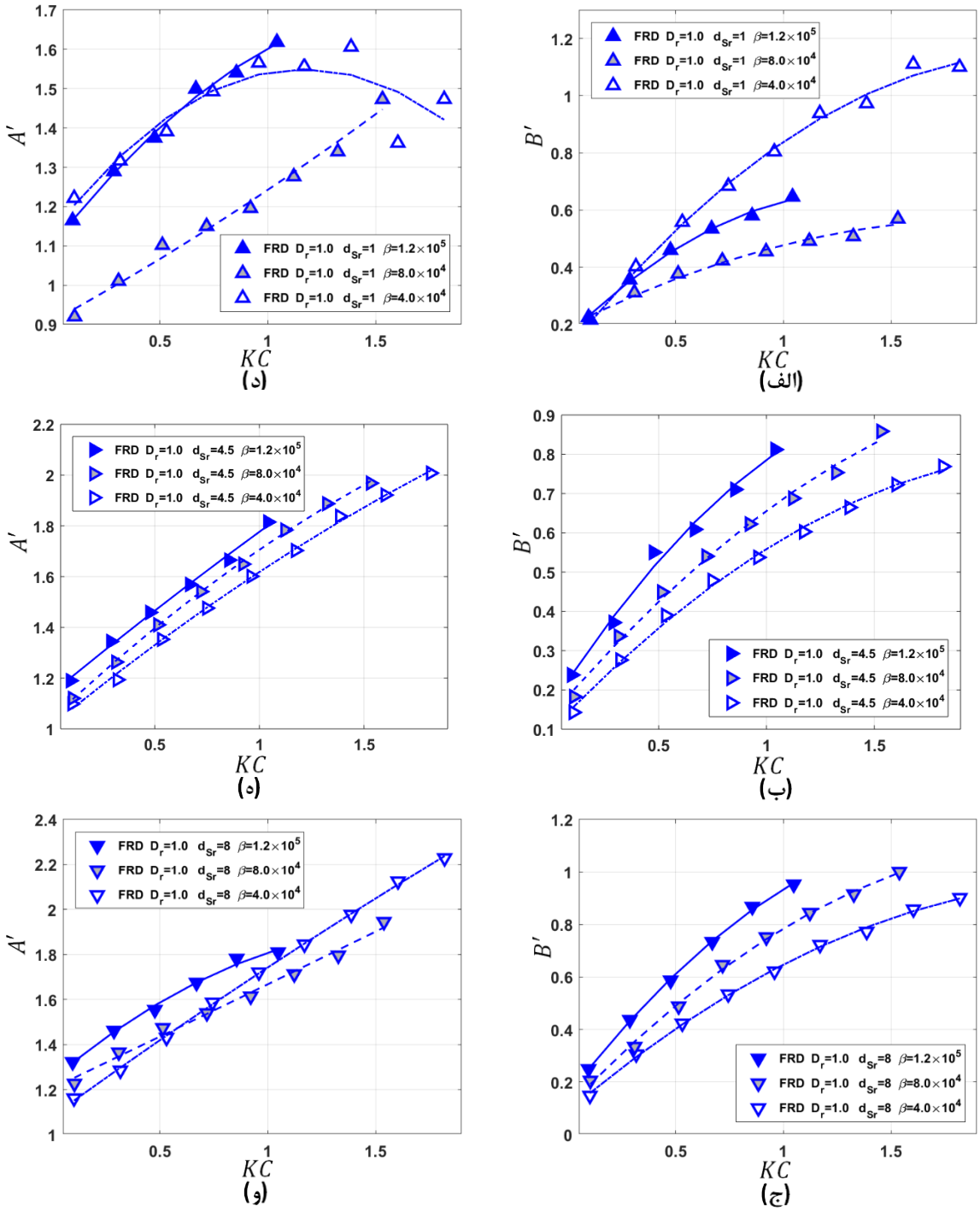
در نمونه نزدیک به سطح روند تغییرات کاملا متفاوت از دو عمق دیگر می‌باشد، به طوری که مینیمم مقادیر جرم افزوده و میرایی در $(f = 2\ Hz)$ و $\beta = 8 \times 10^4$ رخ می‌دهد. این کاهش می‌تواند به واسطه جمع آثار موج بازتاب شده از دیواره حوضچه با موج تشعشعی باشد (شکل ۵-الف ود).

با استفاده از پراب اندازه‌گیری دامنه موج[۱۱] که در فاصله ۰٫۵ متر از مرکز دیسک در جهت طولی تانک قرار گرفته است، می‌توان تاریخچه زمانی امواج تولید شده در سطح را در سه فرکانس مختلف بررسی کرد. در شکل ۶ تاریخچه زمانی مربوط به فرکانس‌های مختلف به وضوح مشاهده می‌شود، طوری که بیشترین دامنه امواج اندازه‌گیری شده اطراف دیسک به ترتیب برای فرکانس‌های ۲ و ۳ و ۱ هرتز می‌باشد.

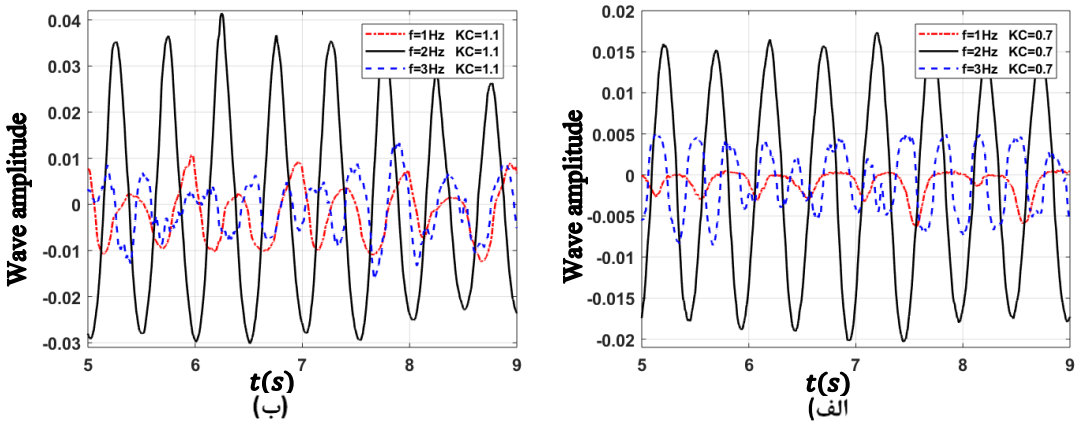
گرچه امواج دارای دامنه و فرکانس بزرگ‌تر میرایی تشعشعی بیشتری را نتیجه می‌دهند[۲۱]، اما در اینجا بیشینه میرایی کل که مجموع میرایی تشعشعی، شکلی و اصطکاکی است در فرکانس تحریکی رخ می‌دهد که دامنه موج تولیدی کم‌تر می‌باشد. وجود دامنه بیشتر و به دنبال آن نوسانات زیاد روی سطح آب، حجم آب اطراف دیسک را برای رشد ورتکس‌ها کم می‌کند. از آنجایی که میرایی شکلی در مقایسه با میرایی تشعشعی سهم بیشتری را در میرایی کل دارد، وجود نوسانات در سطح آب به شدت میرایی کل را کاهش می‌دهد. ذکر این نکته الزامی است که دامنه موج تولیدی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.10.9]



شکل ۵- تاثیر β روی ضرایب هیدرودینامیک دیسک FRD با d_{Sr} و D_r های مختلف.



شکل ۶- دامنه امواج تشعشعی سطح آزاد آب برای نمونه FRD با $d_{Sr} = 1$ الف) $KC = 0.7$، ب) $KC = 1.1$.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.10.9]

بستگی به شرایط تداخل امواج تولیدی و بازتاب شده از دیواره حوضچه دارد. فاصله ۰٫۵ متری مرکز دیسک از دیواره حوضچه شرایطی را بوجود آورده است که فرکانس تحریک ۱ هرتز کم‌ترین و فرکانس ۲ هرتز بیشترین دامنه امواج را نتیجه می‌دهد.

۵-۳ تأثیر عمق و فرکانس β روی ضرایب هیدرودینامیکی دیسک ترکیبی الاستیک-صلب

در این بخش ابتدا اثر استفاده از یک ورق الاستیک در بخش بیرونی ورق هیو در مقایسه با دیسک کاملا صلب مورد بررسی قرار می‌گیرد. بواسطه وجود لبه الاستیک، دامنه ارتعاشات لبه خارجی ورق الاستیک نسبت به دامنه تحریک اعمال شده در مرکز دیسک ترکیبی افزایش می‌یابد که این منجر به سرعت لبه بیشتر در مقایسه با ورق کاملا صلب می‌شود. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد این افزایش سرعت کاملا روی قدرت ورتکس‌های القایی از لبه‌ها موثر بوده و میرایی سیستم را افزایش می‌دهد. هر چه نسبت قطر بخش صلب به قطر الاستیک کم‌تر باشد، میزان سفتی معادل در لبه ورق کاهش بیشتری پیدا می‌کند. لذا تغییر شکل بزرگ‌تر، میرایی بیشتری را به دنبال دارد (-شکل ۷الف). این در حالی است که کاهش میرایی در KCهای پایین برای $D_r = 0.8,\ 0.6$ در مقایسه با $D_r = 1$، FRD، به علت ضخامت بیشتر ورق یورتان، 6 mm، نسبت به لبه نازک‌تر ورق استیل FRD، 2 mm، می‌باشد که منجر به پایین آمدن قدرت ورتکس‌ها می‌شود. در نهایت در دامنه‌های بالا اثرات مثبت افزایش تغییر شکل بر اثرات منفی ضخامت زیاد روی میرایی، غالب می‌شود و این باعث بیشتر شدن میرایی نمونه $D_r = 0.8, 0.6$ نسبت به نمونه $D_r = 1$ می‌گردد. از طرف دیگر، در نمونه‌های UCRED بخشی از انرژی ورودی به جای شتاب دادن ذرات، صرف تغییر شکل ورق الاستیکی شده است. لذا، حجم کم‌تری از ذرات سیال اطراف دیسک قادر به حرکت توده‌ای همراه دیسک می‌شوند. در نتیجه، جرم افزوده برای دیسک ترکیبی مقادیر کم‌تری نسبت به دیسک FRD دارد و این شدت کاهش جرم افزوده برای نمونه‌های باD_r کمتر به علت تغییر شکل بیشتر، مشهودتر است (شکل ۷-ب).

در مرحله دوم اثر تغییر عمق روی ضرایب هیدرودینامیک نمونه-های UCRED در فرکانس ثابت $\beta = 4 \times 10^4$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان طور که در شکل ۸ پیداست روند تغییرات رفتار هیدرودینامیکی تمام چیدمان‌های UCRED، $D_r = 0.8,\ 0.4$ و0.6، برای نسبت عمق‌های بی‌بعد مختلف، $d_{Sr} = 1, 4.5, 8$، تقریبا شبیه دیسک صلب، FRD، می‌باشد. دو استثنا در این زمینه وجود دارد که در مورد اول، $D_r = 0.4$ ، $d_{Sr} = 8$، جرم افزوده از همان مراحل ابتدایی افزایش دامنه ارتعاشات، به صورت تدریجی کاهش می‌یابد (شکل ۸-و). این پدیده ناشی از سفتی پایین دیسک ترکیبی UCRED است، به طوری که اثر افزایش میدان فشار سیال بلوک شده بین دیسک و دیواره به صورت تغییر شکل بیشتر ورق الاستیک نمود پیدا می‌کند. هندسه تغییر شکل یافته دیسک ترکیبی در این حالت نیز قادر به اعمال شتاب کافی به ذرات سیال اطراف خود نمی‌باشد، لذا جرم افزوده کاهش می‌یابد. در مورد دوم، $D_r = 0.8$، $d_{Sr} = 1$، بر خلاف دیسک کاملا صلب، با نزدیک شدن به سطح، شیب و افست منحنی جرم افزوده کاهش می‌یابد به طوری که در تمام KCهای مورد تست مقدار جرم افزوده دیسک نزدیک به سطح کم‌تر از دو نمونه دیگر با عمق‌های متفاوت می‌باشد (شکل ۸-د) و این ناشی از تغییر شکل لبه‌های ورق الاستیک حتی در دامنه‌های ارتعاشات کوچک می‌باشد.

وجود مقدار بحرانی KC در منحنی جرم افزوده، مشابه با دیسک کاملا صلب، می‌تواند ناشی از کاهش حجم آب بالای دیسک در دامنه‌های بالاتر باشد. البته تغییر شکل‌های بزرگ در دامنه‌های بالاتر نیز می‌تواند عاملی برای کاهش جرم افزوده باشد اما تأثیر آن از عامل ذکر شده قبلی به مراتب کم‌تر می‌باشد (شکل ۸-د،ه).

در مرحله سوم اثرات β روی ضرایب هیدرودینامیکی UCRED تحقیق می‌شود. فرکانس علاوه بر تأثیرگذاری روی سیال اطراف نمونه‌های نزدیک به سطح، به علت اثرات امواج تشعشعی و بازتابی، نقش مهمی در نوع مد تغییر شکل ورق الاستیک در دیسک ترکیبی نیز دارد.

نتایج برای نسبت قطرهای $D_r = 0.8,\ 0.6$ در شکل ۹ نمایش داده شده است. در $D_r = 0.4$ بواسطه تغییر شکل‌های زیاد، نیروهای عرضی بزرگی به مجموعه دیسک و میله رزوه‌دار اعمال شده که باعث ارتعاشات قابل توجه در جهت عرضی می‌شود. به همین علت، استناد به نتایج ضرایب هیدرودینامیکی بدست آمده که می‌بایست صرفا برای جهت قائم باشد جای تامل دارد. به همین دلیل نتایج مربوط به نمونه با $D_r = 0.4$ آورده نشده است. روند تغییرات میرایی هر دو نمونه UCRED با $D_r = 0.8, 0.6$ نزدیک به سطح آزاد تقریبا شبیه FRD می‌باشد. البته در فرکانس $\beta = 1.2 \times 10^5$در نمونه با $D_r = 0.6$ به دلیل تغییر شکل لبه ورق، میرایی بزرگ‌تری در مقایسه با $D_r = 0.8$ بدست می‌آید به طوری که در نهایت میرایی کل در تحریک ۳ هرتز به اندازه میرایی مربوط به فرکانس تحریک ۱ هرتز شده است (شکل ۹-الف، ج).

در موقعیت نزدیک به کف برای نمونه FRD، شکل ۵-ج، مقدار میرایی با افزایش فرکانس بیشتر می‌شود، همین روند در مورد منحنی‌های میرایی $D_r = 0.6$ نیز مشاهده می‌گردد (شکل ۹-د). در فرکانس‌های بالاتر به علت تغییر شکل بیشتر لبه، میرایی بیشتری در مقایسه با وضعیت مشابه در FRD بدست می‌آید. اما رفتار ضریب میرایی در $D_r = 0.8$ متفاوت می‌باشد به گونه‌ای که

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.10.9]

در فرکانس $\beta = 8 \times 10^4$، بیشترین مقدار میرایی مشاهده می‌شود (شکل ۹-ب). این اتفاق می‌تواند ناشی از تحریک شدن مدهای غیر متقارن محوری لبه ورق در فرکانس ۳ هرتز باشد که در این حالت چین‌خوردگی‌های لبه اجازه رشد منظم ورتکس‌ها را نمی‌دهد. در حالی که در فرکانس ۲ هرتز احتمالا تغییر شکل متقارن محوری لبه ورق، میرایی بزرگ‌تری را نتیجه می‌دهد. تحقیقات دقیق‌تر در این زمینه نیازمند استفاده از تکنولوژی piv است.

نمودار شکل ۹-ه نشان می‌دهد که تغییرات جرم افزوده بر حسب KC در موقعیت نزدیک به سطح برای نمونه $D_r = 0.8$ مشابهت زیادی با FRD (شکل ۵-د) دارد که به دلیل سهم کوچک بخش الاستیک نمونه می‌باشد. در حالی که جرم افزوده در نمونه $D_r = 0.6$، با سهم بزرگتر الاستیک، با افزایش دامنه ارتعاشات و افزایش فرکانس کمتر می‌شود (شکل ۹-ز). این کاهش به دلیل پایین بودن مقدار سفتی و تبدیل انرژی ورودی تحریک به تغییر شکل به جای حرکت دادن ذرات سیال می‌باشد. هنگامی که دیسک ترکیبی UCRED، به بستر کف نزدیک می‌گردد افزایش فرکانس بر خلاف دیسک FRD موجب کاهش جرم افزوده نمونه $D_r = 0.8, 0.6$ می‌شود. این به دلیل تغییر شکل بیشتر لبه الاستیک در فرکانس‌های بالاتر است (شکل ۹-و، ح).

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر پارامترهایی مانند نزدیکی به مرزها و فرکانس تحریک روی دیسک کاملا صلب و دیسک ترکیبی الاستیک-صلب به طور تجربی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج زیر از این تحقیق بدست می‌آید:

۱- در ورق هیو صلب، نزدیکی به مرز سطح آزاد یا بستر کف باعث افزایش شیب هر دو منحنی جرم افزوده و میرایی می‌گردد.

۲- تقریبا در نزدیک‌ترین فاصله قابل دستیابی به مرز، $d_{Sr} = 1$ و $d_{Sr} = 8$، با تجهیز مورد نظر در این مطالعه، مقدار بحرانی KC فقط برای منحنی جرم افزوده دیسک صلب نزدیک به سطح مشاهده شد.

۳- به طور کلی افزایش فرکانس موجب افزایش ضرایب هیدرودینامیکی ورق صلب می‌شود اما در نزدیکی سطح، روند متفاوتی وجود دارد به طوری که کم‌ترین میزان میرایی مربوط به نمونه با دامنه موج تولیدی بیشتر است.

۴- به طور کلی استفاده از یک دیسک ترکیبی الاستیک-صلب در مقایسه با دیسک کاملا صلب با قطر خارجی یکسان باعث افزایش میرایی و کاهش جرم افزوده می‌شود.

۵- در صورت تغییر شکل متقارن محوری، بیشترین میرایی و کم‌ترین جرم افزوده در چیدمان‌های مختلف دیسک الاستیک-صلب برای نمونه با کوچک‌ترین D_r، کمترین سفتی روی لبه، رخ می‌دهد.

۶- روند تغییرات ضرایب هیدرودینامیک نزدیک به مرزها برای دیسک ترکیبی با D_r نزدیک به ۱ مشابه ورق کاملا صلب می‌باشد که ناشی از تغییر شکل‌های کوچک لبه ورق الاستیک می‌باشد.

۷- دیسک ترکیبی با D_r کوچک به واسطه سفتی پایین، فرکانس طبیعی کم‌تری دارد. در فرکانس‌های بالاتر چین‌خوردگی روی لبه بوجود می‌آید که مانع از رشد منظم ورتکس‌ها می‌شود. این منجر به کاهش میرایی در فرکانس‌های بالا می‌گردد.

۸- جرم افزوده دیسک ترکیبی با D_r کوچک در فرکانس‌های بالا می‌تواند روند نزولی با افزایش دامنه ارتعاشاتی داشته باشد که این پدیده در موقعیت نزدیک به کف بسیار مشهود می‌باشد.

۷- تشکر و قدردانی

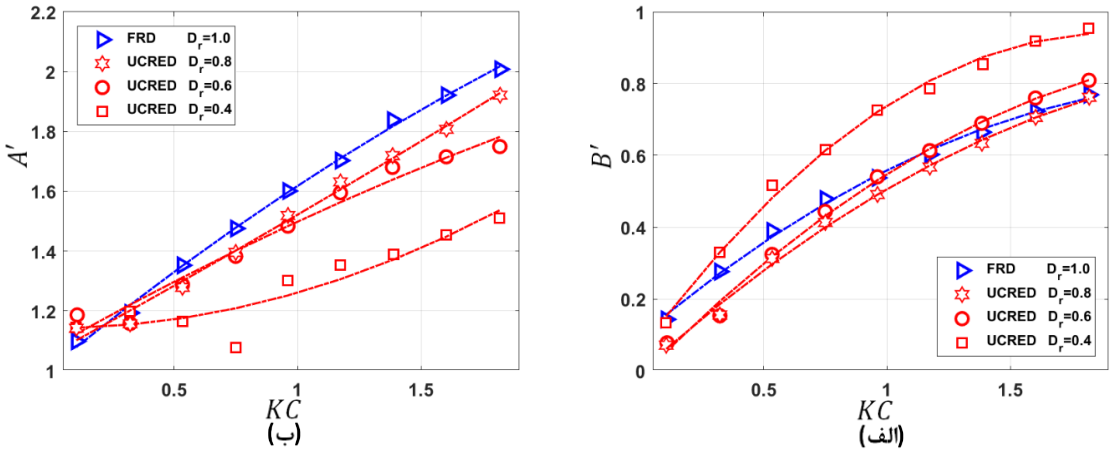
تست‌ها در ساختمان کرازبی دانشکده مکانیک دانشگاه مین آمریکا انجام شد که نویسندگان از حمایت دانشگاه مین و استاد میزبان آقای پروفسور کریش تیاگاراجان[۱۲] و مدیر دپارتمان کرازبی آقای مهندس استفان اَبِدِسا[۱۳] قدردانی می‌کنند.

کلید واژگان

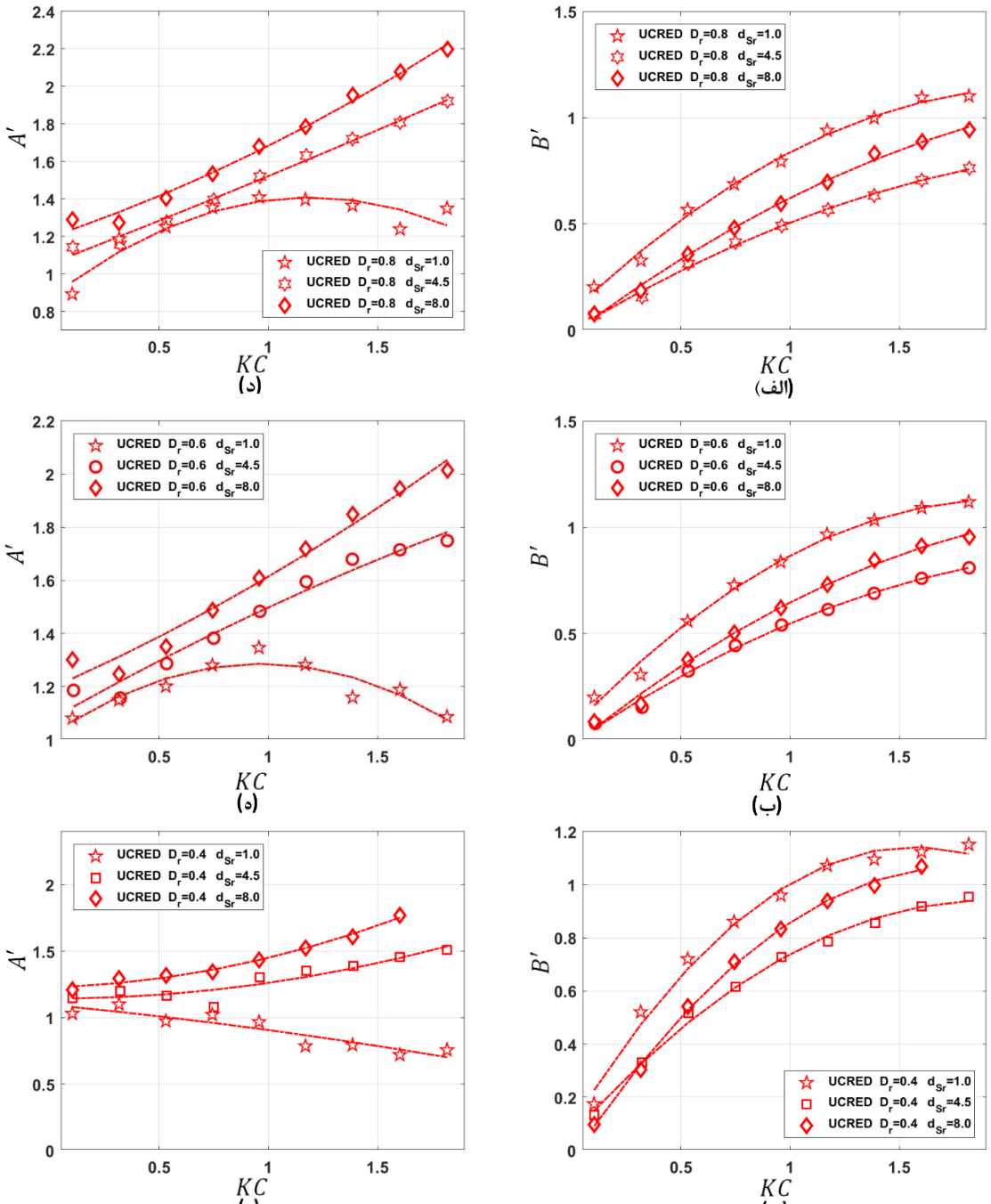
1- Tension leg platform
2- Spar platform
3- Marine Ocean and Offshore Research (MOOR) laboratory at University of Maine
4- LabVIEW
5- Central derivative
6- Butterworth low Pass filter
7- Least square method
8- Fully rigid disk
9- Urethane
10- Urethane composite rigid elastic design
11- Wave probe
12- Krish Thiagarajan
13- Stephen Abbadessa

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.10.9]



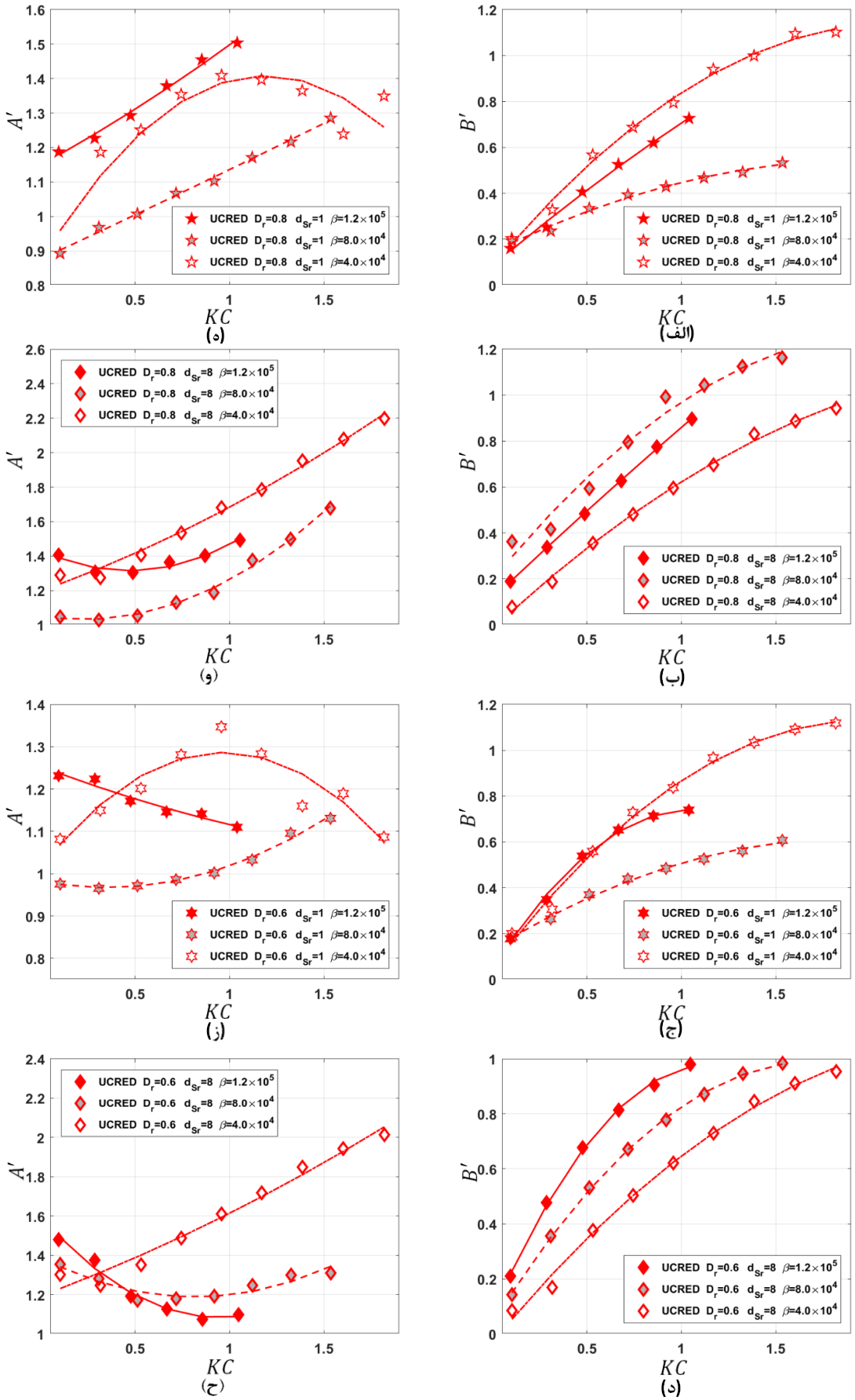
شکل ۷- ضرایب هیدرودینامیک دیسک صلب FRD و دیسک UCRED با D_r مختلف در $d_{Sr} = 4.5$ و $\beta = 4 \times 10^4$.



شکل ۸- تأثیر d_{Sr} روی ضرایب هیدرودینامیک دیسک ترکیبی UCRED با مقادیر مختلف D_r در فرکانس ثابت $\beta = 4 \times 10^4$.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.10.9]



شکل ۹- تأثیر β روی ضرایب هیدرودینامیک دیسک ترکیبی UCRED با D_r های مختلف در موقعیت نزدیک به سطح و کف.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.10.9]

۸- مراجع

1. Thiagarajan, K. and A.W. Troesch, *Effects of appendages and small currents on the hydrodynamic heave damping of TLP columns.* Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1998. 120(1): p. 37-42.
2. Thiagarajan, K. and A. Troesch, *Hydrodynamic heave damping estimation and scaling for tension leg platforms.* Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1994. 116(2): p. 70-76.
3. Tao, L. and S. Cai, *Heave motion suppression of a Spar with a heave plate.* Ocean Engineering, 2004. 31(5): p. 6.692-69.
4. Zhu, L. and H.-C. Lim, *Hydrodynamic characteristics of a separated heave plate mounted at a vertical circular cylinder.* Ocean Engineering, 2017. 131: p. 213-223.
5. Tao, L., et al., *Spacing effects on hydrodynamics of heave plates on offshore structures.* Journal of Fluids and structures, 2007. 23(8): p. 1119-1136.
6. Sudhakar, S. and S. Nallayarasu, *Hydrodynamic Response of Spar with Single and Double Heave Plates in Regular Waves.* International Journal of Ocean System Engineering, 2013. 3:(4)p. 188-208.
7. Philip, N.T., S. Nallayarasu, and S. Bhattacharyya, *Experimental investigation and CFD simulation of heave damping effects due to circular plates attached to spar hull.* Ships and Offshore Structures, 2013: p. 1-17.
8. Li, J., et al., *Experimental investigation of the hydrodynamic characteristics of heave plates using forced oscillation.* Ocean Engineering, 2013. 66: p. 82-91.
9. Lopez-Pavon, C. and A. Souto-Iglesias, *Hydrodynamic coefficients and pressure loads on heave plates for semi-submersible floating offshore wind turbines: A comparative analysis using large scale models.* Renewable Energy, 2015. 81: p. 864-881.
10. Wadhwa, H., B. Krishnamoorthy, and K.P. Thiagarajan. *Variation of heave added mass and damping near seabed*. in *ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. 2010. American Society of Mechanical Engineers.
11. Wadhwa, H. and K.P. Thiagarajan. *Experimental assessment of hydrodynamic coefficients of disks oscillating near a free surface*. in *ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. 2009. American Society of Mechanical Engineers.
12. Garrido-Mendoza, C.A., et al., *Computation of flow features and hydrodynamic coefficients around heave plates oscillating near a seabed.* Journal of Fluids and Structures, 2015. 59: p. 406-431.
13. Amabili, M., G. Dalpiaz, and C. Santolini. *Free Vibration of a Free-edge Circular Plates Immersed in Water*. in *PROCEEDINGS-SPIE THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING* .1994 .SPIE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL.
14. Kwak, M. and M. Amabili, *Hydroelastic vibration of free-edge annular plates.* Journal of vibration and acoustics, 1999. 121(1): p. 26-32.
15. Hengstler, J. and J. Dual, *Fluid structure interaction of a vibrating circular plate in a bounded fluid volume: simulation and experiment.* Fluid Structure Interaction VI, 2011. 115: p. 3.
16. Askari, E., K.-H. Jeong, and M. Amabili, *Hydroelastic vibration of circular plates immersed in a liquid-filled container with free surface.* Journal of sound and vibration, 2013. 332(12): p. 3064-3085.
17. Escaler, X. and O. De La Torre, *Axisymmetric vibrations of a circular Chladni plate in air and fully submerged in water.* Journal of Fluids and Structures, 2018. 82: p. 432-445.
18. Moreno, J., et al. *Hydrodynamic Performance of Heave Plates on Floating Offshore Wind Turbine Platforms*. in *The Twenty-fifth International Offshore and Polar Engineering Conference*. 2015. International Society of Offshore and Polar Engineers.
19. An ,S. and O.M. Faltinsen, *An experimental and numerical study of heave added mass and damping of horizontally submerged and perforated rectangular plates.* Journal of Fluids and Structures, 2013. 39: p. 87-101.
20. Tao, L. and D. Dray, *Hydrodynamic performance of solid and porous heave plates.* Ocean Engineering, 2008. 35(10): p. 1006-1014.
21. Dean, R.G. and R.A. Dalrymple, *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Vol. 2. 1991: World Scientific Publishing Company.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.10.9]