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

چکیدہ	اطلاعات مقاله
ارتعاشات سازههای شناور تحت نیروهای محیطی با نصب ورقهای هیو در انتهای ۱۳۹۷/۰۸/۱ میتواند کاهش یابد. فرکانس و نزدیکی به مرزها پارامترهای مهمی هستند که هیدرودینامیکی ورقها در این تحقیق به صورت تجربی بررسی میشود. از طرفی ت تا کنون استفاده شدهاند، کاملا میلیدم براشند. مدیر است تحقیقات منتشد شده م	<i>تاریخچه مقاله:</i> تاریخ دریافت مقاله: ۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۵
طور همزمان با افزایش دامنه، نامر صبب می بست و بر اساس تحقیقات منتشر شناه م طور همزمان با افزایش دامنه، بزرگ میشوند. پیش بینی میشود که استفاده از یک و الاستیک در لبه بیرونی دیسک، امکان کارایی بهتر میرایی را در مقایسه با جرم این خصوصیات دینامیکی موجب پاسخگویی بهتر سازه در شرایط خاص بارگذاری	<i>کلمات کلیدی:</i> ورق هیو ضرایب هیدرودینامیکی
های انجام شده تحت تحریک اجباری هارمونیک در فرکانسها و عمقهای مخن نشان میدهد که افزایش فرکانس موجب کاهش ضرایب هیدرودینامیکی در نز ضرایب مربوطه در مجاورت بستر کف میشود. از طرفی، فرکانس تأثیر قابل	نزدیکی به مرزها فرکانس دیسک الاستیک-صلب
هیدرودینامیکی دیسک ترکیبی با سهم الاستیک بزرگتر خواهد داشت. میزان این ت 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 Abazari¹, 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.

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^۱ و اسپار^۲ و.. را ناگزیر کرده است. یکی از چالشهای فعالیت در چنین مکانهایی، امکان وقوع ارتعاشات زیاد سکوها تحت شرایط محیطی سخت میباشد.

یکی از روش ها برای کنترل و پایداری چنین سازه هایی، استفاده از ورق های به اندازه کافی صلب و با ضخامت کم در انتهای پایین ستون های آنها میباشد. ابعاد این ورق در مقایسه با ابعاد و قطر ستون ها بزرگتر است به طوری که با حرکت سکو به بالا و پایین از لبه تیز این ورق ها ورتکس هایی القا میشود که وابسته به اندازه آن-ها میزان میرایی کل سیستم افزایش می ابد. علاوه بر این، به علت ما میزان میرایی کل سیستم افزایش می ابد. علاوه بر این، به علت افزایش می ابد. این موضوع به مهندس طراح اجازه می دهد با افزایش می ابعاد این ورق ها جرم معادل کل سیستم افزایش می 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 بی بعد β و N می باشند که به صورت رابطه (۱) تعریف می شوند

$$KC = \frac{2\pi A}{D}, \quad \beta = \frac{D^2 f}{\vartheta},$$
 (1)

به طوری که A دامنه ارتعاشات، D قطر دیسک، f فرکانس ارتعاشات وG ویسکوزیته سینماتیکی میباشد. از ایان رو، تحقیقات گوناگونی روی ضرایب هیدرودینامیک ورق ها صورت گرفته است. آزمایش های 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 قطر ورق هیو، عاملی تأثیر گذارتر 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 ورق های 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 کنندها 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, ۱۰] 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 بحر* مشراهاده 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 خاطر وابستگی امواج تشعشعی به فرکانس تحریک از اهمیت بیشتر می گیرد.

استفاده از ورق هیو صلب در سکوها هر دو پارامتر میرایی و جرم افزوده را افزایش می دهد 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 می آورد که این نکته امکان تغییر شالای جرم افزوده هنگام افزایش دامنه ارتعاشات ممانعت می کند. از طرفی بواسطه دامنه ارتعاشات بیشتر فراهم می-مود. لازم به ذکر است که تحقیقاتی در زمینه بررسی ویژگیهای دینامیکی ورقهای فلزی الاستیک انجام پذیرفته است.

امابیلی و همکاران [۱۴, ۱۳] 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.

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 انعطاف پذیر با قابلیت تغییر شکل بزرگ، طرح ترکیبی صلب الاستیک مورد مطالعه قرار می گیرد. به طور خاص، اثرات نزدیکی به مرزها و فرکانس روی ضرایب هیدرودینامیکی چنین ورقهایی با تحریک هارمونیک اجباری در دامنههای مختلف بررسی می شود.

۲-تجهیزات و سامانه آزمایش

تستها در تانک تحقیقاتی دانشگاه مین آمریکا^۳ با طول، ارتفاع و پهنای به ترتیب ۱۹۱۸ متر انجام شده است. تانک هنگام تستها تا ارتفاع ۹٫۹ متر پر شد، برای این که امواج تشعشعی احتمالی قابلیت مانور در سطح آزاد آب تانک را داشته باشند. یک موتور الکتریکی پارکر از نوع ۱۵۹ BE341F 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 اندازه گیری می شود که بین اکچویتور و دیسک قرار گرفته است. سنسورها از نوع 37.5 kg LCPW می باشند (شکل ۱–الف و ب). یک جابجایی سنج از نوع پتانسیومتر سیمی که براساس اختلاف پتانسیل کار می کند وظیفه اندازه گیری موقعیت دیسک در راستای قائم را برعهده دارد (شکل ۱–ج). تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال و داده برداری از طریق کارت 9205 NI و نرم افزار لبویو

۳-فرآيند تحليل نتايج

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 $(t)_{buoy}$ ، نیروهای هیدرودینامیکی وارد از طرف سیال به جسم $F_{buoy}(t)$ 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 اندازه گیری شده توسط سنسورهای نیرو را به دیگر پارامترها به صورت منطقی ارتباط میدهد.

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

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 مرکزی⁴ با نرم افزار متلب انجام میگیرد. فیلتراسیون سیگنالها به روش فیلتر پایین گذر باترورث⁹ میباشد. مقدار تجربی سیگنالها به روش فیلتر پایین گذر باترورث میباشد. مقدار توربی

رابطه (۲) برابر قرار داده می شود که مجهولات رابط ه بدست آمده، ضرایب جرم افزوده m_a و میرایی B می باشند که با استفاده از روش حداقل مربعات^۷ با کمینه کردن خطا بین سیگنال تئوری و آزمایش بدست می آیند [۸]. این ضرایب در هر سیکل به طور جداگانه محاسبه می شوند و در نهایت متوسط ضرایب کل سیکل ها به عنوان ضرایب هیدرودینامیکی مشخص می شود. برای محاسبه دقیق تر، میرایی هنگام وقوع پیک سرعت و جرم افزوده هنگام وقوع پیک شتاب محاسبه می شود [۱۸]. برای یک مقایسه مناسب بین دیسک-های با اندازه های مختلف، جرم افزوده و ضریب میرایی به صورت رابطه (۳) بی بعد می شوند.

$$A' = \frac{m_a}{m_{ath}}, \quad B' = \frac{B}{2m_{ath}\omega} \tag{(7)}$$

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

۴- جزئیات مدل تست

در مطالعه حال حاضر دو سری تست انجام می شود. در سری اول اثرات شرایط مرزی سطح آزاد و بستر کف روی دیسک کاملا صلب (FRD^۸) بررسی می شود. در سری دوم تستها، اثر شرایط مرزی روی دیسک ترکیبی شامل بخش مرکزی فولادی صلب و بخش بيروني پليمري الاستيك تحقيق مي شود (شكل ٢). ماده الاستيك یورتان^۹ میباشد و برای ساده نویسی دیسک ترکیبی صلب الاستیک یورتان، D_r نامیده می شود. نسبت قطر D_r برای UCRED حاصل تقسيم قطر بخش صلب به قطر الاستيك مى-باشد که مقدار کمتر آن به مفهوم سفتی کمتر لبه دیسک است. را می توان همان دیسک کاملا صلب در نظر گرفت. از $D_r = 1$ شکل ۱-الف و شکل ۳ واضح است که فاصله دیسک از سطح آزاد میباشد که با تغییر آن تأثیر شرایط مرزی روی ضرایب ds هیدرودینامیک دیسک بررسی می گردد. 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 می شود.



شکل ۲- چیدمان های مختلف دیسک الاستیک-صلب و کاملا صلب



شکل ۳- موقعیت UCRED در عمق های 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 UCRED در عمقهای مختلف $J_{sr} = d_{sr}$ ایر عمقهای مختلف 1,4.5,8 ضرایب هیدرودینامیکی بدست آورده شود.

ا تأثیر نزدیکی به مرزها روی ضرایب هیدرودینامیک دیسک FRD در eta ثابت FRD

اندازه عمق مغروق دیسکها، ۹,۱ و ۹,۸ متر، بر اساس ناحیه پیشنهادی در تحقیقات وادهوا و همکاران [۱۱, 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 $f_{Sr} = 1$ ، نزدیک به سطح آزاد، و میرایی مینیمم در $d_{Sr} = 4.5$ ، عمق میانه حوضچه، اتفاق میافتد. در تمام محدوده KCهای مورد آزمایش، $d_{Sr} = 8$ نسبت به نمونه با $d_{Sr} = 1$ بیشتر میباشد. مقدار افست در منحنی میرایی بر حسبKC مربوط به میرایی اصطکاکی میباشد [1].

نوع دیسک	قطر (D_R)و ضخامت (h) و	قطر (D _E)و ضخامت ورق(h)	$D_{rr} = \frac{D_R}{D_{rr}}$	KC	$d_{S_n} = \frac{d_S}{d_S}$	فر کانس
	دیسک صلب	الاستيك و مدول <i>E</i>	' D _E		H_W	f(Hz)
صلب	0.2m & 2mm		1	0.1-1.8	1,4.5,8	1,2,3Hz
تركيبي الاستيك-صلب	0.16, 0.12, 0.08m & 2mm	$\begin{array}{c} 0.2m\& 6mm \& \text{Red} \\ E \cong 0.33 \text{ Mpa} \end{array}$	0.8,0.6,0.	0.1-1.8	1,4.5,8	1,2,3Hz

جدول ۱- ماتریس تست نمونههای FRD و UCRED

محاسباتی [۱۲]، نمی تواند دقیقا فاصله بحرانی را پیش بینی کند. برای مقادیر کم تر از این فاصله، افت ناگهانی در منحنی های هیدرودینامیکی مشاهده می شود. به عنوان نمونه در تحلیل عددی برای $1 = d_{Sr} = d$ وجود یک پیک بحرانی طبق مطالعه مندوزا [۱۲] کاملا مشهود است در حالی که در تحقیق حاضر برای $1 = d_{Sr}$ تغییرات افت شدید در منحنی های هیدرودینامیکی مشاهده نمی-گردد.

در نمونه نزدیک به سطح، $1 = d_{Sr}$ ، 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 می-شود. اما با نزدیکی KC به مقدار بحرانی، حجم آب موجود در بالای دیسک و نزدیک به سطح کاهش می اید. به طوری که علی-رغم اعمال انرژی ورودی کافی از دیسک به سیال، حجم ذرات کمتری اطراف دیسک برای شتابدار شدن وجود دارد. لذا افزایش

میرایی برای نمونه نزدیک بر الروت را شار عوامت 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 می باشد (شکل ۴-الف).

> FRD $D_r = 1.0 d_{Sr} = 1.0$ FRD $D_r = 1.0 d_{Sr} = 4.5$

FRD D_=1.0 d_==8.0

0.5

1 KC (ب)

2.4

2.2

2

×1.8

1.6

1.4

1.2

این در حالی است که بیشترین مقدار ضریب جرم افزوده برای نمونه 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 \mathfrak{L} ۰ دارا میباشند (شکل ۴–ب).

به طور کلی روند تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی بر حسب KC در اينجا مشابه با تحقيقات قبلي مي باشد. مثلا روند افزايشي 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 می شود. 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 منحنى جرم افزوده ديسک نزديک به سطح در مقايسه 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 می سد تحلیل عددی از نوع دینامیک سیالات



. $meta=4 imes 10^4$ روی ضرایب هیدرودینامیک دیسک FRD در فرکانس تحریک ثابت d_{Sr} .

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.

على رغم مشابهت اندازه ديسک و فرکانس ارتعاشات در مطالعه پيشرو و وادهوا [11]، کاهش شديد مقادير ميرايى در تحقيق وداهوا که بعد از مقدار بحرانى KC رخ مى دهد مى تواند به علت ابعاد کوچک حوضچه مورد آزمايش باشد. اين ابعاد تأثير مهمى روى جمع آثار موج تشعشعى و بازتابى از ديواره حوضچه دارد به طورى که به نظر مى رسد حجم سيال اطراف ديسک حين ارتعاش در حوضچه کوچک وادهوا با ابعاد $m 1 \times 1 \times 1$ بيشتر بوده است. ضمنا افزايش افست منحنى هاى جرم افزوده و ميرايى در نمونه نزديک به سطح در مقايسه با نمونه دور از مرز نيز مشابه با نتايج وادهوا [11] مى باشد.

4-۵ 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 می گردد. این فرکانسها متناظر با فرکانس-های بی بعد شده $10^5 \times 10^4, 10 \times 8, 10^4 \times 4 = \beta$ می-باشند. از منحنی شکل ۵ مشاهده می شود که روند تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی نسبت به فرکانس برای نمونه نزدیک سطح آزاد مشابهتی با دو نمونه دی گر 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 تاشیر چندانی روی ضرایب نمی گذارد 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
 ۱ اشاره شده، بسیار بالاتر است که منجر به ضرایب Re و β
 ۲ بزرگتری خواهد شد.

- ۲- مطالعات صورت گرفتـه [۸, ۱۹] بـرای ورقهـای مربعـی انجـام شدهاند.
- ۳- همه این مطالعات با وجود اثرات سوراخ کاری روی ورقها انجام
 گرفته است در حالی که مطالعه حاضر برای دیسک بدون سوراخ کاری می باشد.

بر خلاف روند تغییرات معمول، یک استثنا برای منحنی جرم افزوده نزدیک به بستر کف وجود دارد که در آن شیب نمودارها با افـزایش فرکانس کاهش مییابد (شکل ۵–و). افزایش مقـدار افست منحنی در فرکانسهای بالاتر باعث شده همچنان مقادیر جـرم افـزوده در فرکانسهای بزرگتر و دامنههای کوچک، بیشتر باشد اما با افـزایش دامنه ارتعاشات با توجه به کاهش شیب در فرکانسهای بالاتر ایـن روند معکوس میگردد، به گونهای کـه در نهایـت فرکانس بیشتر، جرم افزوده کمتری را نتیجه میدهد. نکته قابل توجه این میباشـد پایین میله عمودی رزوهدار، باعث ارتعاشات جانبی در فرکانسهـای پایین میله عمودی رزوهدار، باعث ارتعاشات جانبی در فرکانسهـای بالا میشود به طوری که ایـن ارتعاشات در دامنـههـای بالا حـین آزمایش قابل مشاهده است. این نکته میتواند عامـل دیگـری بـرای کاهش تعداد ذرات شتابدار شـده در راسـتای قـائم گـردد کـه در

در نمونه نزدیک به سطح روند تغییرات کاملا متفاوت از دو عمق دیگر میباشد، به طوری که مینیمم مقادیر جرم افزوده و میرایی در $(f = 2 Hz) e^{4} \int e^{4} dt = \beta$ 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 اندازه گیری دامنه موج^{۱۱} که در فاصله ۵,۰ 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 اندازه گیری 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 می دهند [۲۱]، اما در اینجا بیشینه میرایی کل که مجموع میرایی تشعشعی، شکلی و اصطکاکی است در فرکانس تحریکی رخ می دهد 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 می کند. 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 می دهد. ذکر این نکته الزامی است که دامنه موج تولیدی





بستگی به شرایط تداخل امواج تولیدی و بازتاب شده از دیواره حوضچه دارد. فاصله ۵,۰ 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 مى گيرد. بواسطه وجود لبه الاستيك، دامنه ارتعاشات لبه خارجي 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 می شود. همان طور که پیش بینی می شد 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 كاهش بیشتری پیدا میكند. لذا تغییر شكل بزرگتر، میرایی بیشتری را به دنبال دارد (-شکل ۷الف). این در حالی است که کاهش میرایـی در KCهـای پـایین بـرای 0.6 ر 6 مقایسه با FRD ، $D_r = 1$ ، به علت ضخامت بیشتر ورق یورتان، mm، نسبت به لبه نازكتر ورق استيل 2 mm ، RD، مريباشد که منجر به پایین آمدن قدرت ورتکس ها می شود. در نهایت در دامنههای بالا اثرات مثبت افزایش تغییر شکل بر اثرات منفی ضخامت زیاد روی میرایی، غالب می شود و این باعث بیشتر شدن می گـردد. $D_r = 1$ می گـردد. $D_r = 0.8, 0.6$ از طرف دیگر، در نمونههای UCRED بخشی از انـرژی ورودی بـه جاى شتاب دادن ذرات، صرف تغيير شكل ورق الاستيكي 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 با D_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 $10^4 \times 4 = \beta$ مورد بررسی قـرار می گیرد. همان طور که در شکل ۸ پیداست روند تغییرات رفتار $D_r = 0.8$, UCRED ، پیداست موند تغییرات رفتار 0.4 و 0.6، بـرای نسبت عمـقهای بـیبعـد مختلـف، $r = d_{Sr}$ این زمینه وجود دارد کـه در مـورد اول، FRD، میباشد. دو استثنا در $d_{Sr} = 8 \cdot D_r = 0.4$ ، میباشد. دو استثنا در جرم افزوده از همان مراحل ابتـدایی افـزایش دامنـه ارتعاشـات، بـه صورت تدریجی کاهش مییابد (شـکل ۸-و). ایـن پدیـده ناشـی 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 نمی باشد، لذا جرم افزوده کاهش می یابد. در مورد دوم، $D_r = 0.8$ r = 7.0, I = - c افزوده کاهش می یابد. در مورد دوم، $D_r = 0.8$ است منحنی کاهش می یابد. در مورد دوم، افزود نمی باشد، لذا جرم افزوده تست مقدار جرم افزوده دیسک نزدیک به سطح کم تر از دو نمونه دیگر با عمقهای متفاوت می باشد (شکل ۸-د) و این ناشی از تغییر شکل لبههای ورق الاستیک حتی در دامنههای ارتعاشات کوچک می باشد.

وجود مقدار بحرانی KC در منحنی جرم افزوده، مشابه با دیسک کاملا صلب، می تواند ناشی از کاهش حجم آب بالای دیسک در دامنههای بالاتر باشد. البته تغییر شکلهای بزرگ در دامنههای بالاتر نیز می تواند 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 تأثیر گذاری 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 می شود. به همین علت، استناد به نتایج ضرایب هیدرودینامیکی بدست آمده که می بایست 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 Dr = 0.4 آورده نشده است. روند په سطح آزاد تقریبا شبیه CRED می باشد. البته در فرکانس = β به سطح آزاد تقریبا شبیه CRED می باشد. البت در فرکانس = $10^5 \times 10^5$ به مطح آزاد تقریبا شبیه Dr = 0.8 می باشد. البت مدر فرکانس = β به میرایی بزرگتری در مقایسه با $D_r = 0.8$ هرتز به اندازه میرایی مربوط میرایی بزرگانس تریک در مقایسه با در ای می باند ازه میرایی مربوط به فرکانس تحریک ۱ هرتز شده است (شکل ۹-الف، ج).

به تر تعین تعریف ۲ متر تر سنه است (سنل ۲ ایک ج). در موقعیت نزدیک به کف برای نمونه FRD، شکل ۵–ج، مقدار میرایی با افزایش فرکانس بیشتر می شود، همین روند در مورد منحنیهای میرایی $D_r = 0.6$ نیز مشاهده می گردد (شکل ۹–د). در فرکانس های بالاتر به علت تغییر شکل بیشتر لبه، میرایی بیشتری در مقایسه با وضعیت مشابه در FRD بدست می آید. اما رفتار ضریب میرایی در $D_r = 0.8$ متفاوت می باشد به گونهای که

در فرکانس $10^4 \times 8 = \beta$ ، بیشترین مقدار میرایی مشاهده می-شود (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 نمی-دهد. در حالی که در فرکانس ۲ هرتز احتمالا تغییر شکل متقارن محوری لبه ورق، میرایی بزرگتری را نتیجه میدهد. تحقیقات

دقیق تر در این زمینه نیازمند استفاده از تکنولوژی piv است. نمودار شکل ۹–ه نشان می دهد که تغییرات جرم افزوده بر حسب KC مرموقعیت نزدیک به سطح برای نمونه 8.0 = D_r مشابهت زیادی با FRD (شکل ۵–د) دارد که به دلیل سهم کوچک بخش الاستیک نمونه می باشد. در حالی که جرم افزوده در نمونه = D_r مقدار سهم بزرگتر الاستیک، با افزایش دامنه ارتعاشات و افزایش فرکانس کمتر می شود (شکل ۹–ز). این کاهش به دلیل پایین بودن مقدار سفتی و تبدیل انرژی ورودی تحریک به تغییر شکل به جای مقدار سفتی و تبدیل انرژی ورودی تحریک به تغییر شکل به جای مقدار سفتی و تبدیل انرژی ورودی تحریک به تغییر شکل به جای مقدار سفتی و تبدیل انرژی ورودی تحریک به تغییر شکل به جای مقدار سفتی و تبدیل انرژی ورودی تحریک به تغییر شکل به جای مقدار سفتی و تبدیل انرژی ورودی تحریک به تغییر شکل به جای مقدار سفتی و تبدیل انرژی ورودی تحریک به تغییر شکل به جای مقدار این به دلیل تغییر شکل بیشتر لبه الاستیک در فرکانس-های 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 می گردد.
- تقریبا در نزدیکترین فاصله قابل دستیابی به مرز، $d_{Sr} = 1$ و $d_{Sr} = 8$ ، با تجهیز مورد نظر در این مطالعه، مقدار بحرانی $d_{Sr} = 8$ فقط برای منحنی جرم افزوده دیسک صلب نزدیک به KC سطح مشاهده شد.
- ۳- به طور کلی افزایش فرکانس موجب افزایش ضرایب هیدرودینامیکی ورق صلب می شود اما در نزدیکی سطح، روند متفاوتی وجود دارد به طوری که کم ترین 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 می شود.

- ۵- در صورت تغییر شکل متقارن محوری، بیشترین میرایی و که-ترین جرم افزوده در چیدمانهای مختلف دیسک الاسـتیک-صلب برای نمونه با کوچکترین ،D_r کمترین سفتی روی لبـه، رخ میدهد.
- ۶- روند تغییرات ضرایب هیدرودینامیک نزدیک به مرزها برای
 دیسک ترکیبی با *D_r* نزدیک به ۱ مشابه ورق کاملا صلب می باشد که ناشی از تغییر شکلهای کوچک لبه ورق الاستیک
 میباشد.
- ۲- 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.

کليد 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







. $eta=4 imes 10^4$ شکل ۸- تأثیر D_r روی ضرایب هیدرودینامیک دیسک ترکیبی UCRED با مقادیر مختلف D_r در فرکانس ثابت $10^4 imes 10^4$

۴٨



شکل ۹- تأثیر $m{eta}$ روی ضرایب هیدرودینامیک دیسک ترکیبی UCRED با D_r های مختلف در موقعیت نزدیک به سطح و کف.

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.

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.