مروری بر مطالعات انجام شده روی ضرایب جرم افزوده و میرایی ورق‌های هیو سکوهای شناور در ارتعاشات انتقالی و زاویه‌ای

ابوذر اباذری[۱*]، مهدی بهزاد[۲]

[۱] استادیار، هیئت علمی دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار ، abuzarabazari@cmu.ac.ir
[۲] استاد، هیئت علمی دانشگاه صنعتی شریف، m_behzad@sharif.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۰۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۲۳

کلمات کلیدی:
ورق هیو
فرکانس و دامنه
انتقالی و زاویه‌ای
جرم افزوده و میرایی
آزمایشگاهی و عددی

چکیده

کاربرد سکوهای شناور در آبهای عمیق اقیانوس‌ها برای برداشت سوخت‌های فسیلی و استحصال انرژی‌های نو روز به روز در حال گسترش است. در چنین مکان‌هایی نیروهای اعمالی محیطی باد و موج دریا به سکوها باعث ناپایداری و ارتعاشات آنها در جهت‌های مختلف می‌شود. یکی از بهینه‌ترین راه‌ها برای کاهش ارتعاشات، نصب یک ورق با نسبت ضخامت به قطر کم در پاشنه ستون‌های سکو است. بواسطه وجود ورق هیو، جرم افزوده و میرایی در معادلات دینامیکی حرکت سازه القا می‌شود. لذا تعیین ضرایب هیدرودینامیک ورق‌ها در محاسبه دقیق پاسخ سازه اهمیت دارد. این مطالعه یک مرور جامع روی تحقیقات انجام شده و روش‌های تعیین این ضرایب و عوامل تاثیرگذار بر ویژگی‌های هیدرودینامیکی ورق‌ها در یک دسته‌بندی منظم را انجام می‌دهد. در ادامه خلاهای تحقیقاتی در این زمینه اشاره می‌شود و پیشنهادات مناسب برای تحقیقات آتی بیان می‌شود.

A review of the researches on the added mass and damping coefficients for the heave plates of the offshore platforms at translational and rotational oscillations

Abuzar Abazari[1*], Mehdi Behzad[2]

[1] Assistant Professor, Faculty member of Chabahar Maritime University; abuzarabazari@cmu.ac.ir
[2] Professor, Faculty member of Sharif University of technology; m_behzad@sharif.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 22 Jan. 2020
Accepted: 11 Apr. 2020

Keywords:
Heave plate
Frequency and amplitude
Translational and rotational
Added mass and damping
Experimental and numerical

ABSTRACT

In recent years, using the offshore platforms in deep water locations is increasing for extracting oil and renewable energy. In such places, the harsh environmental forces of wind and sea waves cause vibration and instability for the structure. One of the optimized solutions for the reduction of vibration is installing the heave plate at the end of the platform column. These plates induce damping and added mass in motion equations of the structure. Therefore, deriving of the hydrodynamic coefficients is a requirement for obtaining the platform response accurately. The present paper is a comprehensive study on published researches and computational methods of the hydrodynamic coefficients and their corresponding effective parameters in a classified order. In the following, the drawbacks are pointed and new suggestions for future research are expressed.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر بواسطه وجود منابع انرژی در دریاها و اقیانوس‌ها نیاز به ساخت سازه‌های شناور بزرگ مخصوصا در آبهای عمیق رو به گسترش است. این سازه‌ها برای برداشت انرژی از امواج دریا یا باد و یا استخراج انرژی‌های فسیلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مثال‌هایی از این سازه‌ها توربین‌های فراساحلی، دستگاه‌های مبدل انرژی، سکوهای اسپار[۱]، پایه کششی[۲] و نیمه شناور[۳] هستند که برای تبدیل انرژی باد و موج به الکتریسیته، استخراج گاز و نفت در آبهای عمیق استفاده می‌شوند. یکی از چالش‌های موجود در استفاده از این سازه‌ها در دریا مخصوصا در آبهای عمیق، مشکلات ارتعاشاتی ناشی از نیروهای تحریک محیطی است. با وجود چنین سازه‌های بزرگی، طراحی دقیق خصوصاً از نقطه نظر جنبه‌های دینامیکی و ارتعاشاتی بیش از پیش ضروری به نظر می‌رسد. به علت اثرات غیرخطی موج (جمع فرکانسی[۴] یا تفاضل فرکانسی[۵]) در سکوهای پایه کششی و سکوی اسپار، امکان وقوع تشدید در جهت هیو وجود دارد. سکوی پایه کششی ذاتاً به واسطه تاندون‌های پیش کشیده شده فرکانس طبیعی بالایی دارد. از طرفی موج دریا از لحاظ ریاضیاتی موجی نامنظم با محتوای چند فرکانسی است. اگر چه بخش‌های اصلی موج با مرتبه اول با فرکانس‌های اصلی دامنه بزرگتری دارند اما به هرحال بواسطه اثرات مرتبه دوم، موج دارای تحریک‌هایی با دامنه کم و فرکانسی بزرگتر از فرکانس‌های بخش‌های مرتبه اول و برابر با جمع آن فرکانس‌ها است که روی سازه تاثیر گذار است. این پدیده باعث می‌شود که بخش‌هایی از نیروی تحریک، فرکانس بزرگی به اندازه مقدار فرکانس طبیعی سکوی پایه کششی داشته باشند لذا تشدید اتفاق می‌افتد[۱]. تحلیلی مشابه نیز برای سکوی اسپار وجود دارد که ذاتاً فرکانس طبیعی کوچکی دارد. در این حالت نیز گرچه بخش‌های مرتبه اول موج، شرایط تشدید را برای سکوی اسپار ایجاد نمی‌کنند اما از لحاظ ریاضیاتی تحریک‌های مرتبه دوم دارای فرکانسی به اندازه تفاوت فرکانس‌های مرتبه اول دارند. علی‌رغم اینکه دامنه تحریک این بخش‌ها کوچک است اما ممکن است این فرکانس کوچک ناشی از تفاضل فرکانس‌ها با فرکانس طبیعی اسپار برابر شده و تشدید اتفاق بیافتد[۲]. اضافه کردن یک ورق در پایین ستون سکوها می‌تواند سیستم دینامیکی را از شرایط تشدید دور کند. این کار از طریق ایجاد میرایی در حالت تشدید و از طرفی کاهش فرکانس طبیعی سازه با افزایش جرم افزوده صورت می‌پذیرد.

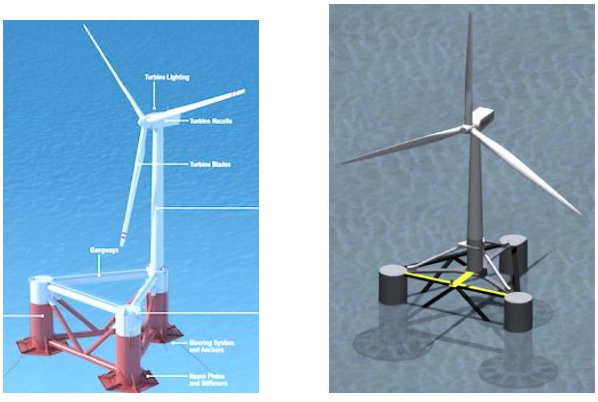
وقوع پدیده تشدید اغلب باعث آسیب به بخش‌های مختلفی مانند رایزرها و سیستم مهار می‌شود. برای رفع این مشکل سه راه توسط فالتینسن و هاسلوم[۳] پیشنهاد شد:

۱) دور کردن پریود طبیعی سازه از پریود امواج
۲) کاهش بیشتر نیروی تحریک هیو خطی
۳) افزایش میرایی

در راستای راه حل اول، افزایش جرم هزینه‌بر است و کاهش سختی با کاهش سطح آبخور چاره دیگری است که البته به دلایل سازه‌ای مناسب نیست. برای راه حل دوم، افزایش آبخور برای سازه‌های لاغر، تحریک ناشی از موج را کاهش می‌دهد ولی از جنبه‌های سازه‌ای و حمل و نقل ممکن است مشکلاتی ایجاد کند.

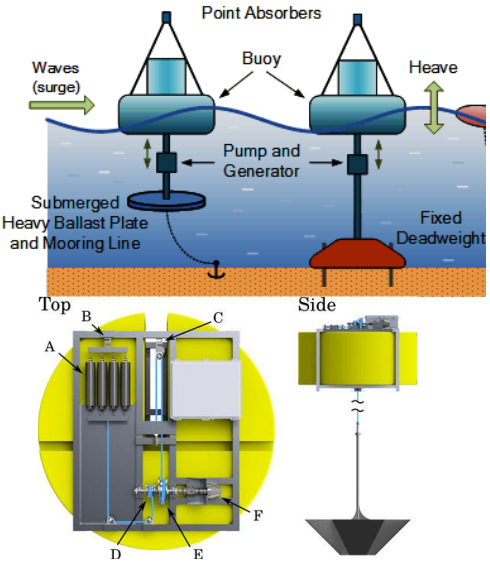
در راستای راه حل سوم، اضافه کردن یک ورق با ضخامت کم در پاشنه ستون‌های سازه سکو پیشنهاد شد که به علت لبه‌های تیز و ایجاد گردابه، میرایی سیستم و از طرف دیگر جرم موثر، افزایش می‌یابد که نهایتاً پریود طبیعی سیستم را افزایش می‌دهد. این مکانیزم پیشنهادی دامنه پاسخ ارتعاشی سازه را با افزایش میرایی هیدرودینامیک، در محدوده قابل قبولی نگه می‌دارد.

از آنجایی‌که سازه‌های فراساحلی به آهستگی میرا می‌شوند تحریک سازه حتی با مقدار نیروی تحریک کوچک می‌تواند منجر به پاسخ بزرگ شود لذا میرایی هیدرودینامیکی یک پارامتر مهم برای محدود کردن دامنه پاسخ است. بررسی نیروهای هیدرودینامیک وارد بر سازه‌های نوسانی مغروق در آب و به طور خاص ورق‌های با لبه‌های تیز از تحقیقات رو به رشد در سال‌های اخیر بوده است. چنین ورقه میراکننده‌ای که در سکوها با عنوان ورق‌های هیو[۶] شناخته می‌شد در بویه‌های شناور برای جمع‌آوری داده‌ها، سکوهای فراساحلی[۴]، مبدل‌های انرژی امواج و ورق‌های میراگر برای سازه‌های توربین بادی فراساحلی و حتی بیلج کیل[۷] روی کشتی‌ها کاربرد دارد. شکل ۱ تا شکل ۴ نمایی از ورق‌های نصب شده روی سازه‌های مختلف را نشان می‌دهد. نام‌گذاری ورق‌های نازک نصب شده زیر ستون‌های سکوها به عنوان "ورق هیو" به این علت است که به طور کلی با توجه به اهمیت ارتعاشات در جهت هیو نسبت به جهات دیگر، این ورق‌ها با هدف اصلی کاهش ارتعاشات در جهت هیو مورد استفاده قرار می‌گیرند.

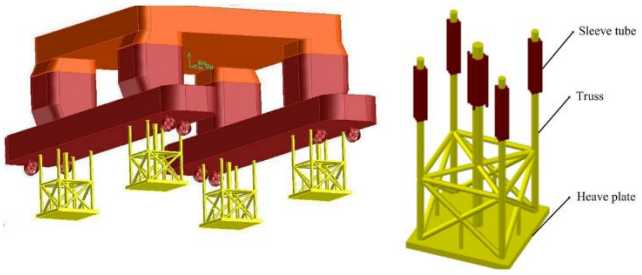


شکل ۱- ورق‌های هیو در پاشنه ستون‌های سکوی نیمه شناور یک توربین فراساحلی[۵]

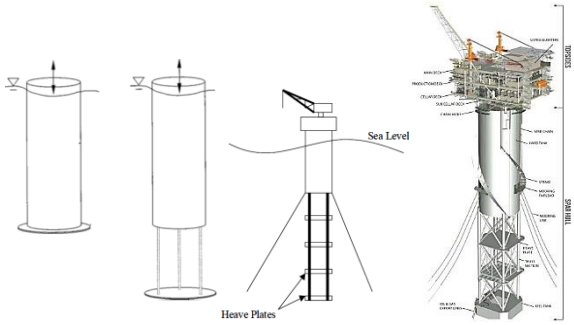
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]



شکل ۲- ورق هیو بکار رفته در مبدل‌های انرژی از امواج[۶, ۷]



شکل ۳- ورق هیو در یک سکوی نیمه شناور[۸]



شکل ۴- ورق هیو نصب شده در سکوی اسپار[۹, ۱۰]

سکوهای شناوری مانند اسپار، پایه‌کششی و نیمه‌شناور برای اکتشافات نفت یا استحصال انرژی در دریاهای عمیق کاربرد دارند. سکوی اسپار و نیمه‌شناور سازه‌هایی تطبیقی هستند که به نوعی حرکات آنها در جهات مختلف مخصوصاً حرکات در صفحه افق با جهت اعمال نیروی موج برخوردی تطبیق پیدا می‌کند. اسپار شامل یک استوانه حجیم است که از طریق سیستم مهار به کف دریا مهار می‌شود. پریود طبیعی آن ۲۵-۳۰ ثانیه است که بسیار دورتر از پریود تحریک امواج است اما به علت امواج اسول[۸] احتمال وقوع پدیده تشدید در جهت قائم وجود دارد که به نوبه خود موجب آسیب در سیستم مهار و رایزر می‌شود. سکوی نیمه‌شناور نیز سازه‌ای حجیم تشکیل شده از ستون‌ها و پانتون‌هایی است که حرکات آن در جهات مختلف از طریق خطوط مهار محدود می‌شود. سکوی پایه کششی سکویی با فرکانس طبیعی بالا است که به علت حجم بویانسی بالا خطوط مهار آن تحت پیش‌کشیدگی زیادی در جهت عمودی قرار می‌گیرند و حرکات آن در جهت قائم بسیار کم است. از آن‌جایی که پاسخ این سکوها در راستای قائم نقش بسیار مهمی در انتخاب تجهیزات مناسب برای حفاری و تولید دارد لذا کاهش ارتعاشات آنها در جهت قائم تمرکز اصلی محققان در این زمینه بوده است. نصب ورق نازک افقی زیر ستون‌های این سکوها می‌تواند از طریق ایجاد گردابه باعث افزایش میرایی گردد. علاوه بر این اعمال جرم افزوده امکان تغییر فرکانس طبیعی سیستم را بوجود می‌آورد که می‌تواند به عنوان راه‌کاری دیگر برای تنظیم ویژگی‌های دینامیکی سیستم استفاده شود تا فرکانس تحریک از فرکانس طبیعی دور گردد. به طور کلی معادله حرکت یک جسم شناور صلب، یک معادله شش درجه آزادی در جهات سرج، اسوی، هیو، یاو، رول و پیچ است که در حوزه زمان به صورت زیر بیان می‌شود:

$$[M]\{\ddot{x}\} = \{F(t)\} = \{F_{FroudKrylov} + F_{Diffraction} + F_{Radiation} + F_{Stiffness}\} \quad (۱)$$

$[M]$ ماتریس شش درجه آزادی جرمی شناور است که شامل جرم و ممان اینرسی جرمی حول محورهای مختصات است. نیروی کل وارد به شناور یک ماتریس 6×1 است که شامل بخش‌های نیرویی فرودکریلوف، تفرق، تشعشعی و سختی است. $F_{Stiffness}$ نیروی ناشی از سختی و فنریت است که ماتریس سختی $[c]$ را بوجود می‌آورد و بواسطه سختی مهار و سختی بویانسی ناشی از سطح آبخور ایجاد می‌شود. $F_{Radiation}$ نیروهای تشعشعی اعمالی به جسم مرتعش در آب است که بواسطه حرکت جسم در سیال بوجود می‌آید و شامل ترم‌های هم‌فاز با سرعت(میرایی$B_d\{\dot{x}\}$) و هم‌فاز با شتاب(جرم افزوده$M_a\{\ddot{x}\}$) است. این نیروها با علامت منفی در سمت راست معادله ظاهر می‌شوند. بعد از مرتب‌سازی، این ترم‌ها با علامت مثبت در سمت چپ معادله قرار می‌گیرند و به همین دلیل در بسیاری از مراجع به آنها نیروهای ذاتی سیستم هم گفته می‌شود. این نیروها در کل مانعی برای جابجایی و حرکت سازه هستند. $F_{Diffraction}$، نیروهای تفرق ناشی از موج متفرق شده برخوردی به جسم است که زمانی تاثیر آن روی جسم قابل ملاحظه است که ابعاد جسم در مقابل طول موج قابل ملاحظه باشد. $F_{FroudKrylov}$ نیروی اعمالی ناشی از فشار موج برخوردی به جسم است. لذا معادله حرکت بعد از بازنویسی دقیق نیروهای فنریت و تشعشعی به صورت رابطه (۲) مرتب می‌شود.

$$[M + M_a]\{\ddot{x}\} + [B_d]\{\dot{x}\} + [c]\{x\} = F_{FroudKrylov/incidence\ wave} + F_{Diffraction} \quad (۲)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]

در حقیقت نصب ورق در زیر ستون سکوها اثرش را در ماتریس میرایی$[B_d]$ و جرم افزوده$[M_a]$ می‌گذارد. نکته بسیار مهم این است که از آن جایی که ورق به صورت افقی نصب می‌شود، بیشترین تاثیر میرایی و جرم افزوده القا شده ناشی از این ورق به معادله کلی حرکت سکو در جهت قائم یا هیو است. اما علاوه بر این، ورق افقی باعث ایجاد میرایی و ممان اینرسی جرمی افزوده در جهت زاویه‌ای مثلا پیچ هم می‌شود. برای تحلیل دقیق ضرایب هیدرودینامیکی باید ارتعاشات کوپل هیو و پیچ برای یک ورق در نظر گرفته شود. اما به هر حال در تمامی مقالات چاپ شده تا کنون با ساده‌سازی‌هایی ضرایب هیدرودینامیک انتقالی درجهت هیو و زاویه‌ای به طور جداگانه بدون در نظر گرفتن اثرات کوپل حرکتی با تست مورد بررسی قرار گرفته‌است. از طرفی در شرایطی جریان‌های دریایی وجود دارد که روی ضرایب هیدرودینامیک ورق‌های هیو عاملی تاثیرگذار است و در بعضی پژوهش‌ها این نکته بررسی شده است. ساده سازی دیگر در تحلیل‌ها صرف نظر کردن از تاثیر مستقیم موج روی ورق هیو در بسیاری پژوهش‌ها بوده است که البته اثرات موج به صورت فرکانس ارتعاشات اجباری در تست‌ها نمود پیدا کرده است. هنگام تحلیل پاسخ سکوی شناور بایستی به این نکته توجه کرد که ضرایب هیدرودینامیک تابعی از دامنه ارتعاشات هستند. به عبارتی دیگر وابسته به مقدار پاسخ هستند. لذا با توجه به متغیر بوده دامنه ارتعاش یک سکو در طی زمان، حل تحلیلی معادله حرکت با در نظر گرفتن یک عدد ثابت برای میرایی و جرم افزوده نمی‌تواند منجر به پاسخ دقیق شود و نیاز به حل تکرار شونده دارد تا میرایی و جرم افزوده ورودی در معادله منجر به یک پاسخی شود که متناظر با همان مقادیر میرایی و جرم افزوده باشد.

از آنجایی که نسبت ضخامت به قطر ورق دایره‌ای در این‌گونه ورق‌ها برای بهبود میرایی کوچک است از اصطلاح ورق نازک برای آن استفاده می‌شود. جابجایی لبه‌های نازک ورق‌های هیو در جهت عمود بر سطح ورق، باعث جدایش جریان و ایجاد گردابه‌هایی می‌شود. این گردابه‌ها هنگامی از سطح ورق جدا می‌شوند در حقیقت مقداری انرژی ورودی را به صورت انرژی جنبشی دورانی انتقال یافته به سیال در فاصله دور انتقال می‌دهند که بدین ترتیب ارتعاشات سیستم میرا می‌شود. میرایی القا شده منجر به کاهش دامنه پاسخ حرکت ارتعاشی سازه و پایداری آن خواهد شد. این در حالی است که هنگام ارتعاشات ورق در سیال مقداری آب همراه ورق جابجا می‌شود. جابجاشدن جرمی از سیال همراه با سازه مرتعش مفهوما جرم معادل کل سازه را افزایش می‌دهد که باعث کاهش فرکانس طبیعی کل سازه می‌شود. البته مفهوم جرم افزوده در معادلات القا شده است و شاید طبق نظر بسیاری از محققان در واقعیت نمی‌توان به وجود جرم افزوده اذعان کرد. کاهش فرکانس طبیعی سازه بواسطه جرم افزوده ناشی از ورق هیو می‌تواند در حالت‌هایی باعث کاهش پاسخ ارتعاشاتی سازه شود زیرا فرکانس طبیعی نهایی فاصله بیشتری از فرکانس نیروهای تحریک پیدا خواهد کرد. بنابراین ورق هیو با اعمال دو عامل میرایی و تغییر فرکانس طبیعی روی پاسخ سازه تاثیر گذار است.

لازم به ذکر است که ورق هیو در بعضی انواع مبدل‌های انرژی باید نقش میرا کننده را داشته باشد(شکل ۲- بالا). در این نوع مبدل انرژی دو بخش پایینی(تقریبا ثابت) و بالایی(متحرک) باید وجود داشته باشد. روی بخش ثابت یک آهنربای دائمی قرار می‌گیرد و بخش متحرک نیز همراه با نوسانات بویه شناور ارتعاش دارد. حرکت ارتعاشی هارمونیک بویه بواسطه طبیعت نوسانی موج است. بخش ثابت از طریق تاندون به کف دریا مهار می‌شود که برای جلوگیری از تنش‌های وارده به تاندون‌ها، یک ورق نازک افقی هیو به آن بخش متصل می‌شود. این ورق هیو با تولید گردابه و از طرف دیگر با ایجاد جرم افزوده نیروی مقاوم در مقابل ارتعاشات برای بخش پایینی بوجود می‌آورد. لذا ورق هیو در این نوع بویه هر دو وظیفه ایجاد میرایی و جرم افزوده را دارد. هر چه جابجایی نسبی دو بخش ذکر شده نسبت به یکدیگر بیشتر باشد انرژی الکتریکی خروجی بیشتر خواهد بود. این در حالی است که ورق هیو در انواع خاصی از مبدل‌های انرژی نباید نقش میراکننده را داشته باشد(شکل ۲- پایین). ورق هیو در این نوع مبدل انرژی صرفا با افزایش جرم افزوده فرکانس طبیعی سازه را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که به مقدار فرکانس تحریک نزدیک شود. در این شرایط وقوع تشدید و جابجایی بیشتر میزان انرژی تولیدی را افزایش خواهد داد.

با توجه به اهمیت و تاثیرگذاری میرایی و جرم افزوده ورق هیو در پاسخ نهایی سازه، محققان تلاشهای زیادی برای تعیین ضرایب هیدرودینامیک ورق هیو انجام داده‌اند. آنها دریافتند که این مقادیر به پارامترهای زیادی بستگی دارند. نمونه‌ای از این پارامترها نسبت ضخامت به پهنا، فرکانس، دامنه ارتعاشات، شکل لبه، اثرات نزدیکی به مرز سطح و نزدیکی به مرز کف، فاصله بین ورق‌ها در حالت آرایش چندتایی و... است. دو پارامتر بی‌بعد مهم در که در بسیاری از تحقیقات منتشر شده وجود دارد KC و β هستند که بی‌بعد شده دامنه و فرکانس ارتعاشات ورق مرتعش هستند و به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$KC = \frac{2\pi A}{D}, \quad \beta = \frac{D^2 f}{\vartheta}, \qquad (۳)$$

که A، D، f، ϑ به ترتیب دامنه ارتعاشات، قطر دیسک، فرکانس ارتعاشات و لزجت سینماتیکی هستند. لازم به ذکر است ضرایب هیدرودینامیک ورق می‌تواند به دو روش ارتعاشات اجباری و آزاد بدست آورده شود. یقیناً در روش ارتعاشات اجباری که می‌توان دامنه‌ها و فرکانس‌های مختلفی را بررسی کرد منتج به مقادیر دقیق‌تری نسبت به حالت ارتعاشات آزاد می‌شود. ارتعاشات آزاد صرفاً در فرکانس طبیعی و دامنه خاص اتفاق می‌افتد. محققان در مطالعات‌شان از هر دو روش استفاده کرده‌اند که بیان می‌شوند. در همین

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]

راستا در مطالعه حاضر با مروری بر تحقیقات منتشر شده خلاصه‌ای از مهمترین نتایج بدست آمده بیان می‌شود که به روش‌های تجربی(آزمایشگاهی) و عددی(جریان‌پتانسیل- دینامیک سیالات محاسباتی) انجام شده است. کلیه مطالعات انجام شده روی ورق‌های میراکننده را می‌توان در سه بخش کلی تقسیم‌بندی کرد که خلاصه‌ای از مهمترین این تحقیقات در ادامه مطرح می‌شود.

۱) مطالعاتی که روی ضرایب هیدرودینامیک انتقالی استوانه چسبیده به ورق هیو انجام شده است.
۲) پژوهش‌هایی که صرفا روی ضرایب هیدرودینامیک انتقالی یک ورق هیو یا آرایه‌ای از ورق‌ها بدون در نظر گرفتن استوانه صورت پذیرفته است.
۳) تحقیقاتی که ویژگی‌های هیدرودینامیکی ورق هیو متصل به استوانه در ارتعاشات دورانی را مطالعه کرده‌اند.

۲- مطالعات روی استوانه و ورق متصل شده در ارتعاشات انتقالی

بسیاری از تحقیقات برای بررسی ضرایب هیدرودینامیک ورق‌ها با توجه به رویکرد کاربردشان در سکوها انجام پذیرفته است. از آنجایی که این ورق‌ها به انتهای پایین ستون استوانه‌ای سکوهای اسپار و پایه‌کششی و نیمه‌شناور متصل می‌شوند لذا تمرکز بعضی محققان روی تعیین ضرایب هیدرودینامیک مدل ترکیبی یک استوانه ساده و ورق متصل شده به آن بوده است.

یکی از تحقیقات پایه‌ای در زمینه گردابه‌ها برای ایجاد میرایی، توسط تیاگاراجان[۱۱] انجام شده است که تفاوت قدرت یک جفت گردابه متوالی[۹] را تفسیر کرد و مشاهده نمود که اختلاف، ناشی از پریود زمانی بزرگ مربوط به یکی از گردابه‌ها تا هنگام توسعه‌یافته-گی است که البته وابسته به جهت شروع ارتعاش است.

در ادامه یکی از اولین مطالعات تجربی با تمرکز بر مفاهیم سکوهای دریایی، توسط تیاگاراجان و تروواچ[۱۲] برای تعیین میرایی استوانه عمودی انجام شد. مشخص شد که ارتباط غیرخطی بین سرعت و نیروی پسا بر خلاف نتایج برخی مطالعات قبلی وجود دارد. محدوده KC ، ۰,۱ تا ۱ بود. آنها نتیجه گرفتند که ضرایب میرایی بخش‌های مختلف سکوی پایه کششی قوانین مقیاس متفاوتی را دارند که در نهایت قوانین مقیاس مربوط به نیروی پسا فشاری و اصطکاکی از مدل با مقیاس کوچک به نمونه واقعی با ابعاد بزرگ برای ستون‌های عمودی سکوی پایه کششی ارائه گردید. در ادامه تیاگاراجان و تروواچ [۱۳] میرایی یک استوانه تنها و یک استوانه با دیسک متصل شده به انتهای پاشنه را بررسی کردند و مشخص شد که نسبت میرایی دیسک و استوانه در مقایسه با استوانه تنها، تا ۲ برابر افزایش می‌یابد که بستگی به مقدار KC نیز دارد. ضرایب جرم افزوده و میرایی تغییراتی به صورت خطی نسبت به دامنه نوسانات اجباری (KC) نشان داد و این ضرایب وابستگی کمتری به پارامتر فرکانس(β) داشتند.

پریزلین [۱۴] و لک و همکاران[۱۵] تحقیقات خود را روی ضرایب هیدرودینامیک ورق‌های هیو مغروق انجام دادند. همچنین لک در یک تحقیق آزمایشگاهی، نتایج ضرایب هیدرودینامیک استوانه و دیسک متصل شده با قطرهای ۰,۱۵ و ۰,۱۹ متر را ارائه داد. مقایسه نتایج آنها با یافته‌های تیاگاراجان و تروواچ[۱۳] که با ابعاد دیگری انجام شده بود، باعث پیشنهاد قانون مقیاس ابعادی برای ضرایب هیدرودینامیک شد.

یکی از اولین مطالعات عددی روی ضرایب هیدرودینامیک استوانه تنها توسط تائو و تیاگاراجان[۱۶] انجام شد. آنها همچنین اثر لبه-های تیز زیر ستون سکو را در جدایش جریان بررسی کردند و پیدایش سریع گردابه‌ها حتی در KC کم را مشاهده کردند. در ادامه، تحقیق تائو و همکاران[۱۷] نیروهای پسا غیرخطی روی ستون یک سکوی پایه کششی با حل معادلات ناویر استوکس به روش تفاضل محدود بدست آورده شد. ویژگی‌های متفاوتی از میرایی هیو در دو رژیم متفاوت در محدوده $1 \le KC \le 0.001$ و $\beta \le 89236$ 435298 مشاهده گردید. در KC های کم، نیروی میرایی هیو تغییرات خطی نسبت به سرعت دارد، در حالی که با افزایش KC این روند غیرخطی می‌شود. همچنین مشخص گردید تئوری لایه مرزی آرام که بر اساس فرض استوانه دایره‌ای با طول نامحدود پایه‌گذاری شده برای تخمین نیروی پسا اصطکاکی در KC های کم سازگار است اما اثر لبه حمله[۱۰] در KC نزدیک به $2\pi/(D/T_d)$ (D قطر استوانه و T_d آبخور استوانه) قابل صرف نظر کردن نیست. طبق این تحقیق نمی‌توان یک قانون مقیاس ثابت را اعمال کرد لذا قانون مقیاس برای تخمین میرایی هیو برای یک ستون سکو در دو رژیم متفاوت بیان شد.

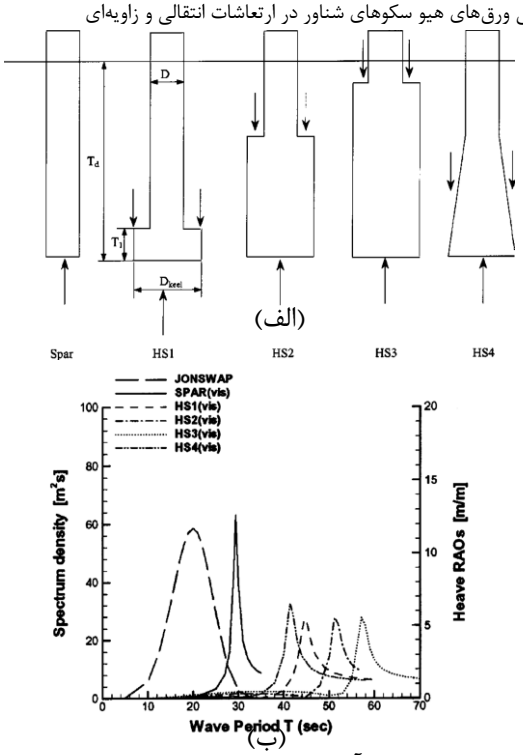
برای مشاهده نحوه تغییر شکل گردابه‌ها تائو و تیاگاراجان[۱۸] [۱۹] با استفاده از حل عددی مستقیم[۱۱] بر اساس روش تفاضل محدود[۱۲] جریان و ضرایب هیدرودینامیک یک استوانه و دیسک متصل به پاشنه آن را مورد بررسی قرار دادند. رژیم‌های متفاوتی از جریان مشاهده شد که در آن میرایی رفتار متفاوتی از خود نشان می‌داد. مثلا برای نسبت ضخامت به قطر ۰,۲ رژیم گردابه‌ای مستقلی[۱۳] وجود دارد (گردابه‌های بوجود آمده از یک لبه با گردابه-های لبه دیگر تداخلی ندارند). برای نسبت ضخامت به قطر ۰,۰۴ رژیم گردابه‌ای تقابلی[۱۴] است (در مقایسه با جریان رژیم گردابه‌ای مستقل، گردابه‌ها به فاصله دورتری جابجا می‌شوند و فرایند نفوذ[۱۵] کمتر است). برای نسبت قطر به ضخامت ۰,۰۰۱ رژیم گردابه‌ای یک جهته[۱۶] وجود دارد(در مقایسه با دو رژیم دیگر تقابل گردابه‌ها در هر دو نیم سیکل به طور فزاینده‌ای بالا می‌رود). در این مطالعه جریان ایجاد شده ناشی از حرکت استوانه عمودی به صورت متقارن

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]

محوری مدل‌سازی شد. ضمنا مشاهده گردید که دیسک نازک‌تر نیروی پسا شکلی بیشتری نسبت به دیسک با ضخامت بیشتر دارد. مشخص شد که نتایج حل عددی تطابق خوبی با نتایج تجربی در تحقیق تیاگاراجان و تراوچ [۱۳] داشت. همچنین یک قانون مقیاس برای میرایی ارائه دادند که بستگی به KC و β و نسبت ضخامت به قطر دارد. آنها نشان دادند که اضافه کردن ورق هیو به سکو، میرایی را تا چهار برابر افزایش می‌دهد. در تحقیقی مشابه تائو و کاعی[۲۰] نحوه ایجاد گردابه و رفتار هیدرودینامیک یک استوانه و دیسک متصل شده را در عددهای KC کم و فرکانس واقعی با استفاده از روش تفاضل محدود بررسی کردند. محاسبات نشان داد که پارامترهای هندسی تاثیر زیادی روی ضرایب هیدرودینامیک میرایی و جرم افزوده دارند.

تائو و همکاران[۲۱] با تغییر شکل بدنه اسپار و مقایسه پنج شکل اسپار معمولی(بدون ورق هیو)، اسپار پایین مخروطی و اسپارهای استوانه‌ای دیگر و ورقهای هیو متصل شده با ضخامتهای گوناگون، میرایی لزج را به روش عددی تفاضل محدود بدست آوردند. نتایج نشان داد میرایی به صورت خطی به KC وابسته است. مشخص شد که اسپار استوانه‌ای با ورق نازک متصل به پاشنه (HS1) وضعیت بهینه‌تری از نظر پاسخ دینامیکی خواهد داشت(شکل ۵).

افزایش تعداد ورق‌های هیو مجزا می‌تواند میرایی را افزایش دهد که بستگی به فاصله بین آنها دارد. لذا در مطالعه تائو و همکاران[۲۲] مسئله جریان لزج غیرخطی مرتبط با دو ورق هیو متصل به یک استوانه مرتعش در راستای هیو به روش تفاضل محدود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مشخص کرد که میرایی کل در شرایطی که دیسک‌ها در فاصله نزدیکی به یکدیگر قرار دارند شدیداً افت می‌کند زیرا گردابه‌های ایجاد شده از یک ورق می‌تواند به لبه دیسک دیگر برسد و مستقیما با گردابه‌های ایجاد شده از لبه دیگر تداخل کند. همچنین فیلیپ و همکاران[۲۳] تاثیرات پریود و دامنه موج را روی ضرایب هیدرودینامیک دیسک تکی و دوتایی بررسی کردند. این دیسک‌ها به انتهای پایینی سکوی اسپار متصل شده‌اند. الگوی تشکیل گردابه با روش CFD شبیه‌سازی شد و با نتایج تجربی PIV مقایسه گردید. مشخص شد که میرایی نسبت به پریود موج تغییرات غیرخطی و روند خطی نسبت به ارتفاع موج دارد. آنها دریافتند که چیدمان دیسک دوتایی در پایین سکوی اسپار میرایی بیشتری را نتیجه می‌دهد و باعث کاهش قابل توجه پاسخ دینامیکی در مقایسه با حالت‌های دیگر می‌شود.



شکل ۵- الف)پنج نوع آرایش متفاوت از سکوی اسپار ب)پاسخ هیو مربوط به آرایش‌های مختلف [۲۱]

ورق هیو در حالت واقعی برای استحکام سازه‌ای دارای تقویت کننده است که می‌تواند روی ویژگیهای هیدرودینامیکی تاثیر گذار باشد لذا لوپز و همکاران[۵] ورق‌های هیو متصل به سکوی نیمه‌شناور توربین بادی فراساحلی با سه پایه را مورد آزمایش قرار دادند. دو نوع ورق صاف و تقویت شده دارای لبه به انتهای پایه‌های سکو متصل شد. ضرایب میرایی و جرم افزوده بدست آمده از آزمایش با نتایج تحلیل عددی (جریان لزج و جریان پتانسیل) مقایسه شد. همچنین برای بدست آوردن اطلاعات مناسب برای طراحی سکو، فشار در هر دو سطح بالا و پایین ورق هیو اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که ضرایب میرایی و جرم افزوده وابستگی کمی به فرکانس و وابستگی زیادی به دامنه حرکت دارد که با نتایج تحقیقات قبلی مطابقت دارد. ورق با وجود لبه، میرایی کمتری نسبت به ورق صاف داشت لذا هنگام آزمایش یک مدل از سکوی توربین بادی، آزمایش ورق هیو با وجود لبه الزامی است در حالی که جرم افزوده برای این دو ورق تغییر چندانی نداشت. تفاوت‌های موجود در ضرایب میرایی و جرم افزوده در مقایسه با تحقیقات قبلی برای ورق یکنواخت مربوط به اثرات سطح آزاد می‌شد. همچنین پاسخ پریودیک زمانی در تاریخچه زمانی فشار شامل ترم‌های فرکانس بالا بود. فشار روی ورق لبه‌دار مشابه مقادیر فشار ورق صاف بود به جز تغییرات فشاری که در اطراف لبه‌ها بوجود می‌آمد. همچنین مشخص گردید نرم افزار ومیت که بر مبنای جریان پتانسیل است به خوبی نمی‌تواند جرم افزوده ورق‌های نازک دارای لبه را مدل‌سازی کند. در ادامه مورنو و همکاران[۲۴] همان نمونه‌ای که در مطالعه لوپز و همکاران آزمایش شد، مورد بررسی قرار دادند با این تفاوت که مدل استفاده شده در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]

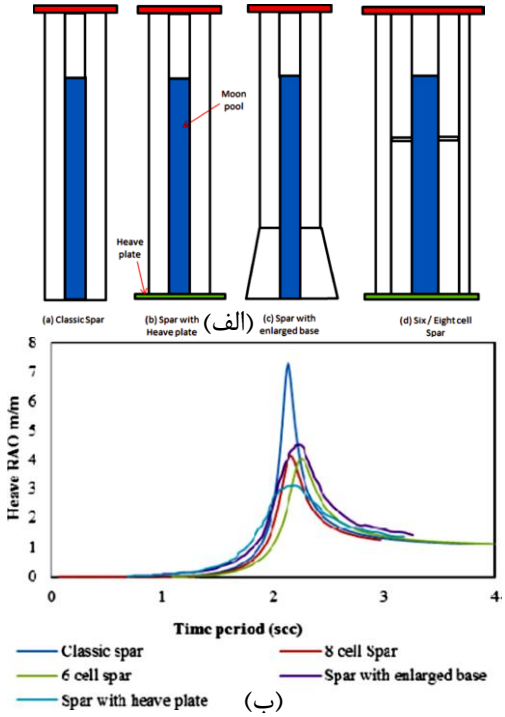
تحقیق لوپز و همکاران با مقیاس ۱:۲۰ و در این تحقیق با مقیاس ۱:۸۰ بود. ارتعاشات اجباری در KC و فرکانس‌هایی معادل با یک تا ۵ برابر فرکانس طبیعی انجام شد. جرم افزوده و میرایی با افزایش KC همانند مطالعات قبلی افزایش می‌یافت. برای KC کم جرم افزوده و ضریب میرایی مستقل از فرکانس بود. با افزایش فرکانس تداخل بین ورق و سطح آزاد باعث ایجاد موج بازتابی شد و این باعث وابستگی میرایی به فرکانس می‌شد. ضمنا مشخص گردید برای هر دو آزمایش با مقیاس‌های ۱:۲۰ و ۱:۸۰ تشدید در فرکانسی معادل با دو برابر فرکانس طبیعی سکو اتفاق می‌افتد. مشخص شد در تشدید ضریب جرم افزوده به شدت کاهش می‌یابد.

لاوروف و گودس سوارز[۲۵] با تحلیل عددی و استفاده از نرم افزار اوپن فوم، نیروهای هیدرودینامیک در جهت هیو برای سه مدل استوانه، استوانه و یک دیسک، استوانه و دو دیسک را برای اعداد KC مختلف با فرض جریان آرام بدست آوردند. این تحلیل‌ها با تکنیک مش دینامیک[۱۷] انجام شده‌است. نسبت میرایی برای استوانه و استوانه همراه با دیسک با نتایج تجربی برای محدوده KC ۰,۱ تا ۰,۷ تطابق خوبی دارد. محاسبات برای استوانه با دو دیسک نیز با نتایج تحقیقات قبلی تطابق خوبی داشت و دینامیک گردابه‌ها و تاریخچه زمانی نیروی هیو برای ابعاد واقعی یک سکوی اسپار بدست آورده شد. نتایج نشان داد که به طور کلی بزرگ کردن ابعاد یک ورق نسبت به اضافه کردن دیسک برای افزایش میرایی بهینه‌تر است.

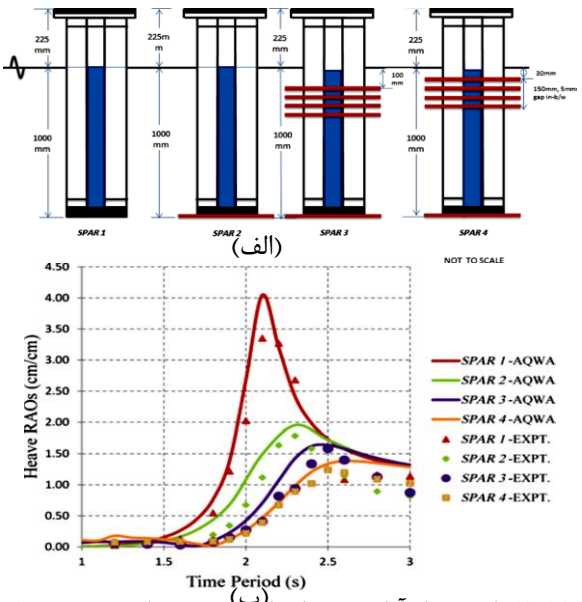
تاثیر سطح مقطع در روابط تجربی ساده ارائه شده برای ضرایب هیدرودینامیک ورق‌ها در تحقیقات بررسی نشده بود. بنابراین ژانگ و ایشیهارا[۲۶] با روش عددی CFD و تکنیک حجم سیال[۱۸] و شبیه‌سازی ادیهای بزرگ[۱۹] و همچنین روش آزمایشگاهی ضرایب هیدرودینامیک ورق هیو تکی و دوتایی با سطح مقاطع گوناگون را مورد بررسی قرار دادند. سپس الگوی تشکیل گردابه‌های اطراف هر دیسک در یک چیدمان دوتایی بررسی شد تا نحوه اعمال نیروهای هیدرودینامیکی روی هر دیسک مشخص گردد و اثر پارامترهایی مانند نسبت قطر، نسبت فاصله و نسبت ضخامت به قطر روی ضرایب هیدرودینامیک ورق ۸ ضلعی مطالعه شد. نهایتا یک رابطه تجربی ساده شده برای ضرایب جرم افزوده و نیروی پسا دیسک‌های تکی و دوتایی با در نظر گرفتن سطح مقاطع گوناگون مربعی، هشت ضلعی، دایره‌ای بدست آورده شد.

علاوه بر تعیین ضرایب هیدرودینامیک جرم افزوده و میرایی بعضی محققان اثرات این ضرایب را در پاسخ نهایی سکوی شناور نیز محاسبه کردند. سیبایی وسونداراوادیولو[۲۷] یک سری آزمایش برای تعیین ضرایب هیدرودینامیک مدل اسپار(استوانه عمودی با دیسک متصل شده) با مقیاس ۱:۱۰۰ با شکل مهار سفت[۲۰] تحت تحریک موج منظم و تصادفی انجام دادند که در این تحقیق ورق‌های مربعی و دایره‌ای در پاشنه اسپار متصل شدند. همچنین مدل‌سازی عددی در نرم افزار ومیت[۲۱] برای تحلیل‌های سیستم انجام شد و با نتایج تجری تطابق خوبی داشت. آنها دریافتند که ورق هیو مربعی پاسخ هیو RAO را افزایش می‌دهد لذا پیشنهاد شد که ورق دایره‌ای در پاشنه بکار برده شود. سودهاکار و نالایاراسو[۲۸] آزمایشهایی برای تعیین ضرایب هیدردینامیکی و پاسخ ارتعاشی روی مدل سکوی اسپار با مقیاس ۱:۱۰۰ با یک و دو ورق هیو تحت تحریک موج منظم انجام دادند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها با نتایج تحلیل عددی نرم افزار انسیس اکوا[۲۲] مقایسه شد و تطابق خوبی بین نتایج وجود داشت. اثرات نسبت قطرها، تیزی موج، پیش کشیدگی خط مهارها و فاصله نسبی بین ورق‌ها روی پاسخ هیدرودینامیکی سکوی اسپار ارائه شد. مشخص شد که نسبت میرایی با افزایش مقدار نسبت قطر تا ۱,۵ به میزان ۱۰۰ درصد افزایش می‌یابد و از طرفی با افزایش فاصله نسبی به ۰,۵ نسبت میرایی تا ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. تاثیر قطر دیسک و فاصله روی جرم افزوده و پاسخ نهایی سکوی اسپار با نرم افزار ومیت توسط جوزه و همکاران[۲۹] بررسی شد. بر اساس این مطالعه ورق‌های دایره‌ای هیو که قطر آن ۲۰ تا ۳۰ درصد بیشتر از قطر اسپار بود برای کاهش هیو موثرتر بودند. آنها نسبت فاصله ۰,۲ تا ۰,۴ را برای کاهش هیو پیشنهاد دادند و مشاهده کردند که ورق هیو روی حرکات سرج و پیچ تاثیر چندانی ندارد. روشهای ارائه شده برای تعیین ضرایب هیدرودینامیک و پاسخ سکو زمان‌بر هستند لذا نالایاراسو و بایراتی[۳۰] یک روش ساده برای تخمین تقریبی مناسب پاسخ دینامیک سکوی اسپار و ورق هیو چسبیده در مراحل اولیه طراحی سکو ارائه دادند. ضرایب جرم افزوده و میرایی و نیروهای وارد بر سکو از طریق یک تخمین تقریبی با هندسه ساده، تست ارتعاشات آزاد و تئوری موریسون انجام شد. نتایج این تئوری با داده های حاصل از نرم افزار ومیت نیز مقایسه شد که تطابق خوبی بین آنها وجود داشت. در ادامه نالایاراسو و همکاران[۳۱] اثرات هندسی بدنه را روی پاسخ دینامیکی سکوی اسپار با آبخور عمیق در امواج منظم به روش آزمایشگاهی(با مقیاس ۱:۱۰۰) و عددی(انسیس آکوا) بررسی کردند. تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی مخصوصا در محدوده امواج با پریود پایین مشاهده شد. در بین هندسه‌های در نظر گرفته شده اسپار سلولی و اسپار با ورق هیو منجر به پاسخ رائو سرج و هیو کمتری تحت بارهای محیطی سخت شدند(شکل ۶).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]



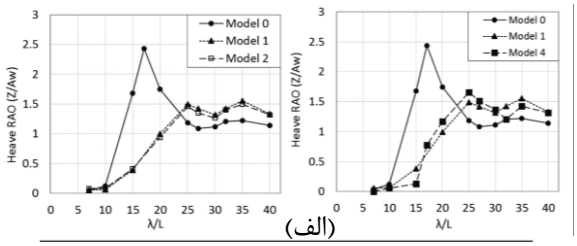
شکل ۶- الف)چهار آرایش مختلف اسپار ب)پاسخ هیو چهار آرایش مختلف اسپار[۳۱]



شکل ۷- الف)چهار آرایش مختلف از نصب ورق‌های هیو روی سکو ب)پاسخ هیو آریش‌های مختلف [۳۲]

تاثیر چیدمان‌های مختلف ورق‌های هیو سکوی اسپار مانند آرایش تکی و چندتایی از دیسک‌ها روی پاسخ کوپل نزدیک به تشدید در محدوده ناپایداری متیو توسط نالایاراسو و متایی[۳۲] مطالعه شد. هر دو نتایج تجربی روی نمونه با مقیاس ۱:۱۵۰ و نتایج شبیه‌سازی عددی(نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام(CFD) و انسیس اکوا(تئوری پتانسیل)) تطابق خوبی داشتند. نمودارهای پاسخ سازه و ناپایداری متیو نشان داد که سکوی اسپار با چیدمان‌های چند تایی نزدیک به خط آب پاسخ دینامیکی بهتری دارد (شکل ۷).

در یک مطالعه جامع‌تر تاثیر پارامترهای هندسی زیادی به روش عددی و آزمایشگاهی روی پاسخ سکوی شناور توسط سوبولاکشیمی و سونداراوادیولو[۳۳] بررسی شد. آنها آزمایش‌های تجربی مربوط به ارتعاشات آزاد[۲۳] را روی مدل سکوی اسپار با دو ورق هیو با مقیاس ۱:۵۰ برای پیدا کردن میرایی انجام دادند. یک شبیه‌سازی عددی نیز با نرم افزار استار سی‌سی- ام[۲۴] انجام شد و صحت‌سنجی آن با نتایج تجربی بررسی شد. اثرات ورق هیو روی میرایی در حالت یک ورق و دو ورق همراه با تاثیر پارامترهایی مانند نسبت مقیاس[۲۵]، نسبت قطر، نسبت موقعیت به قطر ورق و فاصله ورق‌ها و نسبت فاصله به آبخور مورد مطالعه قرار گرفت. نهایتا آنها دریافتند که میرایی با افزایش نسبت مقیاس افزایش می‌یابد. نسبت مقیاس، میرایی هیو را تا نسبتِ موقعیت به قطر ۰,۶ تحت تاثیر قرار می‌دهد. افزایش نسبت قطر، میرایی را زیاد می‌کند و تاثیر نسبت قطر روی میرایی تا مقدار ۱,۴ زیاد است و بعد از آن، این روند افزایشی کم می‌شود. نسبت قطر بهینه ۱,۲ تا ۱,۴ برای کاهش حرکات هیو پیشنهاد شد. میرایی هیو با افزایش نسبت موقعیت به قطر تا مقدار ۰,۸ افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. بهینه‌ترین مقدار موقعیت به آبخور ۰,۴ پیشنهاد گردید. میرایی هیو با افزایش فاصله نسبی تا مقدار ۰,۸ افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. فاصله نسبی ۰,۴ تا ۱ بین دو ورق هیو میرایی بیشتری در مقایسه با میرایی یک تک ورق متصل به پاشنه سکوی اسپار دارد. فاصله نسبی ۰,۴ تا ۰,۶ یک مقدار بهینه است. مقدار فاصله به آبخور ۰,۲ تا ۰,۸ میرایی بیشتری نسبت به تک ورق متصل به پاشنه سکو دارد و نهایتا مقدار بهینه فاصله به آبخور ۰,۲ تا ۰,۴ برای کاهش حرکات هیو پیشنهاد شد.



Model no.	Heave plate	Diameter (mm)	Thickness (mm)
0 (base)	w/o plate	-	-
1	w/ plate	80	5
2		80	2
3		60	2
4		60	5

شکل ۸- الف)پنج نمونه از سکوی استوانه‌ای با ورق هیو ب)پاسخ هیو سازه بر حسب نسبت طول موج [۳۴]

فاصله ورق هیو نسبت به پاشنه ستون استوانه‌ای سکو پارامتر تاثیر گذار دیگری است که ژو و لیم[۳۴] آن را تحقیق کردند. در مطالعه آنها دیسک به گونه‌ای روی استوانه مونتاژ شده بود که می‌تواند فاصله‌های مختلفی نسبت به کف استوانه داشته باشد. در بخش اول از این تحقیق منحنی تغییرات ضریب جرم افزوده بر حسب KC و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]

فاصله دیسک از کف استوانه بررسی شد. در بخش دوم تحقیق، پریود طبیعی مدل با آزمایش تست ارتعاشات آزاد بدست آمد. در بخش سوم پاسخ دینامیکی استوانه و دیسک متصل شده تحت امواج منظم بدست آمد. نهایتا آنها دریافتند که افزایش قطر دیسک در مقایسه با افزایش فاصله دیسک از کف استوانه عامل تاثیر گذارتری روی جرم افزوده است. از طرفی افزایش قطر ورق هیو در مقایسه با کاهش ضخامت آن تاثیر بیشتری روی کاهش پاسخ هیو دارد (شکل ۸).

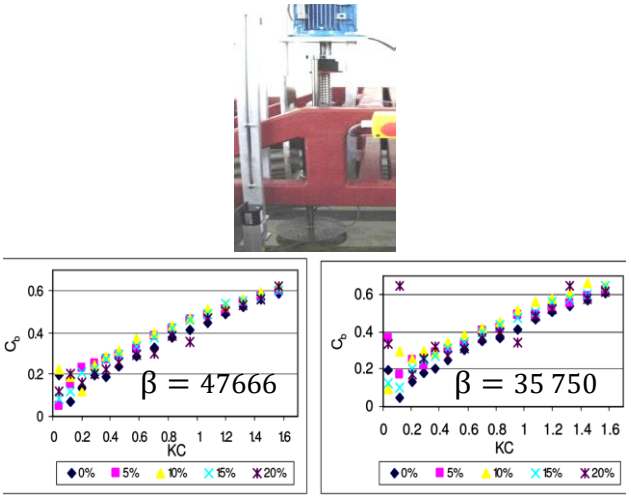
۳- تحقیقات روی ورق‌های هیو بدون استوانه در ارتعاشات انتقالی

در بعضی از سازه‌ها و سکوهای دریایی، ورق‌های میراکننده به صورت مجزا و در فاصله دور از ستون‌های سکو قرار می‌گیرند. در این حالت میدان فشار و سرعت سیال اطراف ورق تحت تاثیر اجسام دیگر قرار نمی‌گیرد. بنابراین مطالعات زیادی نیز روی ضرایب هیدرودینامیک ورق تکی یا آرایه‌ای از ورق‌ها بدون حضور استوانه توسط محققان انجام شده است. خلاصه‌ای از این تحقیقات در ادامه بیان می‌شود. لی و همکاران[۴] دریافتند که اضافه کردن ورق هیو از یک طرف باعث افزایش میرایی می‌شود و از طرف دیگر باعث کاهش تحریک ناشی از امواج به علت کاهش نمایی دامنه موج نسبت به عمق می‌شود.

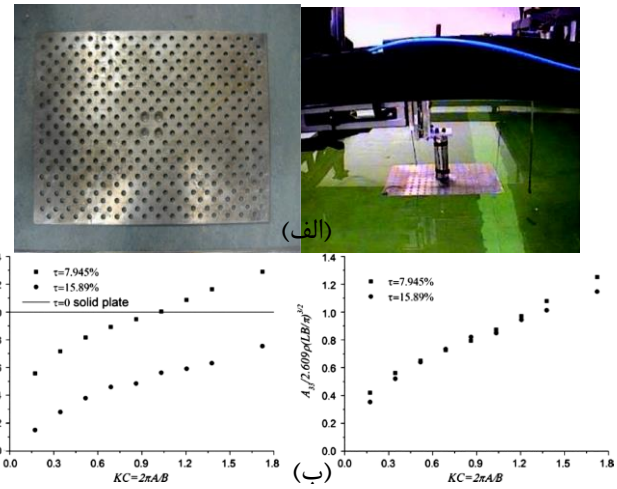
سوراخ‌کاری می‌تواند عاملی برای افزایش میرایی شود. مولین[۳۵] آرایه‌ای از ورق‌های سوراخ‌دار با تئوری پتانسیل را بررسی کرد و به این نتیجه رسید که در اعداد KC بالا، سوراخ کردن صفحات اثر قابل توجهی در میرایی نداشته ولی در KC های کم، ورق سوراخ‌دار میرایی بیشتری نسبت به ورق صاف و یکنواخت[۲۶] دارد. علاوه بر این نشان داد که جرم افزوده به دامنه وابسته است که این در بحث تشدید سکوی اسپار بسیار مهم است. در همین راستا وو و همکاران [۳۶] ضرایب میرایی دیسک یکنواخت و متخلخل(با سوراخ‌کاری[۲۷]) را با توجه به کاربرد مفهومی آن در سازه‌های فراساحلی به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج برای ورق بدون سوراخ‌کاری تطابق خوبی با داده‌های تحقیقات منتشر شده قبلی داشت اما برای شیب منحنی‌ها تفاوت‌هایی وجود داشت. همچنین تغییرات ضرایب میرایی برای همه دیسک‌ها نسبت به افزایش دامنه به صورت خطی بود(شکل ۹). مولین و همکاران[۳۷] همچنین اثرات سطح آزاد را با انجام آزمایش‌هایی تحت تحریک اجباری روی دیسک با قطر ۶۰۰ میلیمتر و ضخامت ۱ میلیمتر با دو نسبت سوراخ‌کاری ۱۰ و ۲۰ درصد بررسی کردند. عمق غوطه‌وری ورق ۵۰ و ۱۰۰ و ۲۵۰ میلیمتر بود و عمق مخزن ۵۰۰ میلیمتر بود. مشاهده شد که گردابه‌ها در دامنه‌های بزرگ روی هر دو پارمتر میرایی و جرم افزوده تاثیرگذار است. تائو و درای[۳۸] ضرایب هیدرودینامیک دیسک یکنواخت و سوراخ‌دار را با آزمایش‌هایی بررسی کردند. ضرایب هیدرودینامیک با اندازه‌گیری نیروی اعمالی به ورق‌ها حین ارتعاش و تحلیل آن بدست آمد. نتایج تحقیق آنها نشان داد که میرایی و جرم افزوده به عدد KC و میزان مساحت سوراخ‌کاری وابسته است و وابستگی کمتری به پارامتر β دارد. تغییرات میرایی و جرم افزوده همه دیسک‌های با تخلخل ۰ تا ۲۰ درصد در محدوده KC و β های آزمایش شده، رابطه خطی با KC دارد. در KC های بالا ورق توپر میرایی بیشتری ایجاد می‌کند. اما در KC های پایین بستگی به مقدار فرکانس، افزایش قابل ملاحظه‌ای در میرایی با ورق متخلخل مشاهده شد. مثلا دیسک با تخلخل ۲۰ درصد منجر به افزایش تقریبی ۳۰ درصدی میرایی نسبت به ورق توپر در فرکانس ۰,۱ هرتز شد. همچنین ضریب جرم افزوده با افزایش تخلخل کاهش یافت و این روند در فرکانس‌های بالاتر کاملا مشهودتر بود. آنها کار تیاگاراجان و پیستانی[۳۹] را مبنی بر وابستگی جرم افزوده به KC مورد تایید قرار دادند. همچنین مولین و نیلسون[۴۰] نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر یک ورق سوراخ‌دار در زیر سطح آب را بررسی کردند. آن و فالتینسن[۴۱] ضرایب هیدرودینامیک ورق سوراخ‌دار را تحت ارتعاشات اجباری هارمونیک در حالت عمیق و کم عمق به روش آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. حل عددی آنها بر اساس ترکیب جریان پتانسیل با شرایط سطح آزاد خطی و شرط اتلاف فشار لزج غیرخطی در موقعیت میانگین ورق نوسانی بدست آمده‌است. یک تکنیک تجزیه دامنه[۲۸] با المان مرزی در دومین داخلی و در دومین خارجی با روابط تحلیلی منطبق با جریان پتانسیل، اعمال شد. ضرایب میرایی و جرم افزوده تطابق خوبی با نتایج تجربی، مخصوصاً در حالت مغروق عمیق، داشت. آنها دریافتند که ورق سوراخ‌دار ضریب میرایی بیشتر و جرم افزوده کمتر از ورق توپر دارد(شکل ۱۰).

هولمز و همکاران[۱۰] نیروهای هیدرودینامیکی روی ورق هیو را با روش عددی بدست آوردند و ضرایب موریسون برای ورق‌های هیو تحت شرایط دریایی مختلف را با روش حداقل میانگین مربعات[۲۹] بدست آوردند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]

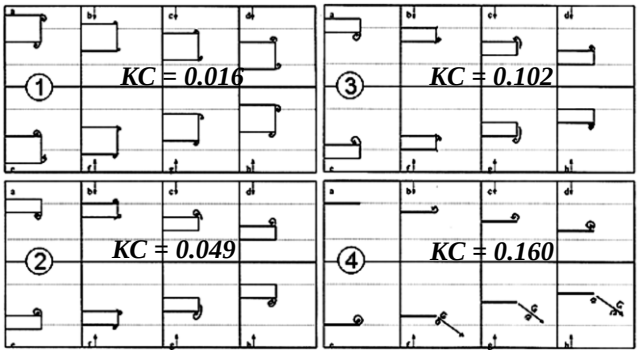


شکل ۹- تجهیز برای تست نمونه تغییرات ضریب میرایی بر حسب KC و میزان تخلخل[۳۶]

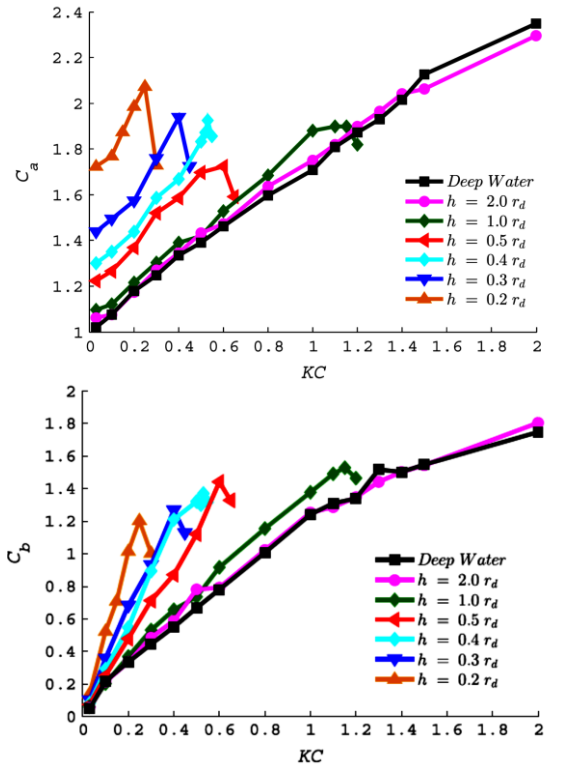


شکل ۱۰-الف)نمونه ورق مربعی سوراخ دار ب)تاثیر تخلخل روی ضرایب هیدرودینامیک

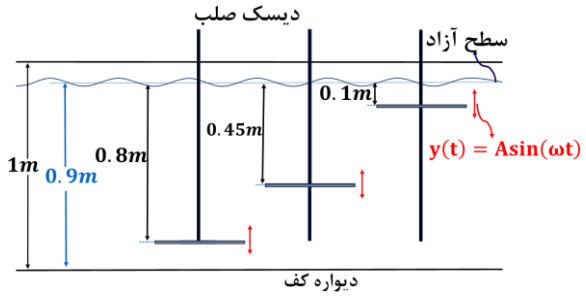
مطالعه تجربی هی و همکاران [۴۲] روی وابستگی پارامتر ضریب میرایی به عدد KC و هندسه(نسبت ضخامت به قطر) متمرکز بود. مشاهدات نشان داد که با افزایش نسبت ضخامت به قطر کاهش قابل ملاحظه‌ای در میرایی بوجود می‌آید و همچنین تداخل گردابه-های ایجاد شده از لبه بالا و پایین دیسک در دو نیم سیکل نقش مهمی در میرایی دارد. به عبارت دیگر تداخل گردابه‌ها می‌تواند قدرت گردابه در هر دو نیم سیکل را همانند مود سوم، افزایش دهد که منجر به میرایی بیشتر شود و برعکس تداخل گردابه‌ها مانند مود چهارم می‌تواند منجر به ایجاد یک جفت گردابه یک جهته و کاهش تولید گردابه در کل سیکل گردد که این نکته میرایی نهایی را کاهش می‌دهد(شکل ۱۱).



شکل ۱۱- چهارمد متفاوت ایجاد گردابه در KC های مختلف[۴۲]



شکل ۱۲- تغییرات ضرایب هیدرودینامیک با نزدیکی به مرز[۴۳]



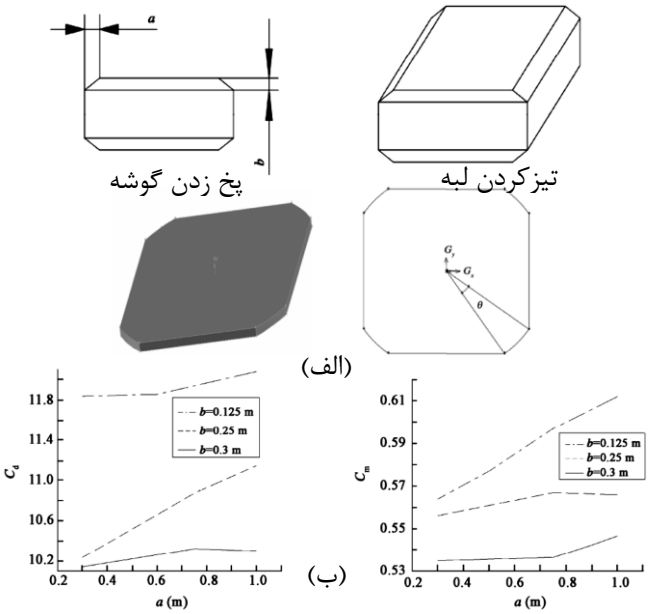
شکل ۱۳- تاثیر نزدیکی به مرز روی ضرایب هیدرودینامیک[۴۶]

میدان سرعت و فشار سیال اطراف ورق مرتعش قطعاً تحت تاثیر مرزهای نزدیک به آن قرار می‌گیرد. تغییرات میدان سرعت و فشار اطراف ورق ناشی از نزدیکی به مرزها روی ضرایب هیدرودینامیک منتجه تاثیرگذار خواهد بود. لذا مطالعاتی روی ضرایب هیدرودینامیک دیسک مرتعش در موقعیت نزدیک به سطح آزاد و بستر کف در مقایسه با دیسک دور از مرزها انجام شده است. اثر شرایط مرزی سطح آزاد و بستر کف روی ضرایب هیدرودینامیک

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]

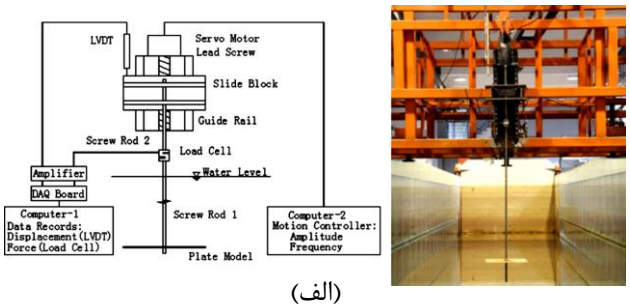
ورق صلب با قطر ۰,۲ متر در فرکانس تحریک ۱ هرتز با تحقیقات تجربی [۴۴, ۴۵] بررسی شده است. نتایج، افزایش شیب منحنی-های میرایی و جرم افزوده بر حسب KC با نزدیکی به مرز را نشان می‌دهد. ضمنا با نزدیکی به مرزها در نتایج منحنی‌های ضرایب هیدرودینامیک بر حسب KC یک مقدار بحرانی برای KC مشاهده شد که برای مقادیر بزرگتر از مقدار بحرانی KC ضرایب میرایی و جرم افزوده افت شدیدی پیدا می‌کنند. همچنین در منحنی‌های ضرایب هیدرودینامیک بر حسب KC، افزایش مقدار عرض از مبدا با نزدیکی فاصله تا مرز مشاهده گردید. شبیه‌سازی ارتعاشات دیسک نزدیک کف و دیواره در آب با کار تحقیقاتی گاریدو مندوزا و همکاران[۴۳] انجام شد. تحلیل‌ها با نرم افزار اوپن فوم[۳۰] انجام شد. ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی با مقایسه نسبت میرایی محاسبه شده با نتایج تجربی تیاگاراجان و تروواچ[۱۳] برای استوانه با یک دیسک انجام شد. که تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی وجود داشت. با نزدیک‌تر شدن موقعیت دیسک به مرز کف شیب منحنی‌های میرایی و جرم افزوده نسبت به KC افزایش یافت(شکل ۱۲). همچنین همانند کار تجربی وادهوا و تیاگاراجان[۴۵] بعد از یک مقدار بحرانی KC افت شدیدی در منحنی‌های میرایی و جرم افزوده مشاهده گردید. همچنین آزمایش های انجام شده توسط اباذری و بهزاد[۴۶]تحت تحریک اجباری هارمونیک در فرکانس‌ها و عمق‌های مختلف نشان داد که افزایش فرکانس موجب کاهش ضرایب هیدرودینامیک در نزدیک سطح و افزایش ضرایب مربوطه در مجاورت بستر کف می‌شود(شکل ۱۳).

تاثیر دامنه ارتعاشات و شکل لبه ورق هیو توسط شن و همکاران[۴۷] با نرم افزار فلوئنت برای ورق هیو مربعی در سکوی اسپار خرپایی مطالعه شد. آنها دریافتند که با افزایش ضریب KC، نیروی پسا کاهش و ضریب جرم افزوده افزایش می‌یابد. شیب‌دار کردن لبه‌های ورق باعث افزایش۱۰درصدی ضرایب جرم افزوده و نیروی پسا خواهد شد. جرم افزوده و میرایی با افزایش فاصله بین ورق‌ها افزایش می‌یابد و بعد از اینکه فاصله از ۱,۵ برابر پهنای ورق بیشتر شود تغییرات چندانی با افزایش فاصله بوجود نمی‌آید. همچنین در ادامه شن و همکاران[۴۸] با تیزکردن لبه‌ها[۳۱] در راستای ضخامت و پخ زدن گوشه[۳۲]، تاثیر تغییرات شکل لبه را روی ضرایب هیدرودینامیکی ورق مربعی بررسی کردند. مشخص شد که ضریب نیروی پسا با افزایش مقدار تیزی پهنا و ضخامت افزایش می‌یابد در حالی که ضریب جرم افزوده در ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. در حالت پخ زدن، ضرایب اشاره شده با افزایش زاویه پخ کاهش می‌یابند. نهایتا مشاهده شد که روش تیزکردن لبه نسبت به پخ زدن بهینه‌تر است(شکل ۱۴).



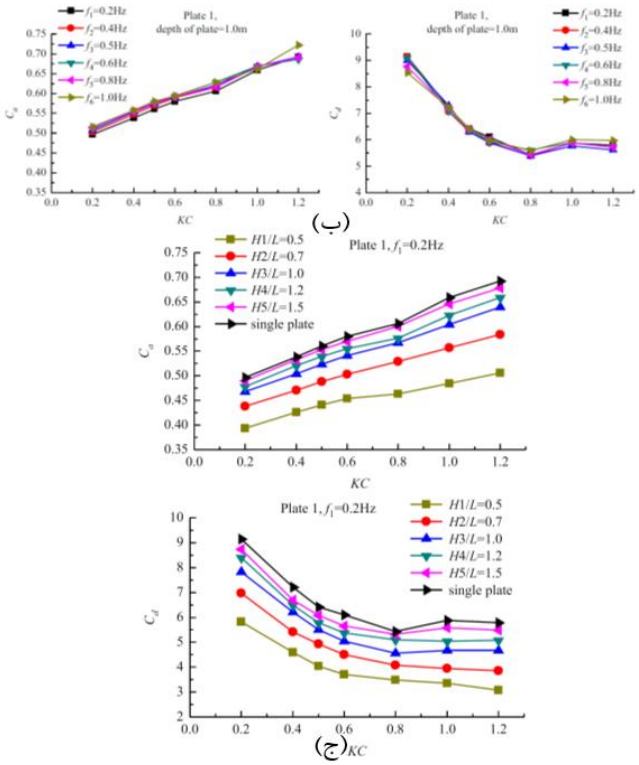
شکل ۱۴-الف) نمای تیز کردن و پخ زدن ورق مربعی ب) تغییرات ضرایب هیدرودینامیک در حالتهای مختلف تیزی لبه[۴۸]

لی و همکاران[۴۹] ویژگی‌های هیدرودینامیکی ورق را به صورت تجربی با ارتعاشات اجباری بررسی کردند. آنها دریافتند که جرم افزوده با افزایش KC زیاد می‌شود ولی فرکانس تاثیری روی این پارامتر در محدودهKC ، ۰,۲ تا ۱,۲ ندارد. وابستگی ضریب نیروی پسا ورق به KC و β حساس به پارامتر نسبت ضخامت به پهنا است طوری که برای مقدار ضخامت به پهنا ۱/۸۰ و ۱/۵۰ ضریب نیروی پسا با افزایش KC کاهش می‌یابد و برای مقدار ۱/۸۰ نیروی پسا مستقل از فرکانس و برای ۱/۵۰ ، نیروی پسا در مقادیر کم KC تحت تاثیر فرکانس قرار می‌گیرد. در مطالعه لی و همکاران از طرفی نسبت ضخامت به پهنا تاثیر قابل توجهی روی جرم افزوده نداشت. همچنین تاثیر شکل لبه‌های ورق روی ضرایب هیدرودینامیک بررسی شد طوری که مشخص گردید لبه‌های مستطیلی جرم افزوده بیشتری را ایجاد می‌کنند ولی ضریب نیروی پسا مستقل از شکل لبه بود. علاوه بر این تاثیر فاصله بین ورق‌ها در حالت آرایه دوتایی یکنواخت از لبه ورق‌ها نیز بررسی شد و مشخص شد که ضریب نیروی پسا یک ورق در حالت آرایه‌ای زمانی همانند حالت تک ورق است که نسبت فاصله به پهنا از مقدار ۱,۵ بیشتر باشد و این به علت عدم تداخل گردابه‌ها در فاصله‌ای بیشتر از مقدار ذکر شده است. البته در مورد ورق سوراخ‌دار این نسبت تغییر می‌کند(شکل ۱۵).



(الف)

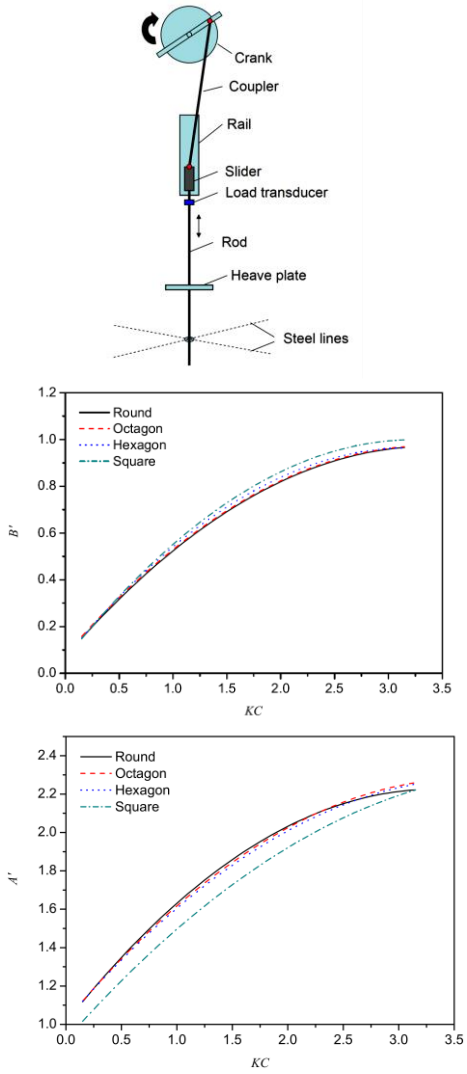
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]



شکل ۱۵- الف) نمای تجهیزات مورد استفاده ب) تاثیر فرکانس ج) تاثیر فاصله بین ورق‌ها روی ضرایب هیدرودینامیک[۴۹]

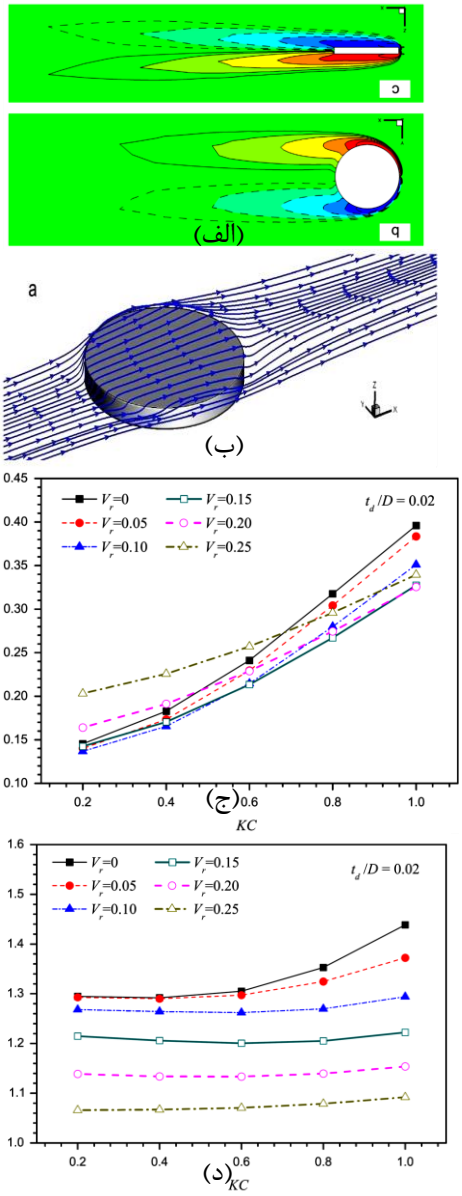
تیان و لی[۵۰] تاثیر نسبت ضخامت، شکل، شعاع لبه و تخلخل را در محدوده $0.15 \leq KC \leq 3.15$ روی جرم افزوده و میرایی بررسی کردند طوری که ورق نازک در محدوده $4/200 \leq {}^{t_d}/_{D} \leq 15/200$، جرم افزوده و میرایی بیشتری ایجاد می‌کرد. نتایج مشخص کرد که تفاوت مشاهده شده بین ضرایب هیدرودینامیک ورق‌های هشت وجهی و شش وجهی و دایره‌ای کم است. جرم افزوده ورق مربعی از سه ورق اشاره شده کمتر بوده در حالی‌که میرایی آن بیشتر است و همچنین جرم افزوده با تخلخل کاهش می‌یابد. تخلخل حدود ۱۰٪ میرایی بیشتر در $KC \lesssim 0.6$ ایجاد می‌کند و ورق هیو توپر، میرایی بیشتری در $KC > 0.75$ ایجاد می‌کند(شکل ۱۶).

علاوه بر موج وجود جریان‌های دریایی در یک راستا روی ضرایب هیدرودینامیک ورق هیو تاثیرگذار است. از این رو یانگ و همکاران[۵۱] ضرایب هیدرودینامیک ورق هیو را تحت جریان دائم با شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی در نرم‌افزار اوپن‌فوم بررسی کردند. سه نسبت ضخامت به قطر متفاوت ۰,۱،۰,۰۵ و ۰,۰۲ در نظر گرفته شد و جریان به موازت صفحه ورق اعمال شد. تاثیر سه پارامتر KC ، سرعت جریان کاهش یافته v_r و نسبت ضخامت به قطر روی ساختار جریان، نیروی پسا جریان، جرم افزوده و میرایی به صورت کیفی و مقداری در محدوده KC ۰تا۱ و v_r ۰ تا ۰,۲۵ مطالعه شد. بررسی‌ها نشان داد در حالت وجود جریان روی دیسک ثابت، الگوی جریان نسبت به صفحه مرکزی متقارن است و در حالت دیسک نوسانی بدون سرعت جریان افقی، الگوی جریان کلی نسبت به محور دیسک متقارن است. وجود جریان روی یک دیسک در حال نوسان گردابه‌هایی تکرار شونده، در پشت آن بوجود می‌آورد. ضریب نیروی پسا جریان در راستای صفحه دیسک با دامنه نوسانات دیسک تغییر می‌کند و متوسط زمانی آن با افزایش سرعت کاهش یافته، کاهش پیدا می‌کند و با افزایش KC، افزایش می‌یابد. ضریب جرم افزوده با افزایش v_r، کاهش و ضریب میرایی با افزایش KC، افزایش می‌یابد. تاثیر v_r روی جرم افزوده در $v_r < 0.05$ کم است و این تاثیر در نسبت ابعادی‌های کوچکتر دیسک مهم‌تر می‌شود(شکل ۱۷).



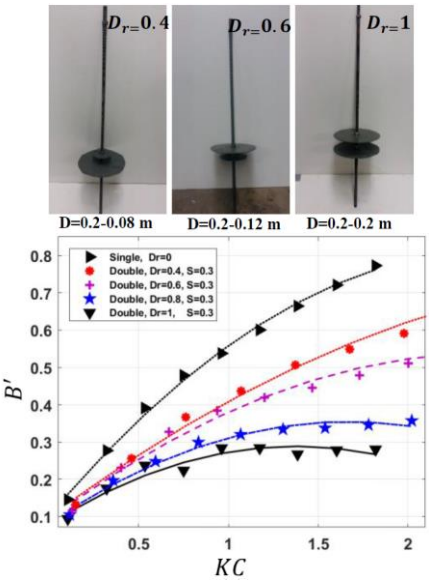
شکل ۱۶- نمای تجهیز برای ایجاد ارتعاشات اجباری و تاثیر شکل ورق روی ضرایب هیدرودینامیک[۵۰]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]

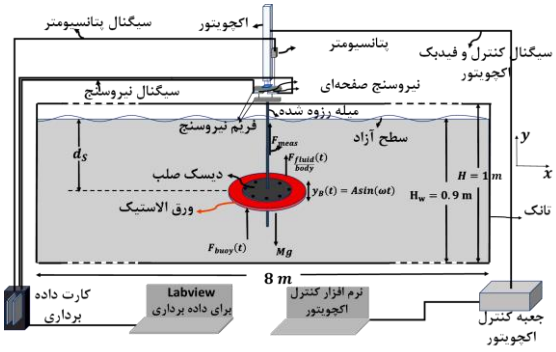


شکل ۱۷- الف)جریان عبوری از دیسک نوسانی ب)کنتور ورتیسیتی ج و د) تغییرات ضریب میرایی و جرم افزوده بر حسب KC و v_r [۵۱]

با توجه به تاثیر منفی فاصله کوچک بین دو ورق روی میزان جرم افزوده و میرایی که باعث تداخل شدید گردابه‌های دو دیسک مشابه مجاور یکدیگر می‌شود، انتظار می رود که با تغییر نسبت ابعاد دو ورق متوالی در یک آرایه چندتایی از ورق‌ها ضرایب هیدرودینامیک بهبود یابند. از این رو اباذری و همکاران[۵۲] در یک مطالعه جامع تاثیر نسبت ابعاد دو ورق متوالی و فاصله را در چیدمان تکی، دوتایی و سه‌تایی روی ضرایب هیدرودینامیک بررسی کردند. مشاهده شد که ضرایب هیدرودینامیک دو دیسک متوالی با ابعاد مختلف در فاصله کوچک در مقایسه با دو دیسک متوالی یکسان در همان فاصله بیشتر است (شکل ۱۸).



شکل ۱۸- چیدمان‌های دوتایی وتغییرات ضریب میرایی[۵۲]



شکل ۱۹- طرح جدید ورق ترکیبی صلب-الاستیک[۴۶, ۵۳]

ورق‌های هیو بکاربرده شده در تمامی تحقیقات منتشر شده و همچنین در حالت واقعی و صنایع دریایی کاملا صلب و غیر قابل انعطاف می‌باشند. نکته بسیار مهم این است که افزایش جرم افزوده همیشه نمی‌تواند منجر به دور شدن پریود طبیعی سازه از پریود نیروهای تحریک‌کننده باشد و حتی ممکن است باعث نزدیکی فرکانس طبیعی و تحریک به یکدیگر و نهایتا پدیده تشدید شود. لذا پیشنهاد طرحی جدید که صرفاً تمرکزش افزایش میرایی باشد می‌تواند راهکاری برای بهبود پاسخ سازه در این وضعیت باشد. وجود یک بخش انعطاف‌پذیر در لبه بیرونی ورق می‌تواند مانع از شتاب‌گیری حجم زیادی از ذرات سیال اطراف دیسک شود که به نوبه خود از افزایش شدید جرم افزوده در دامنه‌های بالای ارتعاشاتی جلوگیری می‌کند. از طرفی جابجایی بیشتر بخش انعطاف‌پذیر بیرونی امکان افزایش سرعت جابجایی لبه ایجاد کننده گردابه را فراهم می‌کند که منجر به افزایش میرایی در مقایسه با ورق با لبه صلب در یک دامنه ارتعاشاتی خاص خواهد شد. این طرح جدید توسط اباذری و همکاران[۴۶, ۵۳] که ترکیب یک دیسک صلب در مرکز و ورق الاستیک در بخش بیرونی است با آزمایشهای تجربی بررسی شد(شکل ۱۹). مشاهده شد میرایی و جرم افزوده در مقایسه با ورق کاملا صلب به ترتیب بیشتر و کمتر می‌شود. البته بایستی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]

حتما مد تغییر شکل متقارن محوری در دامنه و فرکانس ارتعاشات مد نظر تحریک شود تا منجر به افزایش میرایی ورق ترکیبی الاستیک-صلب نسبت به ورق کاملا صلب گردد.

۴- تحقیقات روی ورق متصل به استوانه در ارتعاشات دورانی

همانطور که بیان شد با توجه به اینکه ارتعاشات در جهت هیو اهمیت بیشتری نسبت به ارتعاشات زاویه‌ای رول و پیچ سکو دارد، تحقیقات زیادی روی ارتعاشات ورق‌ها در جهت انتقالی هیو انجام شده‌است. با این وجود تحقیقات محدودی نیز روی ویژگی‌های هیدرودینامیکی سازه ترکیبی استوانه و ورق میراکننده متصل به کف در جهت زاویه‌ای انجام شده است. خلاصه‌ای از تحقیقات صورت گرفته در این زمینه به صورت زیر می‌باشد:

نالایاراسو، سریراج و مولاری[۳۱] تاثیر شکل بدنه سکوی اسپار(کلاسیک، اسپار شش سلولی) را روی پریود طبیعی پیچ و هیو به صورت آزمایشگاهی با دیدگاه تست ارتعاشات آزاد به صورت عددی با نرم افزار انسیس آکوا بررسی کردند. میرایی از طریق تست ارتعاشات آزاد در تانک بدست آمد. آنها دریافتند که اسپار با بدنه بزرگ شده در قسمت پایینی، بزرگترین پریود طبیعی پیچ را دارد به عبارتی دیگر ممان اینرسی جرمی افزوده در این حالت بیشترین مقدار را دارد. در حالی که میرایی ماکزیمم در جهت پیچ برای سکوی اسپار هشت سلولی بیشتر است که منجر به کاهش قابل توجه پاسخ دینامیکی پیچ می‌شود.

یک مطالعه عددی و آزمایشگاهی روی ضرایب هیدرودینامیک پیچ و هیو و RAO مدل اسپار با شکل‌های گوناگون ورق‌های هیو توسط نالایاراسو و متایی[۳۲] انجام شد. نتایج مربوط به پریود طبیعی پیچ و ممان اینرسی جرمی افزوده مدل‌های در نظر گرفته شده بر اساس پاسخ مربوط به تست ارتعاشات آزاد توسط نرم افزار استار سی‌سی‌ام و تست‌های در تانک امواج بدست آمد. نتایج نشان داد که ممان اینرسی جرمی افزوده و میرایی استوانه با یک ورق هیو در مقایسه با استوانه تنها بیشتر است. علاوه بر این مشاهده شد که پاسخ پیچ سکوی اسپار با ورق هیو متصل شده نزدیک سطح آزاد باعث کاهش اثرات ناپایداری متیو می‌شود. این فرایند از طریق تست‌هایی با اعمال امواج منظم و روش پانل از طریق نرم افزار انسیس اکوا انجام شد.

میرایی و پریود طبیعی پیچ سیستم مبدل انرژی دارای ورق هیو مربوط به یک سکوی نیمه شناور با تست ارتعاشات آزاد توسط لیو وهمکاران[۸] بررسی شد. تست‌های آزمایشگاهی انجام شده روی مدل و شبیه‌سازی‌های عددی روی مدل‌های با مقیاس واقعی انجام شد.

ژو و لیم[۳۴] با تست‌های آزمایشگاهی ضرایب هیدرودینامیک دیسک متصل شده در یک فاصله دور از پاشنه استوانه را بررسی کردند. دیسک از طریق میله‌هایی به پاشنه متصل شده بود. ضرایب هیدرودینامیک زاویه‌ای پیچ از طریق تست ارتعاشات آزاد مشخص کرد که ضخامت و قطر ورق تاثیر جزئی روی میرایی زاویه‌ای و پریود طبیعی دارد در حالی که این پارامترها تاثیر قابل توجهی روی ضرایب هیو دارند. نهایتا، با انجام یک سری تست‌ها در تانک، آنها دریافتند که ورق هیو تاثیر بیشتری روی پاسخ هیو سکو در مقایسه با پاسخ پیچ سکو دارد.

میرایی و پریود طبیعی پیچ، سرج و رول مربوط به سکوی نیمه شناور خرپا-پانتون که ورق‌های هیو به آن متصل هستند از طریق تست ارتعاشات آزاد توسط سرینیواسان و همکاران[۵۴] بررسی شد. پاسخ رائو پیچ، سرج و رول تحت تحریک امواج تصادفی و منظم با نتایج عددی خطی تشعشعی/تفرق مقایسه شد که تطابق خوبی با هم داشتند. نتایج نشان داد که ورق هیو تاثیر مهمی روی پریود طبیعی رول و هیو گذاشته است.

ژو و لیم[۵۵] به صورت آزمایشگاهی پریود طبیعی و میرایی مدل استوانه‌ای تنها و استوانه متصل شده به ورق هیو را از طریق تست-های ارتعاشات آزاد بررسی کردند. مشاهده شد که ورق هیو تاثیر کمی روی پریود طبیعی پیچ در مقایسه با تاثیر قابل توجه آن روی پریود طبیعی هیو دارد. نهایتاً، مشاهده شد که پاسخ رائو هیو در مقایسه با پاسخ رائو پیچ به مقدار بیشتری تحت تاثیر قرار می‌گیرد. مطالعات انجام شده درزمینه ارتعاشات دورانی روی نمونه‌هایی انجام شده است که یک ورق به انتهای پایینی استوانه متصل شده و میرایی و فرکانس طبیعی حالت زاویه‌ای صرفاً از طریق ارتعاش ناشی از تست ارتعاشات آزاد در فرکانس طبیعی زاویه‌ای بدست آمده است. بر اساس تحقیقات منتشر شده در ارتعاشات انتقالی فرکانس و دامنه ارتعاشات روی ضرایب میرایی و جرم افزوده تاثیر گذار است. پیش-بینی می‌شود که میرایی و ممان اینرسی جرمی افزوده نیز به دامنه و فرکانس ارتعاشات وابسته باشند. برای بررسی این فاکتورها نیاز به انجام تست‌هایی تحت تحریک اجباری هارمونیک زاویه‌ای است که تاکنون انجام نشده است. در این راستا، اباذری[۵۶] برای اولین بار ضرایب هیدرودینامیک زاویه‌ای استوانه و دیسک متصل را تحت ارتعاشات اجباری به روش آزمایشگاهی بررسی کرد. به طور کلی ضرایب میرایی زاویه‌ای و ممان اینرسی جرمی افزوده روند تغییرات خطی را نسبت به دامنه و فرکانس ارتعاشات نشان دادند.

۵- نتیجه‌گیری

مروری روی تحقیقات منتشر شده برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی ورق‌ها نشان داد روش آزمایشگاهی در مقایسه با روشهای عددی دقت بالاتری دارد. همچنین مشخص شد که برای تعیین میرایی ورق‌ها روش جریان پتانسیل بواسطه فرض صفر بودن ویسکوزیته به هیچ وجه نمی‌تواند دقت خوبی داشته باشد و روشهای عددی بر پایه معادلات ناویر استوکس با دقت مناسبی می‌توانند ضرایب هیدرودینامیک ورق‌ها را تعیین کنند. با این وجود همچنان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]

خلا تحقیقاتی در بعضی بخشها وجود دارد که در ادامه موارد زیر برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد:

۱) به طور کلی حرکت خالص هیو یا حرکت خالص دورانی به صورت جداگانه برای یک ورق هیو متصل به یک سکو اتفاق نمی‌افتد. به عبارتی دیگر ارتعاشات هیو همزمان با ارتعاشات دورانی پیچ و رول رخ می‌دهد لذا تاثیر توام ارتعاشات کوپل زاویه‌ای و انتقالی روی ضرایب هیدرودینامیک منتجه یکی از نکاتی است که می‌تواند در آینده بررسی شود.

۲) در طرح جدید دیسک ترکیبی پیشنهاد شده توسط اباذری و همکاران[۵۳] اثرات تغییر ضخامت ورق الاستیک در راستای شعاعی می‌تواند نکته‌ای برای بهبود میرایی در دامنه‌ها و فرکانس‌های ارتعاشی بالاتر باشد.

۳) شبیه‌سازی عددی کوپل اجزامحدود-دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند دید بهتری از نحوه ایجاد گردابه‌ها در دیسک ترکیبی صلب-الاستیک بدهد.

۴) اثرات نزدیکی به مرز برای دیسک صلب و ترکیبی در یک تانک با ابعاد محدود و در دو فاصله مشخص از کف و سطح انجام شد. برای مطالعه جامع‌تر آزمایش‌ها می‌تواند برای فاصله‌های مختلف و به تدریج با نزدیک شدن به مرز انجام شود.

۵) اکثر آزمایشهای مرتبط با بررسی اثرات مرز در تانک کوچک انجام شده است. برای بررسی دقیق‌تر اثرات فرکانس روی دیسک نزدیک سطح آب بایستی اثرات موج بازتابی از دیواره-های تانک از بین برود که این نیازمند تست در یک تانک با ابعاد بسیار بزرگ است.

۶) در یک ورق مربعی با مساحت مشابه با ورق دایره‌ای سطح بیشتری از ورق در فاصله دورتر از محور دوران قرار می‌گیرد. این نکته می‌تواند تاثیر بیشتری روی افزایش ممان اینرسی جرمی افزوده و میرایی زاویه‌ای در یک دامنه جابجایی زاویه‌ای داشته باشد. لذا تعیین ضرایب هیدرودینامیک زاویه‌ای ورق مربعی و مقایسه آن با دیسک دایره‌ای برای کار تحقیقاتی آینده پیشنهاد می‌شود.

کلید واژگان

1- Spar platform
2-Tlp platform
3-Semi-submersible platform
4- Sum frequency
5- Difference frequency
6- Heave plate
7- Bilge keel
8- Swell wave
9- Two consecutive vortices
10- Leading edge
11- DNS
12- FDM
13- Independent
14- Interactive
15- Diffusion
16- Uni-directional
17- Mesh motion
18- Volume of fluid
19- Large eddy simulation
20- Taut mooring
21- Wamit
22- Ansys Aqwa
23- Free decay test
24- STAR-CCM
25- Scaling ratio
26- Solid
27- Porous
28- Domain decomposition
29- Least mean square
30- Open foam
31- Tapered
32- Chamfered

۶- مراجع

1- Kumar, C.S., *Offshore Structure Modeling*. Vol. 9. 1994: World Scientific.
2- Subrata, K.C. and S. Cliakrabarti, *Handbook of offshore engineering.* Vol I: Amsterdam: Elsevier Ocean Engineering Series, 2005.
3- Haslum, H. and O. Faltinsen. *Alternative shape of spar platforms for use in hostile areas*. in *Offshore technology conference*. 1999. Offshore Technology Conference.
4- Li, Y.-c., L. Cheng, and K. Thiagarajan. *Numerical estimation of hydrodynamic heave damping of a vertical cylinder with appendages* . in *The Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference*. 1999. International Society of Offshore and Polar Engineers.
5- 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.
6- *Wave Energy Devices*. 2016; Available from: http://www.alternative-energy-tutorials.com/wave-energy/wave-energy-devices.html.
7- Brown, A., J. Thomson, and C. Rusch, *Hydrodynamic Coefficients of Heave Plates, With Application to Wave Energy Conversion.* IEEE

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]

Journal of Oceanic Engineering, 2018. 43(4): p. 983-996.
8- Liu, K., H. Liang, and J. Ou, *Numerical investigation of a tuned heave plate energy-harvesting system of a semi-submersible platform.* Energies, 2016. 9(2): p. 82.
9- Green, M., *Anadarko's Lucius: Tapping a 'World-Class Reservoir'*. 2013.
10- Holmes, S., et al., *Heave plate design with computational fluid dynamics.* Journal of offshore Mechanics and Arctic engineering, 2001. 123(1): p. 22-28.
11- Thiagarajan, K.P., *Hydrodynamics of oscillating cylinders and disks at low Keulegan-Carpenter numbers*. 1993: University of Michigan.
12- 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.
13- 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.
14- Prislin, I., R. Blevins, and J. Halkyard, *Viscous damping and added mass of solid square plates*, in *proceedings of the 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering(OMAE).ASME*. 1998.
15- Lake, M., et al., *Hydrodynamic coefficient estimation for TLP and Spar structures.* Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2000. 122(2): p. 118-124.
16- Tao, L. and K. Thiagarajan .*The influence of edge sharpness on the heave damping forces experienced by a TLP column*. in *The Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. 2000. International Society of Offshore and Polar Engineers.
17- Tao, L., K. Thiagarajan, and L .Cheng, *On the parametric dependence of springing damping of TLP and Spar columns.* Applied Ocean Research, 2000. 22(5): p. 281-294.
18- Tao, L. and K. Thiagarajan, *Low KC flow regimes of oscillating sharp edges I. Vortex shedding observation.* Applied ocean research, 2003. 25(1): p. 21-35.
19- Tao, L. and K. Thiagarajan, *Low KC flow regimes of oscillating sharp edges. II. Hydrodynamic forces.* Applied ocean research, 2003. 25(2): p. 53-62.
20- Tao, L. and S. Cai, *Heave motion suppression of a Spar with a heave plate.* Ocean Engineering, 2004. 31(5): p. 669-692.
21- Tao, L., K.Y. Lim, and K. Thiagarajan, *Heave response of classic spar with variable geometry.* Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2004. 126(1): p. 90-95.
22- 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.
23- 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.
24- 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.
25- Lavrov, A. and C.G. Soares, *On the influence of damping plates on the vertical oscillations of cylinders*, in *Maritime Technology and Engineering*, G.S. Santos, Editor. 2015, Taylor & Francis Group: london. p. 1169-1176.
26- Zhang, S. and T. Ishihara, *Numerical study of hydrodynamic coefficients of multiple heave plates by large eddy simulations with volume of fluid method.* Ocean Engineering, 2018. 163: p. 583-598.
27- Seebai, T. and R. Sundaravadivelu, *Response analysis of spar platform with wind turbine.* Ships and Offshore Structures, 2013.
28- 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.
29- Jose, J., R.P. Selvam, and R. Sundaravadivelu. *Hydrodynamic Response of Spar with Disc*. in *Offshore Technology Conference-Asia*. 2014. Offshore Technology Conference.
30- Nallayarasu ,S. and K. Bairathi, *Hydrodynamic response of spar hulls with heave damping plate using simplified approach.* Ships and Offshore Structures, 2014. 9(4): p. 418-432.
31- Nallayarasu, S., R. Sreeraj, and M. Murali, *Effect of hull geometry on the hydrodynamic response of spar in regular waves.* Ships and Offshore Structures, 2014. 9(1): p. 22-37.
32- Nallayarasu, S. and T.P. Mathai, *Effect of Mathieu instability on motion response of Spar hull with heave damping plate.* Ships and Offshore Structures, 2016. 11(8 :(p. 833-846.
33- Subbulakshmi, A. and R. Sundaravadivelu, *Heave damping of spar platform for offshore wind turbine with heave plate.* Ocean Engineering, 2016. 121: p. 24-36.
34- 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.
35- Molin, B., *On the added mass and damping of periodic arrays of fully or partially porous disks.*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]

Journal of fluids and structures, 2001. 15(2): p. 275-290.
36- Vu, K.H., B. Chenu, and K.P. Thiagarajan. *Hydrodynamic damping due to porous plates*. in *Proceedings of the WSEAS International Conference on Fluid Mechanics, Corfu*. 2004.
37- Molin, B., F. Remy, and T. Rippol. *Experimental study of the heave added mass and damping of solid and perforated disks close to the free surface*. in *Proceedings of the IMAM Conference, Varna*. 2007.
38- Tao, L. and D. Dray, *Hydrodynamic performance of solid and porous heave plates.* Ocean Engineering, 2008. 35(10): p. 1006-1014.
39- Pistani ,F. and K. Thiagarajan, *Assessment of dynamic factors for subsea deployement from crane vessels*. 2006, Technical Report.
40- Molin, B. and F. Nielsen. *Heave added mass and damping of a perforated disk below the free surface*. in *Proceedings of the 19th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Cortona, Italy*. 2004.
41- 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.
42- He, H., A.W. Troesch, and M. Perlin. *Hydrodynamics of damping plates at small KC numbers*. in *IUTAM Symposium on Fluid-Structure Interaction in Ocean Engineering*. 2008. Springer.
43- 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.
44- 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.
45- 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.
46- abazari, a. and m. behzad, *Effects of free surface or floor wall on the hydrodynamic coefficients of the rigid and combined rigid–elastic heave plates in offshore platforms.* Journal Of Marine Engineering, 2019. 14(28): p. 39-50.
47- Shen, W., Y. Tang, and L. Liu. *Study on the Hydrodynamic Characteristics for Heave Plate Structure of Truss Spar*. in *ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. 2010. American Society of Mechanical Engineers.
48- Shen, W.-j., Y.-g. Tang, and L.-q. Liu, *Research on the hydrodynamic characteristics of heave plate structure with different form edges of a spar platform.* China Ocean Engineering, 2012. 26: p. 177-184.
49- Li, J., et al., *Experimental investigation of the hydrodynamic characteristics of heave plates using forced oscillation.* Ocean Engineering, 2013. 66: p. 82-91.
50- Tian, X., et al. *Experimental Investigations on the Hydrodynamic Characteristics of Heave Plate*. in *ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. 2013. American Society of Mechanical Engineers.
51- Yang, J., X. Tian, and X. Li, *Hydrodynamic characteristics of an oscillating circular disk under steady in-plane current conditions.* Ocean Engineering, 2014. 75: p. 53-63.
52- Abazari, A., M. Behzad, and K.P. Thiagarajan, *Hydrodynamic performance of multiple co-axial heave plates with different diameters.* Ships and Offshore Structures, 2019: p. 1-13.
53- Abazari, A., M. Behzad, and K.P. Thiagarajan, *Hydrodynamic Damping Enhancement by Implementing a Novel Combined Rigid-Elastic Heave Plate.* Journal of Marine Science and Technology, 2020.
54- Srinivasan, N., S. Chakrabarti, and R. Radha. *Damping-Controlled Response of a Truss-Pontoon Semi-submersible with heave-plates*. in *ASME 2005 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2005. American Society of Mechanical Engineers.
55- Zhu, L. and H. Lim, *Experimental Study on the Suppression of a Vertical Circular Cylinder with a Heave Plate.* 신재생에너지, 2016. 12(S1): p. 2-9.
56- Abazari, A., *Investigation of Hydrodynamic Coefficients of Array of Heave Plates under Translational and Rotational Oscillations*, in *Mechanical Engineering-*. 2019, Sharif University of Technology. PhD Thesis.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.12.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.65]