

توسعه یک مدل ریاضی غیر خطی برای شبیه‌سازی رفتار

بدنه‌های پروازی دو پله در امواج منظم

رسول نیازمند بیلندی^۱، عباس دشتی‌منش^{۲*}، ساسان توکلی^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه خلیج فارس، rasool.niazmand@mehr.pgu.ac.ir

^{۲*}استادیار هیدرومکانیک دریا، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، a.dashtimanesh@pgu.ac.ir

^۳کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، sasan_tavakoli@aut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۶/۵/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۶/۵)

چکیده

در سال‌های اخیر، مدل‌سازی دینامیک شناورهای پروازی پله‌دار به یکی از مباحث مهم در هیدرودینامیک شناورهای تندرو تبدیل شده است. در مقاله‌ی حاضر، یک مدل دینامیکی برای حرکات هیو و پیچ شناورهای پروازی پله‌دار در آب موج استخراج شده است. اساس مدل ریاضی، تئوری دو نیم‌بعدی و تغییرات مومنتوم در راستای طول شناور می‌باشد. مدل ریاضی ارائه شده، بدنه‌ی پروازی دوپله را به سه بخش تقسیم نموده و با فرض تئوری ویک خطی در پله‌ها، جرم افزوده و سطوح خیس را تشخیص می‌دهد. از آنجایی که هیچگونه داده عددی و آزمایشگاهی برای ارزیابی دینامیک شناور پله‌دار در موج در دسترس نیست، صحت مدل ریاضی با استفاده از نتایج شناورهای بدون پله در موج مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقایسه‌ها بیانگر قابلیت مدل ریاضی در ارزیابی مناسب دینامیک بدنه‌های پروازی در دریای موج هستند. در نهایت، مدل ریاضی توسعه داده شده برای محاسبه‌ی دینامیک شناور دوپله در موج مورد استفاده قرار گرفته است و پارامترهای مؤثر بر دینامیک شناور در موج مطالعه شده است.

واژه‌های کلیدی

شناور پروازی دوپله، مدل ریاضی، تئوری دو و نیم‌بعدی، جرم افزوده، امواج منظم.

Development of a Nonlinear Mathematical Model to Simulate Two Stepped Planing Hulls Behaviors in Regular Waves

¹Rasool Niazmand Bilandi, ^{2,*}Abbas Dashtimanesh, ³Sasan Tavakoli

¹MSc Student of Hydromechanics, Persian Gulf University, rasool.niazmand@mehr.pgu.ac.ir

^{2,*}Assistant Professor of Marine Hydrodynamics, Engineering Department, Persian Gulf University, a.dashtimanesh@pgu.ac.ir

³Student of Hydromechanics, Amirkabir University of Technology, sasan_tavakoli@aut.ac.ir

(Submitted: 2017/Aug/9; Accepted: 2017/Aug/27)

Abstract

In recent years, dynamic modeling of stepped planing hull has become one of important topics in hydrodynamics science. In this paper, a dynamic model has been extracted for heave and pitch motions of stepped planing craft in the raging water. The basic of mathematical model are 2D+t theory and momentum variation in boat's length. Presented mathematical model divides the two stepped hull to three parts and by assuming linear wake theory for steps, added mass and wetted surfaces are recognized. Since, numerical and experimental data not available to evaluate dynamic of stepped planing hull in wave, accuracy of the mathematical model is evaluated using the result of non-stepped planing hull in wave. Comparisons prove the ability of presented mathematical model for suitable performance evaluation of two stepped hulls in raging water. Finally, mathematical model developed has been used to calculate dynamic of two stepped craft and parameters affecting has been studied on vessel dynamic in wave.

Keywords

Stepped Planing Craft, Mathematical Model, 2D+t Theory, Added Mass, Regular Wave.

امروزه، طراحان شناورهای پروازی برای دستیابی به فرم بدنه‌ی مناسب برای کاهش مقاومت، که به طبع آن افزایش سرعت را در بر خواهد داشت، در تلاش هستند. برای دستیابی به فرم بدنه‌ی مناسب، تغییراتی نظیر ایجاد پله، چاین، تونل و ... که سبب افزایش سرعت و بهبود عملکرد شناور پروازی خواهد شد، بر روی بدنه ایجاد کردند. یکی از ویژگی‌های بدنه‌های پروازی که کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است، بدنه‌های پروازی پله‌دار است. پله به دلیل مزیت کاهش میانگین درگ، به طور گسترده در بدنه‌های تندرو مسابقه‌ای، شناورهای تندرو جنگی و قایق‌های موتوری مورد توجه طراحان قرار گرفته است. موقعیت و هندسه پله به نحو مؤثری موقعیت نیروی لیفت شناور را تعیین می‌کند [۱]. موقعیت پله می‌تواند در ترکیب با مکان مرکز جرم تعیین شود [۱]. هندسه پله می‌تواند به صورت عرضی یا وی‌شکل بر روی بدنه ایجاد شود و بدنه را به چند قسمت جلو، عقب و میانی تقسیم کند. طراحی کف با یک پله یا مجموعه‌ای از پله‌ها سبب ایجاد چندین سطح پروازی کوچک می‌شود. شناور بر روی این سطوح پروازی با استفاده از نیروی لیفت قرار خواهد گرفت. معمولاً، لیفت بخش جلویی، یا لیفتی که در مرکز فشار شناور وارد می‌شود، ۹۰ درصد لیفت موردنیاز را تولید می‌کند. بنابراین، بخش پشتی باید بتواند ۱۰ درصد لیفت باقیمانده را فراهم آورد تا شناور از نظر عمودی و حول محور طولی پایدار باقی بماند [۲]. به دلیل اینکه لیفت به چندین سطح در طول بدنه وارد می‌شود، پایداری طولی افزایش می‌یابد.

پیش‌بینی حرکات شناورهای پروازی پله‌دار در دریای مواج یکی از موضوعات مهم در هیدرودینامیک شناورهای تندرو است. این شناورها در سرعت‌های بالا دارای رفتار دینامیکی پیچیده‌ای بوده و از ناپایداری‌های عرضی و قائم زیادی رنج می‌برند. لذا، طراحی یک شناور پروازی پله‌دار در مراحل مقدماتی نیازمند پیش‌بینی درستی از رفتار شناور بوده تا با استفاده از آن، از عدم وقوع چنین ناپایداری‌هایی جلوگیری نمود. کوچک‌ترین تغییرات در هندسه، موقعیت مرکز ثقل و وزن شناور می‌تواند تأثیرات زیادی بر رفتار شناور داشته باشد و آن را به یک شناور ناپایدار تبدیل کند. به همین دلیل پیش از طراحی،

روش‌های ریاضی خاصی برای پیش‌بینی رفتار شناور پروازی پله‌دار نیاز هستند.

در طول سال‌های گذشته مطالعات و روش‌های تحلیلی زیادی بر روی شناورهای پروازی پله‌دار صورت گرفته است. از جمله‌ی این مطالعات می‌توان به مطالعه‌ی ساویتسکی [۳]، ساویتسکی و مورابیتو [۴]، سواهن [۵]، ماسکایف [۶]، دانلسن و اسرومکوئیست [۱]، افشین لونی و همکاران [۷]، لی و همکاران [۸] و دشتی‌منش و همکاران [۹] اشاره کرد.

تحقیقات و مطالعات انجام‌شده در حوزه‌ی شناورهای پروازی از اواخر دهه‌ی ۲۰ میلادی آغاز شده است. بررسی حرکات پروازی در موج، نسبت به عملکرد سرعت ثابت شناور در آب آرام دارای پیچیدگی‌های زیادی می‌باشد. اولین بار در سال ۱۹۲۹، فان کارمن [۱۰] روابطی برای محاسبه‌ی نیروی شناور پروازی قبل از خیس شدن چاین ارائه داد. میلیتزکی [۱۱] و اشنایدزر [۱۲]، سعی داشتند روابطی را با استفاده از روابط فان کارمن [۱۰] بعد از خیس شدن چاین ارائه دهند. با این حال، هر دوی این مطالعات صرفاً با هدف محاسبه‌ی نیروی شناور در موج قابل استفاده بودند و حرکات شناور را مورد تحلیل قرار ندادند. در سال ۱۹۶۴، ساویتسکی [۳]، اعلام کرد که در زمینه‌ی دینامیک شناور، مطالعات آزمایشگاهی و تئوری بسیار محدود بوده و مدل خاصی را نمی‌توان برای دینامیک شناورهای پروازی ارائه داد. در سال ۱۹۶۹، در آزمایشگاه داویدسون آمریکا، مطالعه‌های فریدیزما [۱۳]، [۱۴]، محرکی در زمینه مطالعه‌ی حرکات عمودی شناورهای پروازی بود. بعد از مطالعات فریدیزما [۱۳]، [۱۴]، که جمع‌بندی آن توسط ساویتسکی و بران [۱۵] انجام شد، محققان دیگر پژوهش‌ها و آزمایشگاه‌های دنیا، به سمت انجام آزمایشاتی برای بررسی دینامیک شناورهای پروازی حرکت کردند. در ابتدا مارتین [۱۶]، یک مدل ریاضی برای دینامیک شناور پروازی با زاویه‌ی رأس ثابت در امواج روبرو ارائه داد که پایه و اساس کاملاً تئوری داشت. ضرایب شناور در این مدل کاملاً خطی در نظر گرفته شده بودند. چگونگی محاسبه‌ی این ضرایب یک سال قبل توسط خود او [۱۷] ارائه شده بود. نتایج به دست آمده توسط مارتین [۱۶] نشان‌دهنده‌ی صحت این روش با نتایج آزمایشگاهی فریدیزما [۱۳]، [۱۴] بود. محاسبات عددی مارتین [۱۶]، محدود به ترکیب حرکات

سرج، هیو و پیچ بوده است. مدل ارائه شده توسط مارتین [۱۶]، اولین مدلی بود که برای دینامیک شناورهای پروازی ارائه شده بود. هر چند این مدل ذاتاً خطی بود و با تئوری‌های بسیاری از محققان که حرکات شناور پروازی را غیر خطی می‌دانستند، مطابقت نداشت. بنابراین، زارنیک [۱۸]، با بهره‌گیری از نحوه‌ی مدل‌سازی‌های نیرو توسط مارتین [۱۶]، یک مدل ریاضی غیرخطی را برای شناورهای پروازی ارائه داد. مدل وی، از اثرات پاشنه ترانسوم صرف نظر می‌کرد، اما کاملاً غیرخطی بود. وی به جای مشتق‌گیری از نیروها و محاسبه‌ی ضرایب، نیروی هیدرودینامیکی وارد بر شناور را در هر لحظه محاسبه می‌نمود. لذا مدل وی، از روش حل زمانی بهره می‌برد و اساس غیرخطی بودن را حفظ می‌نمود. امروزه، مدل زارنیک [۱۸] مبنای بسیاری از مطالعات در زمینه‌ی تحلیل دینامیک شناورهای پروازی بوده و قابلیت بررسی حرکات در امواج منظم و نامنظم را دارا می‌باشد. علاوه بر این، این مدل از دقت بسیار خوبی برخوردار است. بعد از توسعه‌ی مدل زارنیک [۱۸]، اکثر محققان و دانشمندان سعی کردند این مدل را بهبود دهند. از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعه فن دیزن [۱۹]، مهدی سید [۲۰] و روسلی [۲۱] اشاره کرد. در این مطالعات بیشتر به بررسی حرکات شناور پروازی در صفحه‌ی قائم پرداخته شده است. اما برای یک شناور پروازی، نیاز است تمامی حرکات با هم در نظر گرفته شود. در سال ۲۰۰۸، سابستیانی و همکاران [۲۲] برای اولین بار حرکت رول همراه با هیو پیچ را مدل‌سازی کردند. در سال ۲۰۱۳، قدیمی و همکاران [۲۳، ۲۴] با استفاده از ایده‌ی اصلی روش سابستیانی و همکاران [۲۲]، مدل‌های چهاردرجه و شش‌درجه‌ای را برای دینامیک شناورهای پروازی در آب منظم و نامنظم توسعه دادند. در سال ۲۰۱۶، توکلی و همکاران [۲۵] با استفاده از تئوری دو و نیم‌بعدی، رویکرد توزیع فشار نامتقارن و مدل زارنیک [۱۸]، یک مدل ریاضی غیرخطی برای کوپل حرکات هیو و پیچ ارائه دادند. این مطالعه را به نوعی می‌توان آخرین مطالعه‌ی ریاضی دانست که حرکت رول را در کنار حرکات هیو و پیچ مورد بررسی قرار داده است.

در سال ۲۰۱۷، دشتی‌منش و همکاران [۹] و نیازمند بیلندی و همکاران [۲۶] مدل ریاضی برای شناورهای پروازی پله‌دار ارائه دادند. اساس روابط مدل ریاضی

دشتی‌منش و همکاران [۹] روابط ساویتسکی و تئوری ویک خطی بود و همچنین، اساس روابط مدل ریاضی نیازمند بیلندی و همکاران [۲۶]، روابط آلگارین و تاکسون [۲۷]، تئوری دو و نیم‌بعدی و ویک خطی بود. آنها با بهره‌گیری از معادلات مورد استفاده برای شناورهای بدون پله‌ی پروازی با تغییرات قابل قبول، معادلات را برای شناورهای پروازی پله‌دار تعمیم دادند و به نتایج قابل قبولی دست یافتند.

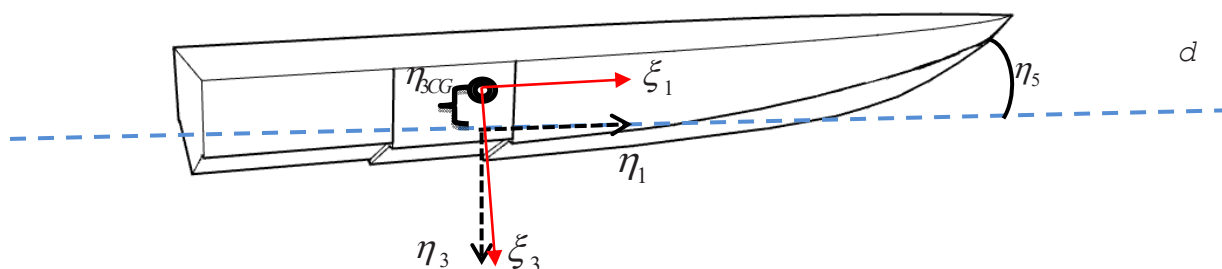
در این مقاله، با گسترش معادلات دینامیک شناور بدون پله، یک مدل ریاضی جدید برای بررسی دینامیک شناور پروازی دوپله در موج پایه‌ریزی گردیده است. در شناورهای پله‌دار، جریان، بعد از عبور از پله یک ناحیه‌ی خشک روی بدنه ایجاد می‌کند. پیش‌بینی درست پروفیل ویک ایجادشده در اثر وجود پله، تأثیر زیادی در صحت روابط موجود خواهد داشت. در این مقاله، با فرض تئوری ویک خطی، جریان عبور از پله پیش‌بینی شده است. مدل ریاضی ارائه شده بر مبنای مدل ریاضی زارنیک [۱۸] و تئوری دو و نیم‌بعدی و ویک خطی بنا شده و توسعه‌ی این روابط را برای بدنه‌های پله‌دار ارائه می‌دهد. جهت اعتبارسنجی روش ارائه‌شده، نتایج حاصل از مدل ریاضی با نتایج آزمایشگاهی مدل‌های فریدیزما مقایسه شده است. در نهایت، دامنه‌ی حرکات هیو و پیچ شناور دو پله‌ی C_2 از سری ساوتهمپتون [۲۸] در تعدادی موج منظم و سرعت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- حرکت شناور پروازی پله‌دار در صفحه‌ی قائم

برای مدل‌سازی حرکت شناور پروازی پله‌دار، فرض می‌شود که شناور تحت یک زاویه‌ی تریب τ در حال حرکت رو به جلو با سرعت U می‌باشد. در این شرایط، تنها دو حرکت هیو و پیچ برای شناور در نظر گرفته خواهد شد و شناور در زاویه‌ی هیل صفر درجه قرار می‌گیرد. شماتیک حرکت شناور پروازی دوپله در این شرایط در شکل ۱ آمده است. برای دستیابی به مدل نهایی، دو دستگاه مختصات، در نظر گرفته می‌شوند. دستگاه اول، سیستمی با نماد $G_1G_2G_3$ می‌باشد که این سیستم راستگرد بوده و در مرکز ثقل شناور قرار گرفته و تمامی حرکات شناور را دارا می‌باشد. محور G_1 موازی با خط کیل شناور بوده و راستای مثبت آن سینه شناور در نظر گرفته شده است. محور G_2 به سمت راست شناور دارای مقدار

حرکات نوسانی شناور را دارا نمی‌باشد. جابجایی مرکز ثقل نسبت به مختصات $O\eta_1\eta_2\eta_3$ سنجیده می‌شود. این سیستم‌های مختصات در شکل ۱ نمایش داده شده است.

مثبت و محور ξ_3 به سمت کف شناور است. دیگر سیستم مختصات مورد نظر، سیستم مختصات $O\eta_1\eta_2\eta_3$ که روی تقاطع خط آب آرام با مکان طولی مرکز ثقل شناور قرار گرفته است. راستای η_3 راستای عمود بر خط آب آرام بوده و به سمت پایین مثبت می‌باشد. این سیستم با سرعت پیشروی شناور جابه‌جا شده، اما هیچ کدام از



شکل (۱): سیستم مختصات یک بدنه‌ی پروازی دوپله.

$$r(\eta_1, \eta_2, t) = A \cos(k\eta_1 \cos \mu + k\eta_2 \cos \mu - \omega_e t + \varepsilon) \quad (3)$$

نوشته می‌شود که در آن A دامنه موج، k عدد موج، ω_e فرکانس برخورد موج و ε فاز موج می‌باشد. توسعه‌ی یک مدل ریاضی برای محاسبه‌ی این نیروها، از اهداف این مقاله خواهد بود. برای محاسبه‌ی این نیروها از تئوری دو و نیم‌بعدی استفاده شده است.

۳- تئوری دو و نیم‌بعدی

برای مدل‌سازی حرکات شناور پروازی دوپله در صفحه قائم از تئوری دو و نیم‌بعدی استفاده شده است. برای این منظور برای هر صفحه‌ی پروازی، یک صفحه‌ی عرضی ثابت در نظر گرفته شده و فرض می‌شود که شناور در حال گذر از این صفحات عرضی است. تعداد صفحات پروازی به تعداد پله‌های شناور پروازی بستگی دارد. برای یک شناور با دو پله، تعداد سه صفحه‌ی پروازی وجود خواهد داشت. به دلیل یکسان بودن مقاطع در طول شناور، تحلیل حرکت شناور معادل با ورود یک گوه به سطح آب خواهد بود. در واقع، با انتگرال‌گیری فشار یا نیروی وارد بر مقاطع گوه‌ای شکل در زمان‌های مختلف، می‌توان توزیع نیروی وارد بر کل بدنه‌ی شناور در یک زمان مشخص را به دست آورد. با استفاده از این تئوری، قادر خواهیم بود محاسبات را از حالت سه‌بعدی به شرایط

با در نظرگیری دستگاه بیان‌شده و همچنین، حضور موجی که از روبرو به شناور برخورد می‌کند، می‌توان معادلات کوپل‌شده‌ی شناور پروازی دوپله را در دو درجه آزادی، به صورت رابطه‌های زیر نوشت:

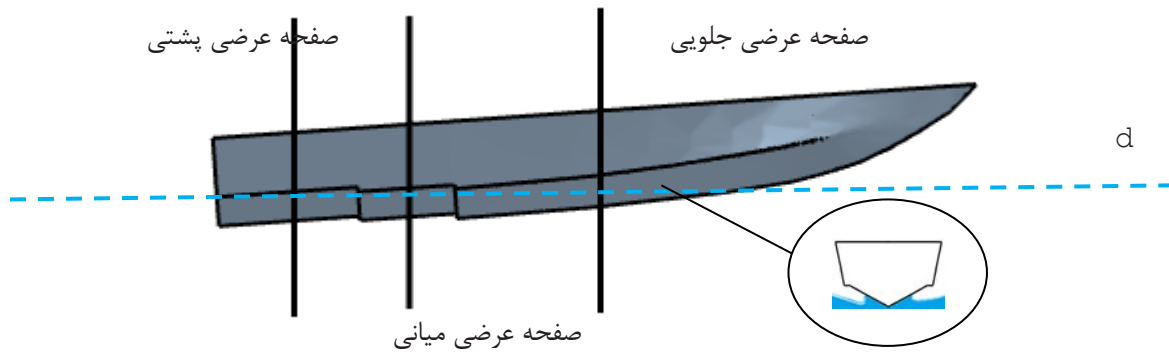
$$M_{33}\ddot{\eta}_{3CG}(t) = F_3(t) = \sum_{i=1}^3 F_{3R_i}(t) + F_{3H_i}(t) + F_{3W_i}(t) \quad (1)$$

$$I_{55}\ddot{\eta}_5(t) = F_5(t) = \sum_{i=1}^3 F_{5R_i}(t) + F_{5H_i}(t) + F_{5W_i}(t) \quad (2)$$

که در آن اندیس R نماد نیروهای بازگرداننده، اندیس H بیان‌کننده‌ی نیروهای هیدرودینامیکی و اندیس W نشانگر نیروهای حاصل از موج می‌باشد. در مدل‌سازی حرکات فرض می‌شود که نیروهای درگ و تراست از مرکز ثقل شناور می‌گذرد. در این حالت، فرض می‌شود شناور در دریایی مواج با موج منظم و تیزی کوچک که از روبرو بر شناور وارد می‌شود، قرار داشته باشد. با این فرضیات می‌توان از تئوری خطی امواج برای بررسی نیروی موج منظم استفاده کرد. بالاآمدگی سطح آزاد نسبت به دستگاه $O\eta_1\eta_2\eta_3$ به صورت رابطه‌ی

نیم‌بُعدی نمایش داده شده است.

دو بُعدی تقلیل کنیم. در شکل ۲ مفهوم تئوری دو و



شکل (۲): مفهوم تئوری دو بُعدی یک بدنه‌ی پروازی دوپله.

$$b_i = \frac{\pi}{2} d_i \cot(\beta_i + \beta_{L_i}) \quad (i = 1, 2, 3)$$

(۷)

که در آن، k_a ضریب جرم افزوده و b نیم‌عرض خیس‌شده‌ی لحظه‌ای هر مقطع از صفحات پروازی می‌باشد که با استفاده از بالامدگی واگنر از رابطه‌ی

$$b_i = \frac{\pi}{2} d_i \cot(\beta_i + \beta_{L_i}) \quad (i = 1, 2, 3)$$

(۸)

قابل محاسبه است. در آن i نمایانگر تعداد صفحه‌های پروازی، β زاویه رأس، β_L زاویه رأس محلی و d ارتفاع خیس‌شده‌ی مقطع می‌باشد که از رابطه‌ی

$$d_i = \frac{h_{wi}}{\cos(\eta_5 + \tau_i) - \frac{dr}{d\eta_1} \sin(\eta_5 + \tau_i)}$$

$$(i = 1, 2, 3)$$

(۹)

محاسبه شده است. در آن i نمایانگر تعداد صفحات پروازی، τ زاویه‌ی تریم محلی که در شکل ۳ نمایش داده شده است. h_w عمق غوطه‌ور هر مقطع عرضی در صفحه‌های پروازی می‌باشد که از رابطه‌ی

$$h_{wi}(\xi_1, \xi_3) = \eta_{3CG}(t) - \xi_1 \sin(\eta_5 + \tau_i) + \xi_3 \cos(\eta_5 + \tau_i) - r(\xi_1, t) \quad (i = 1, 2, 3)$$

(۱۰)

قابل محاسبه است که در آن r ارتفاع لحظه‌ی موج در هر مقطع عرضی است.

۴- محاسبه‌ی نیروهای وارد بر یک مقطع دو بُعدی به سطح آب

برای هر مقطع دو بُعدی از شناور، با در نظرگیری ورود گوه به آب می‌توان نیروی عمودی در اثر برخورد در نظر گرفت که برای هر مقطع از صفحه‌های پروازی به صورت مجزا از رابطه‌ی

$$f_i(\xi_1) = -\left\{ \frac{D}{Dt} (m_a V_i(\xi_1)) + C_{D,C} \rho b V_i(\xi_1) \right\} \quad (i = 1, 2, 3)$$

(۴)

قابل محاسبه است. که در آن V سرعت برخورد نسبی در هر مقطع از شناور می‌باشد. در این رابطه، نیروی عمودی ترکیبی به صورت ترکیبی از تغییرات مومنوم و درگ عرضی ($C_{D,C}$) می‌باشد. در مسأله حاضر گوه به صورت متقارن در حال ورود به آب بوده و جرم افزوده آن هر لحظه محاسبه می‌شود. جرم افزوده یک مقطع گوه‌ای شکل، به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$m_a = k_a \frac{\pi}{2} \rho b^2$$

(۵)

$$\frac{dm_a}{dt} = m_a = k_a \pi \rho b \dot{b}$$

(۶)

که در آن، k_a ضریب جرم افزوده و b نیم‌عرض خیس‌شده‌ی لحظه‌ای هر مقطع از صفحه‌های پروازی می‌باشد که با استفاده از بالامدگی واگنر از رابطه‌ی

$$f_{HS_i} = \frac{d_i}{2} \rho b_i \quad (i = 1, 2, 3)$$

(۱۶)

قابل محاسبه است.

زمانی که چاین شناور خیس شود، مقدار جرم افزوده و تغییرات آن در واحد زمان از رابطه‌های

$$m_a = k_a \frac{\pi}{2} \rho b_{max}^2 = cte$$

(۱۷)

$$\frac{dm_a}{dt} = 0$$

(۱۸)

تعیین شده است که در آن، b_{max} نیم‌عرض در محل چاین است.

تمامی فرمول‌های بالا برای بدنه‌ی جلویی شناور دوپله صادق است. به همین صورت، امکان محاسبه‌ی بدنه‌های میانی و پشتی وجود خواهد داشت. به این صورت که با فرض تئوری و یک خطی، جدایش جریان از پله‌ها را خطی فرض شده است. با استفاده از این فرض، طول خشک بدنه‌ی حاصل از وجود پله با استفاده از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$Ldry_j = \frac{H_j}{\tan(\eta_5 + \tau_j)} \quad (j=1, 2)$$

(۱۹)

که در آن H ارتفاع پله و j تعداد پله‌ها می‌باشد.

۵- نیروهای وارد بر شناور پروازی دوپله

نیروهای نهایی وارد بر شناور دوپله، با انتگرال‌گیری از نیروی وارد بر مقاطع نواری دویعدی به دست آمده است. یک بدنه‌ی پروازی با دوپله از سه سطح پروازی با ویژگی‌های پروازی منحصر به فرد تشکیل شده است. در شکل ۳ نیروهای وارد بر یک مقطع از سطوح پروازی یک شناور دوپله نمایش داده شده است. این نیروها حاصل از حرکات سرج و هیو و پیچ هستند که به ترتیب ارائه می‌شوند.

با جایگزینی رابطه‌ی جرم افزوده در معادله‌ی ۴، نیروی عمودی که بر هر یک از سطوح پروازی خیس شده به صورت مجزا وارد می‌شود، با استفاده از رابطه‌ی

$$\frac{D}{Dt}(m_{ai} V_i(\xi_1)) = m_{ai} \dot{V}_i + V_i \dot{m}_{ai} - U_i \frac{\partial}{\partial \xi_1}(m_{ai} V_i) \quad (i = 1, 2, 3)$$

(۱۱)

قابل محاسبه است که در آن U و \dot{V} برای هر یک از مقاطع صفحه‌های پروازی با استفاده از روابط

$$U_i(\xi_1, t) = \eta_{ICG}(t) \cos(\eta_5 + \tau_i) - \{ \eta_{3CG}(t) - w_z(\xi_1, t) \} \sin(\eta_5 + \tau_i) \quad (i = 1, 2, 3)$$

(۱۲)

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(\xi_1, t) = & -\dot{w}_z(\xi_1, t) \cos(\eta_5 + \tau_i) + \\ & \dot{\eta}_5(\xi_1, t) (-\dot{\eta}_{3CG}(\xi_1, t) \sin(\eta_5 + \tau_i) \\ & + U(\xi_1, t) \cos(\eta_5 + \tau_i)) + \\ & w_z(\xi_1, t) \dot{\eta}_5(\xi_1, t) \sin(\eta_5 + \tau_i) \quad (i = 1, 2, 3) \end{aligned}$$

(۱۳)

محاسبه شده است. در آن w_z برای هر یک از صفحه‌های پروازی از رابطه‌ی

$$w_{z_i} = -r_o \omega \times \sin(k(\eta_{ICG} + \xi_1 \cos(\eta_5 + \tau_i) + \xi_3 \sin(\eta_5 + \tau_i) + ct)) \quad (i = 1, 2, 3)$$

(۱۴)

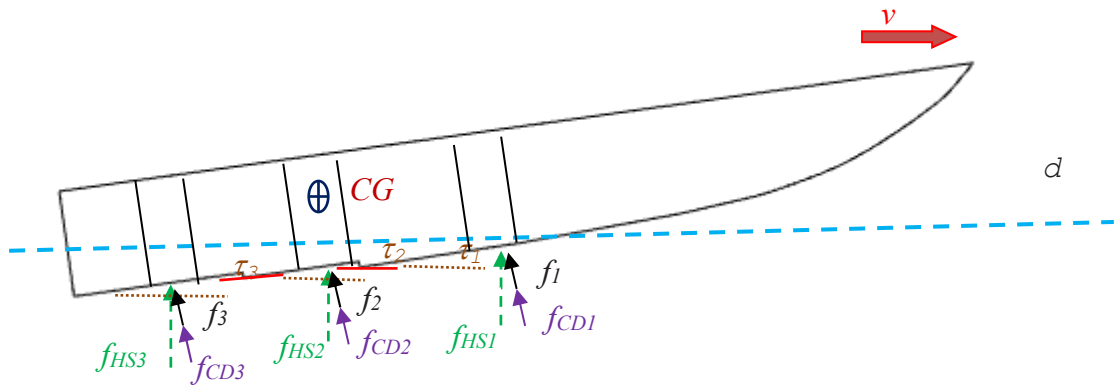
محاسبه شده است که در آن، r_o دامنه موج، k عدد موج و C سرعت موج هستند. لیفت ناشی از درگ جریان در هر مقطع از صفحه‌های پروازی با استفاده از رابطه‌ی

$$f_{CD_i} = C_D \rho b_i V_i^2 \quad (i = 1, 2, 3)$$

(۱۵)

قابل محاسبه است که در آن C_D ضریب درگ، ρ چگالی سیال و b نیم‌عرض خیس‌شده هر مقطع می‌باشند.

هر مقطع از شناور یک نیروی هیدرواستاتیکی وجود دارد که برای مقاطع صفحه‌های پروازی به صورت مجزا با رابطه‌ی



شکل (۳): نیروهای وارد بر یک بدنه‌ی پروازی دوپله.

سرج شده است. به طور مشابه نیروی وارد در جهت عمود یا هیو برای همه سطوح پروازی از رابطه‌ی

$$\begin{aligned}
 F_z(t) &= \sum_{i=1}^3 \int_{L_i} (f_i + f_{CDi}) \sin(\eta_B + \tau_i) d\xi_i + \\
 \int_{L_i} f_{HDi} d\xi_i &= \sum_{i=1}^2 -M_{a_i}(\xi_i, t) \cos^2(\eta_B + \tau_i) \ddot{\eta}_B \\
 &+ Q_{a_i}(\xi_i, t) \cos(\theta + \tau_i) \dot{\eta}_B + \\
 &M_{a_i}(\xi_i, t) i(\dot{\eta}_{BCG}(\xi_i, t) \sin(\eta_B + \tau_i) - \\
 &\dot{\eta}_{CG}(\xi_i, t) \cos(\eta_B + \tau_i)) + \\
 &\left\{ \int_{L_i} m_{a_i}(\xi_i, t) \frac{dw_{z_i}(\xi_i, t)}{dt} d\xi_i \right\} \cos(\eta_B + \tau_i) - \\
 &\left(\int_{L_i} m_{a_i}(\xi_i, t) w_{z_i}(\xi_i, t) d\xi_i \right) \sin(\eta_B + \tau_i) - \\
 &\left(\int_{L_i} m_{a_i}(\xi_i, t) V_i \frac{dw_{z_i}(\xi_i, t)}{d\xi_i} d\xi_i \right) \sin(\eta_B + \tau_i) + \\
 &\left(\int_{L_i} m_{a_i}(\xi_i, t) U_i(\xi_i, t) \frac{dw_{z_i}(\xi_i, t)}{d\xi_i} d\xi_i \right) \cos(\eta_B + \tau_i) \\
 &- U_i(\xi_i, t) V(\xi_i, t) \rho m_{a_i}(\xi_i, t) \Big|_{\text{end of step or transom}} \\
 &- \left(\int_{L_i} \dot{m}_{a_i}(\xi_i, t) V_i(\xi_i, t) d\xi_i \right) - \\
 &\left(\int_{L_i} \rho C_{D,C} b_i V_i^2(\xi_i, t) d\xi_i \right) \cos(\eta_B + \tau_i) + \int_{L_i} \rho l_i b d\xi_i
 \end{aligned}
 \tag{۲۱}$$

نیروی هیدرودینامیکی نهایی، در اثر حرکت سرج برای هر صفحه‌ی پروازی به صورت مجزا با انتگرال‌گیری از نیروی وارد بر مقاطع دوطبندی در راستای طول شناور محاسبه شده است. انتگرال‌گیری از روابط و جایگذاری شتاب نسبی در روابط منجر به حصول رابطه‌ی

$$\begin{aligned}
 F_x(t) &= \sum_{i=1}^3 \int_{L_i} (f_i + f_{CDi}) \cos(\eta_B + \tau_i) d\xi_i + \\
 \int_{L_i} f_{HDi} d\xi_i &= \sum_{i=1}^2 -M_{a_i}(\xi_i, t) \cos^2(\eta_B + \tau_i) \ddot{\eta}_B \\
 &+ Q_{a_i}(\xi_i, t) \cos(\theta + \tau_i) \dot{\eta}_B \\
 &+ M_{a_i}(\xi_i, t) i(\dot{\eta}_{BCG}(\xi_i, t) \sin(\eta_B + \tau_i) \\
 &- \dot{\eta}_{CG}(\xi_i, t) \cos(\eta_B + \tau_i)) \\
 &+ \left\{ \int_{L_i} m_{a_i}(\xi_i, t) \frac{dw_{z_i}(\xi_i, t)}{dt} d\xi_i \right\} \cos(\eta_B + \tau_i) \\
 &- \left(\int_{L_i} m_{a_i}(\xi_i, t) w_{z_i}(\xi_i, t) d\xi_i \right) \sin(\eta_B + \tau_i) \\
 &- \left(\int_{L_i} m_{a_i}(\xi_i, t) V_i \frac{dw_{z_i}(\xi_i, t)}{d\xi_i} d\xi_i \right) \sin(\eta_B + \tau_i) + \\
 &\left(\int_{L_i} m_{a_i}(\xi_i, t) U_i(\xi_i, t) \frac{dw_{z_i}(\xi_i, t)}{d\xi_i} d\xi_i \right) \cos(\eta_B + \tau_i) \\
 &- U_i(\xi_i, t) V(\xi_i, t) \rho m_{a_i}(\xi_i, t) \Big|_{\text{end of step or transom}} \\
 &- \left(\int_{L_i} \dot{m}_{a_i}(\xi_i, t) V_i(\xi_i, t) d\xi_i \right) \\
 &- \left(\int_{L_i} \rho C_{D,C} b_i V_i^2(\xi_i, t) d\xi_i \right) \sin(\eta_B + \tau_i)
 \end{aligned}
 \tag{۲۰}$$

با جایگذاری روابط به دست آمده برای نیروهای سرچ، هیو و پیچ در معادلات حرکت شناور پروازی دوپله، رابطه‌های زیر حاصل شده است:

$$\begin{aligned} & \rightarrow (M + \sum_{i=1}^3 \{ M_{a_i} \sin(\eta_5 + \tau_i) \} \ddot{\eta}_{1CG} + \\ & (M_{a_i} \sin(\eta_5 + \tau_i) \cos(\eta_5 + \tau_i)) \ddot{\eta}_{3CG} - \\ & (Q_{a_i} \sin(\eta_5 + \tau_i)) \ddot{\eta}_5 \} = T_X - F_X - \\ & \sum_{i=1}^3 D_i \times \cos(\eta_5 + \tau_i) \\ & \rightarrow \sum_{i=1}^3 \{ M_{a_i} \sin(\eta_5 + \tau_i) \cos(\eta_5 + \tau_i) \} \ddot{\eta}_{1CG} \\ & + (M + M_{a_i} \cos^2(\eta_5 + \tau_i)) \ddot{\eta}_{3CG} \\ & - (Q_{a_i} \cos(\eta_5 + \tau_i)) \ddot{\eta}_5 \} = \\ & T_X + F_z - \sum_{i=1}^3 D_i \times \cos(\eta_5 + \tau_i) + W \\ & \rightarrow \sum_{i=1}^3 \{ -Q_{a_i} \sin(\eta_5 + \tau_i) \} \ddot{\eta}_{1CG} \\ & - (Q_{a_i} \cos(\eta_5 + \tau_i)) \ddot{\eta}_{3CG} - (I + I_{a_i}) \ddot{\eta}_5 \} = \\ & F_\theta - \sum_{i=1}^3 D_i \times x_{d_i} + T \times x_p \end{aligned} \quad (24)$$

برای مدل‌سازی شناور دوپله کافی است معادلات حرکت بالا حل شوند.

۷- روش حل

برای حل دستگاه معادلات ۲۴، سرعت شناور ثابت فرض شده است ($\dot{\eta}_{1CG} = cte$). همچنین، اگر فرض شود نیروی تراست و و درگ در مقایسه با نیروهای هیدرودینامیکی کوچک باشند و در راستای مرکز ثقل وارد شوند، دستگاه معادلات حرکت ساده‌سازی خواهند شد. معادلات حرکت، به صورت معادله دیفرانسیل درجه‌ی دوم مقدار اولیه است. برای حل این معادله نیاز به شرایط اولیه برای موقعیت هیو، پیچ و سرعت‌های آنها می‌باشد. از سوی دیگر، دستگاه سه معادله‌ی دیفرانسیل به یک دستگاه شش معادله دیفرانسیل تبدیل خواهد شد که در آن بردار مجهول‌ها به صورت

$$x = [\ddot{\eta}_{1CG} \quad \ddot{\eta}_{3CG} \quad \ddot{\eta}_5 \quad \dot{\eta}_{1CG} \quad \dot{\eta}_{3CG} \quad \dot{\eta}_5]$$

محاسبه شده است. گشتاور هیدرودینامیکی F_θ حول مرکز گرانش نیز به صورت مشابه و با انتگرال‌گیری از حاصلضرب نیروی نرمال در واحد طول و بازوی گشتاور، در طول خیس شده، تعیین می‌گردد. که از رابطه‌ی زیر

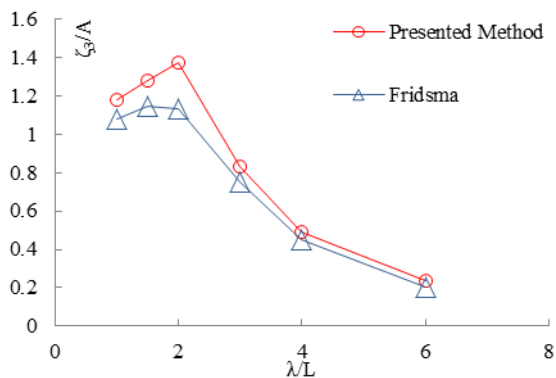
$$\begin{aligned} F_\theta(t) = & \sum_{i=1}^3 \int_{L_i} (f_i(\xi_1, t) \xi_1 + f_{CD_i}(\xi_1, t) \xi_1) d\xi_1 \\ & + \int_{L_i} f_{HD_i} \cos(\eta_5 + \tau_i) d\xi_1 = \\ & \sum_{i=1}^2 -Q_{a_i}(\xi_1, t) \cos(\eta_5 + \tau_i) \times \dot{\eta}_{3CG} + I_{a_i}(\xi_1, t) \dot{\eta}_5 + \\ & Q_{a_i}(\xi_1, t) \dot{\eta}_5 (\dot{\eta}_{3CG}(\xi_1, t) \sin(\eta_5 + \tau_i)) + \\ & \left\{ \int_{L_i} m_{a_i}(\xi_1, t) \frac{dw_{z_i}(\xi_1, t)}{dt} d\xi_1 \right\} \cos(\eta_5 + \tau_i) \\ & - \left(\int_{L_i} m_{a_i}(\xi_1, t) w_{z_i}(\xi_1, t) d\xi_1 \right) \sin(\eta_5 + \tau_i) \\ & - \left(\int_{L_i} m_{a_i}(\xi_1, t) V \frac{dw_{z_i}(\xi_1, t)}{d\xi_1} d\xi_1 \right) \sin(\eta_5 + \tau_i) + \\ & \left(\int_{L_i} m_{a_i}(\xi_1, t) U_i(\xi_1, t) \frac{dw_{z_i}(\xi_1, t)}{d\xi_1} d\xi_1 \right) \cos(\eta_5 + \tau_i) - \\ & U_i(\xi_1, t) V_i(\xi_1, t) \rho m_{a_i}(\xi_1, t) \Big|_{\text{end of step or transom}} \\ & - \left(\int_{L_i} \dot{m}_{a_i}(\xi_1, t) V_i(\xi_1, t) d\xi_1 \right) \\ & - \left(\int_{L_i} \rho C_{D,C} b_i(\xi_1, t) V_i^2(\xi_1, t) d\xi_1 \right) \\ & + \int_{L_i} \rho d_i(\xi_1, t) b_i(\xi_1, t) \xi_1^2 d\xi_1 \end{aligned} \quad (22)$$

قابل محاسبه است که در این روابط، M_a ، Q_a و I_a از روابط زیر محاسبه شده است.

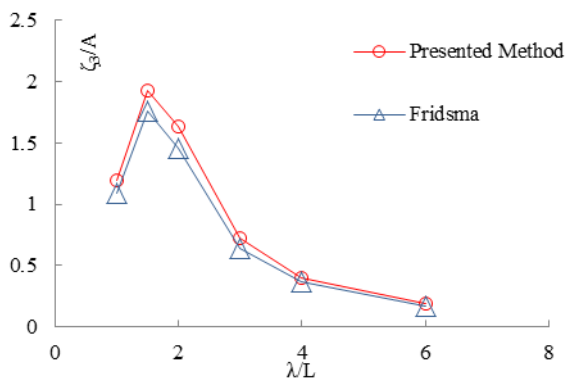
$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 M_{a_i}(\xi_1, t) &= \sum_{i=1}^3 \int_{L_i} m_{a_i}(\xi_1, t) d\xi_1 \\ \sum_{i=1}^3 Q_{a_i}(\xi_1, t) &= \sum_{i=1}^3 \int_{L_i} m_{a_i}(\xi_1, t) \xi_1 d\xi_1 \\ \sum_{i=1}^3 I_{a_i}(\xi_1, t) &= \sum_{i=1}^3 \int_{L_i} m_{a_i}(\xi_1, t) \xi_1^2 d\xi_1 \end{aligned} \quad (23)$$

۶- معادلات حرکت

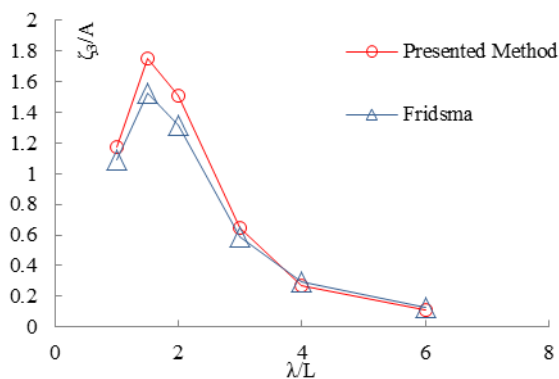
عمودی نشان‌دهنده‌ی طول موج بی‌بُعدشده‌ی شناور می‌باشد. نمودارهای ترسیم شده در این شکل نمایانگر دقت مناسب روش پیشنهادی می‌باشند. خطای حاصل از روش نیز در جدول ۲ نمایش داده شده است. مقادیر موجود در این جدول دقت مناسب روش در پیش‌بینی حرکت هیو را نشان می‌دهند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴. دامنه‌ی پیش‌بینی شده برای حرکت هیو شناورهای پروازی فریدزما: (الف) $\beta = 10^\circ$ ، (ب) $\beta = 20^\circ$ و (ج) $\beta = 30^\circ$.

می‌باشد. برای حل دستگاه معادلات از روش رانگ-کوتا-مرسون استفاده شده است.

۸- اعتبارسنجی

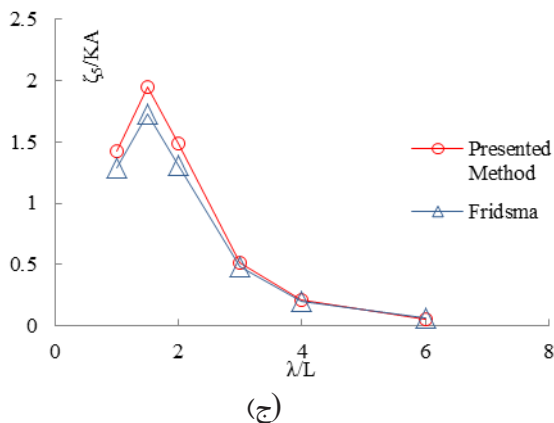
پیش از این هیچ مُدلی برای دینامیک شناور پروازی دوپله ارائه نگردیده بود و هیچ نتیجه‌ی آزمایشگاه برای دینامیک شناور در این حالت ارائه نشده است. لذا صحت‌سنجی روابط بکارگرفته‌شده برای شناور پله‌دار ابتدا برای سه مُدل فریدزما [۴] در موج منظم انجام شده است. شناورها با زاویه‌ی رأس 20° و 30° در عدد فرود عرضی $3/99$ و شناور با زاویه‌ی رأس 10° در عدد فرود عرضی $2/66$ مُدل‌سازی شده‌اند. مشخصات مُدل‌های تست‌شده توسط فریدزما [۴] در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات و ویژگی‌های بدنه‌های فریدزما.

مشخصه	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳
$LAO / (m)$	۱/۴۳	۱/۴۳	۱/۴۳
$B / (m)$	۱	۱	۱
β	10°	20°	30°
LCG (from transom) / (m)	۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۴۵
C_d	۱/۶۰۸	۱/۶۰۸	۱/۶۰۸
VCG (m)	۰	۰	۰
VCG (m)	۱/۰۵۶	۱/۰۵۶	۱/۰۵۶
VCG (m)	۰	۰	۰
Configuration on (In Fridsma's report [4])	I	B	M

تمامی مُدل‌ها در بازه‌ی طول موج بی‌بُعد (λ/l) ۱ تا ۶

تست شده است. دامنه‌ی موج (A) در کلیه حالت‌ها، $0/126$ متر در نظر گرفته شده است. دامنه‌ی محاسبه‌شده برای حرکت هیو برای هر سه مُدل شناور پروازی فریدزما [۴] در شکل ۴ نمایش داده شده است. محور افقی نشان‌دهنده‌ی دامنه‌ی حرکت هیو و محور



شکل (۵): دامنه‌ی پیش‌بینی‌شده برای حرکت هیو شناورهای پروازی فریدیزما: (الف) $\beta = 10$ ، (ب) $\beta = 20$ و (ج) $\beta = 30$.

جدول (۳): خطای روش حاضر در پیش‌بینی دامنه‌ی پیچ شناورهای پروازی فریدیزما [۴].

$\frac{\lambda}{\ell}$	$\beta = 10$	$\beta = 20$	$\beta = 30$
۱	۱۳/۶۸	۹/۹۰	۱۰/۶۲
۱/۵	۵/۲۸	۱۲/۹۴	۱۲/۹۶
۲	۱۲/۲۲	۱۳/۱۰	۱۴/۲۳
۳	۱۴/۹۷	۱۱/۳۱	۶/۴۶
۴	۱۲/۷۴	۷/۱۲	۵/۲۶
۶	۸/۷۳	۵/۱۱	۷/۴۳

۹- ارائه نتایج

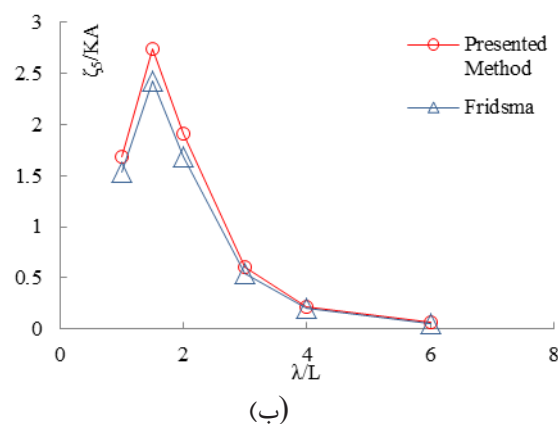
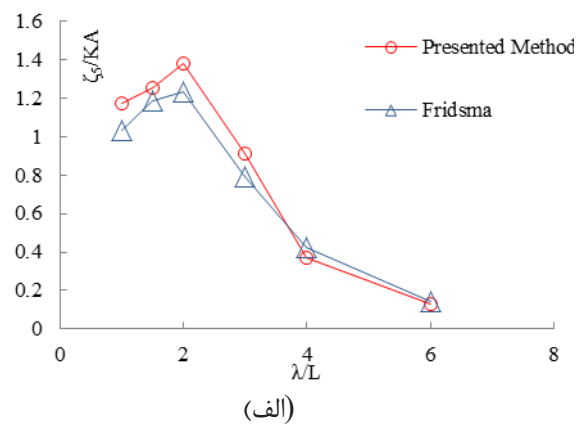
نتایج حاصل از مدل ریاضی در دو بخش مجزا ارائه شده است. در بخش نخست، اثرات سرعت بر دامنه‌ی حرکات هیو و پیچ، شتاب مرکز ثقل و سینه‌ی شناور پروازی دوپله در یک فرکانس ثابت موج منظم مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش دوم، به بررسی اثرات فرکانس و دامنه‌ی موج روی دامنه حرکات هیو و پیچ و شتاب مرکز ثقل و سینه‌ی شناور دوپله‌ی پروازی در یک سرعت ثابت پرداخته شده است. به منظور بررسی شرایط ذکر شده، شناور دوپله‌ی C2 از سری ساوتهمپتون [۱۲] مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. مشخصات و ویژگی‌های این بدنه که به عنوان ورودی نرم‌افزار استفاده می‌شود، در جدول ۴ نمایش داده شده است.

جدول (۴): مشخصات و ویژگی‌های بدنه‌ی C2.

جدول (۲): خطای روش حاضر در پیش‌بینی دامنه‌ی هیو شناورهای پروازی فریدیزما [۴].

$\frac{\lambda}{\ell}$	$\beta = 10$	$\beta = 20$	$\beta = 30$
۱	۹/۳۹	۹/۴۶	۷/۷۸
۱/۵	۱۱/۷۰	۱۰/۱۱	۱۵/۰۶
۲	۲۰/۸۲	۱۱/۸۳	۱۴/۶۱
۳	۱۰/۴۴	۱۲/۰۴	۱۰/۹۳
۴	۸/۶۷	۸/۱۵	۸/۱۰
۶	۱۳/۸۳	۹/۹۸	۱۰/۹۲

مقادیر پیش‌بینی‌شده برای دامنه‌ی حرکت پیچ شناورهای فریدیزما در شکل ۵ به تصویر در آمده است. در هر نمودار، محور عمودی دامنه‌ی بی‌بعد حرکت پیچ و محور افقی طول موج بی‌بعد می‌باشد. نمودارهای آورده‌شده در این شکل، نشان از نزدیکی نتایج محاسبه‌شده به مقادیر آزمایشگاهی می‌دهند. مقادیر کمی خطا نیز در قالب جدول ۳ نشان داده شده است. بر اساس خطاهای آورده‌شده در این جدول، روش دقت مطلوبی را دارا می‌باشد.



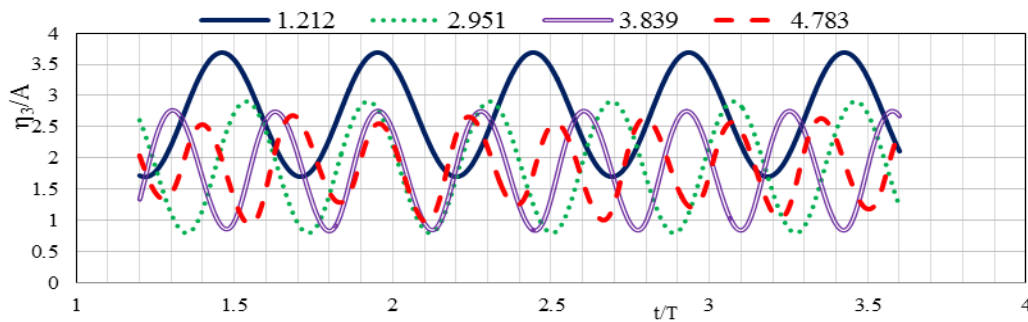
$L(m)$	۲
$B(m)$	۰/۴۶
$T(m)$	۰/۰۹
$\Delta(N)$	۲۵/۲۸
$L/\Delta^{1/3}$	۶/۸۶
L/B	۴/۳۵
$\beta(^{\circ})$	۲۲/۵
$LCG(\%L)$	۰/۳۳

شناور رفتار غیرخطی بسیار اندکی از خودش نشان می‌دهد. دامنه‌ی حرکات شتاب مرکز ثقل و سینه با افزایش سرعت افزایش یافته و پریود نوسانات آن کمتر شده است. شناور تا عدد فرود عرضی ۳/۸۳۹ رفتار خطی از خود نشان می‌دهد. با افزایش عدد فرود، شناور در عدد فرود ۴/۷۸۳ رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد. این رفتار غیرخطی در شناورهای پروازی بسیار رایج است. حرکت شناورهای پروازی در موج سبب تغییر تریم و هیو در لحظه‌های مختلف خواهد شد. با تغییر تریم و هیو، سطح خیس شده شناور به صورت لحظه‌ای عوض خواهد شد. در شناور پروازی پله‌دار، وجود پله باعث تقسیم بدنه به چند سطح پروازی جدید خواهد شد. به همین دلیل، تغییرات غیرخطی در فرکانس‌های پایین و عددهای فرود بالاتر در شناورهای پروازی پله‌دار به صورت محسوس‌تر مشاهده خواهد شد. رفتار غیرخطی بیشتر بر روی ترم‌های شتاب قابل مشاهده است.

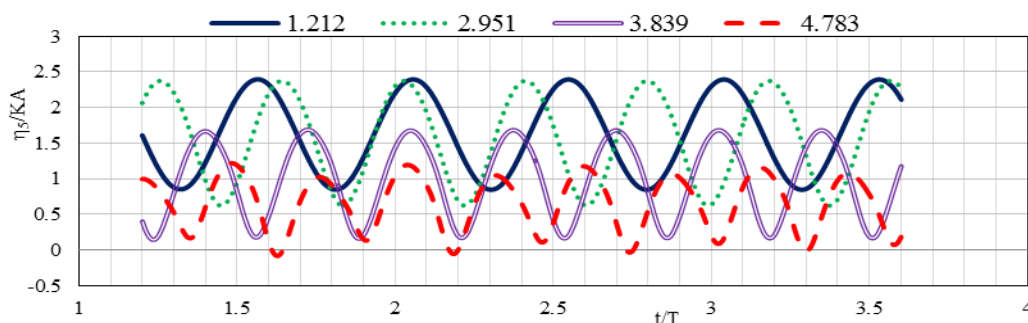
۹-۱- اثرات سرعت بر روی دینامیک شناور دوپله‌ی

پروازی در یک فرکانس ثابت

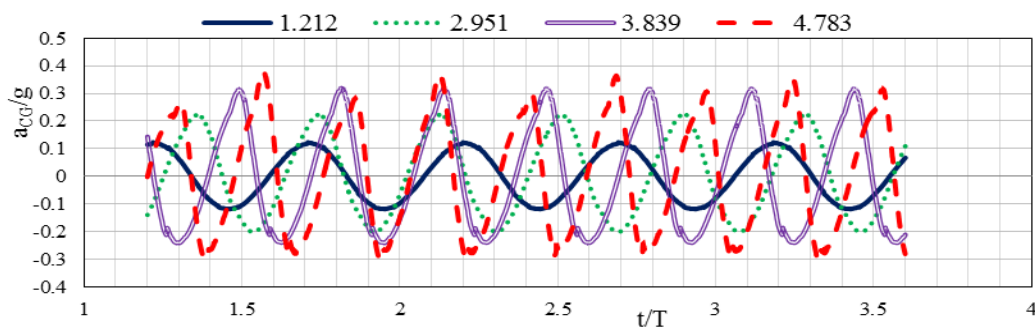
به منظور بررسی اثرات سرعت بر روی دامنه‌ی حرکات هیو و پیچ، شتاب مرکز ثقل و سینه‌ی شناور دوپله‌ی پروازی، شناور در اعداد فرود عرضی ۱/۲۱۲، ۲/۹۵۱، ۳/۸۳۹ و ۴/۸۷۳ و در فرکانس ثابت ۰/۴ و ارتفاع موج ۴۵ میلی‌متر شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در نمودارهای شکل ۷ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۷، بخش الف و ب، با افزایش سرعت در یک فرکانس ثابت دامنه حرکات هیو و پیچ کمتر شده و



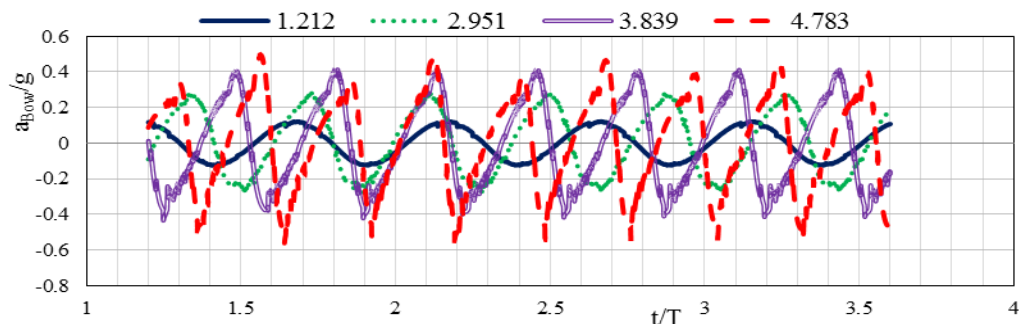
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۷): دامنه‌ی حرکات پیش‌بینی‌شده برای حرکات شناور پروازی دوبله مُدل C2 در اعداد فرود عرضی مختلف اما در فرکانس و دامنه موج ثابت ۰/۴ هرتز و ۴۵ میلی‌متر: الف) دامنه حرکت هیو، ب) دامنه حرکت پیچ، ج) دامنه حرکت شتاب مرکز ثقل، د) دامنه حرکت شتاب سینه.

طول موج (متر) ۲/۴۳۹ ۳/۶۹۴ ۶/۲۴۳ ۹/۷۵۵

با توجه شکل ۸ با کاهش فرکانس موج و افزایش دامنه‌ی موج، دامنه‌ی حرکات هیو و پیچ افزایش یافته است اما تعداد نوسانات و دامنه‌ی حرکات شتاب مرکز ثقل و سینه شناور دوبله کاهش یافته است. این نشان از پایداری شناور دوبله در مقابله با امواجی با طول موج زیاد است.

فرکانس ۰/۴ نزدیک به فرکانس بی‌بعد شناور است که این باعث افزایش دامنه‌ی هیو و نوسان شناور تحت یک مقدار بیشتر از فرکانس‌های دیگر می‌باشد. این موضوع به وضوح در شکل‌های ۸ و ۹ بخش الف قابل مشاهده است. با کاهش فرکانس، دامنه‌ی حرکت و تعداد نوسانات شتاب مرکز ثقل و سینه شناور کاهش یافته است. در عدد فرود ۲/۹۵۱ و فرکانس ۰/۸ هرتز، مقدار دامنه‌ی بی‌بعد شتاب مرکز ثقل ۰/۵۲ است که در فرکانس ۰/۴ هرتز مقدار آن به ۰/۲۲ رسیده است. برای دامنه‌ی بی‌بعد حرکات هیو و پیچ در فرکانس ۰/۸ هرتز، مقدار آن به ترتیب ۰/۶۲ و

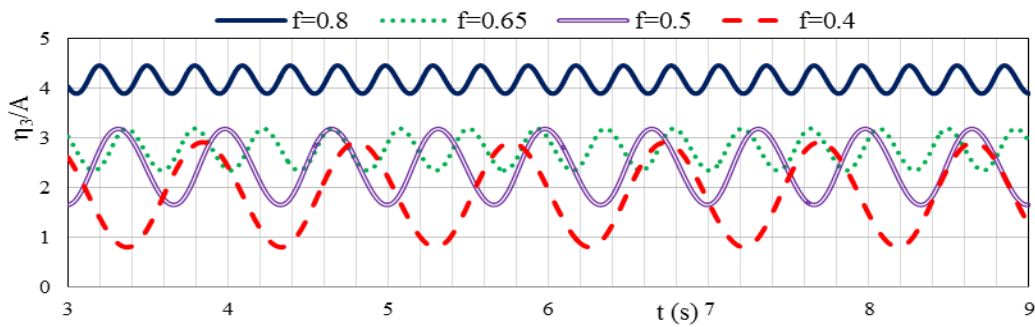
۹-۲- اثرات فرکانس و دامنه موج بر روی دینامیک شناور دوبله‌ی پروازی در یک سرعت ثابت

برای بررسی اثرات فرکانس و دامنه موج بر حرکات شناور دوبله، چهار موج مختلف مطابق با جدول ۵ برای امواج منظم استفاده شده است. در شکل‌های ۸ و ۹، اثرات فرکانس و دامنه موج بر دامنه‌ی حرکات هیو، پیچ، شتاب مرکز ثقل و شتاب سینه نشان داده شده است. شبیه‌سازی در دو عدد فرود عرضی ۲/۹۵۱ و ۴/۷۸۳ انجام شده است.

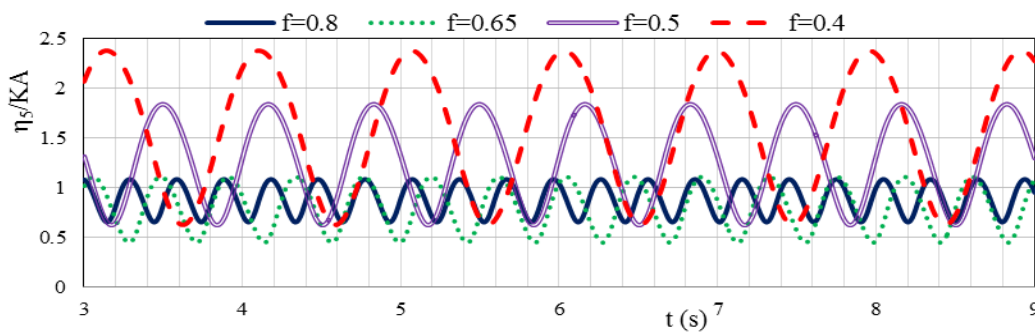
جدول (۵): مشخصات امواج شبیه‌سازی‌شده.

موج ۱	موج ۲	موج ۳	موج ۴	
۰/۸	۰/۶۵	۰/۵	۰/۴	فرکانس (هرتز)
۰/۰۲	۰/۰۳۲	۰/۰۳۵	۰/۰۴۵	ارتفاع موج (متر)
۱/۲۵	۱/۵۳۸	۲	۲/۵	دوره تناوب (ثانیه)

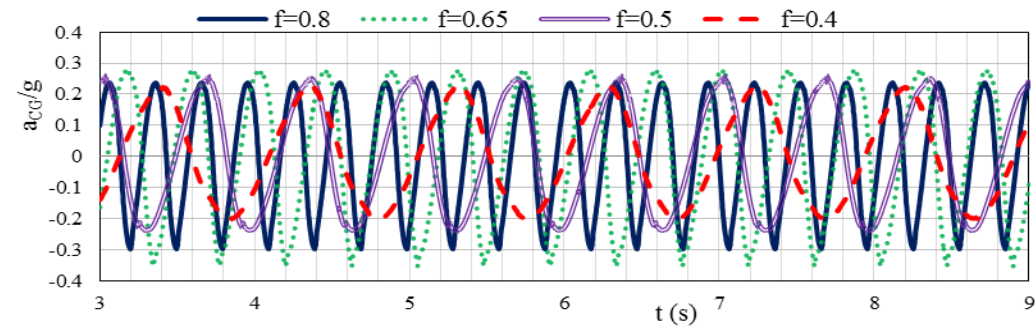
۰/۴۲ و برای فرکانس ۰/۶۵ مقدار دامنه‌ی بی‌بُعد حرکات هیو و پیچ به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۷۴ اندازه‌گیری شده است.



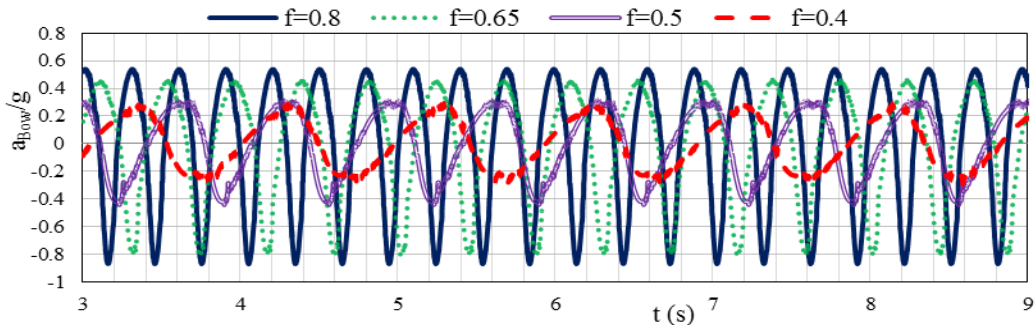
(الف)



(ب)



(ج)

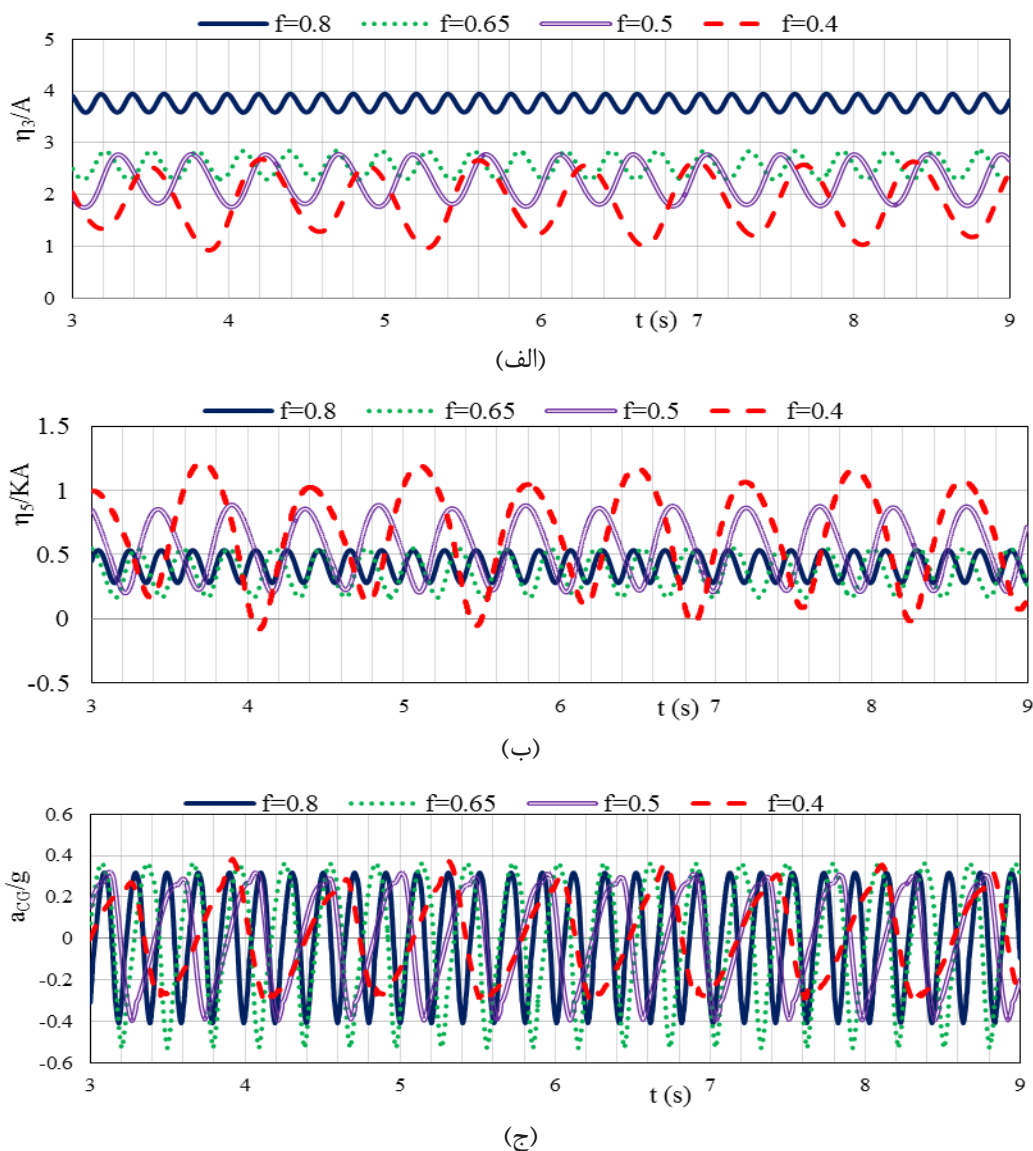


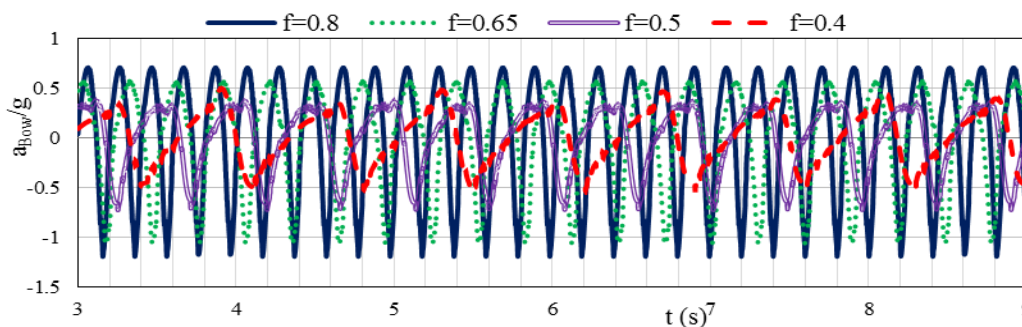
(د)

شکل (۸): دامنه‌ی پیش‌بینی‌شده برای حرکات شناور پروازی دوپله مُدل C2 در عدد فرود عرضی ۲/۹۵۱: (الف) دامنه‌ی حرکت هیو، (ب) دامنه‌ی حرکت پیچ، (ج) دامنه‌ی حرکت شتاب مرکز ثقل، (د) دامنه‌ی حرکت شتاب سینه.

دامنه‌ی حرکات هیو و پیچ به ترتیب $۲/۱۱$ و $۱/۷۴$ اندازه‌گیری شده است. با مقایسه‌ی نتایج قبلی می‌توان نتیجه گرفت که در یک عدد فرود عرضی ثابت، با کاهش فرکانس و افزایش دامنه‌ی موج، دامنه حرکات هیو و پیچ افزایش خواهد یافت. در عدد فرود عرضی $۴/۷۸۳$ در فرکانس $۰/۴$ ، رفتار شناور کمی غیرخطی شده که میانگین دامنه‌ی حرکات هیو، پیچ و شتاب مرکز ثقل به ترتیب $۱/۵۵$ ، $۰/۹۷۵$ و $۰/۶۳$ اندازه‌گیری شده است. نمودار شکل ۹، دامنه‌ی پیش‌بینی شده برای حرکات شناور پروازی دوپله‌ی مُدل C2 در در عدد فرود عرضی $۴/۷۸۳$ نمایش داده شده است.

با افزایش عدد فرود برای امواج شبیه‌سازی قبلی، دامنه‌ی حرکات هیو و پیچ کاهش یافته است. در فرکانس موج $۰/۵$ با عدد فرود عرضی $۲/۹۵۱$ ، دامنه‌ی حرکات بی‌بعد هیو، پیچ و شتاب مرکز ثقل به ترتیب $۱/۵۳$ و $۱/۱۸$ و $۰/۴۶$ است. با افزایش عدد فرود عرضی به $۴/۷۸۳$ در فرکانس $۰/۵$ ، دامنه‌ی حرکات بی‌بعد هیو، پیچ و شتاب مرکز ثقل به ترتیب ۱ و $۰/۶۶$ و $۰/۶۹$ اندازه‌گیری شده است. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عدد فرود در یک فرکانس و دامنه موج ثابت دامنه‌ی حرکات هیو و پیچ کاهش یافته ولی دامنه‌ی حرکت شتاب مرکز ثقل افزایش یافته است. با کاهش فرکانس موج تا عدد $۰/۴$ و افزایش دامنه‌ی موج تا عدد $۰/۴۵$ ، در عدد فرود عرضی $۲/۹۵۱$





(د)

شکل (۹): دامنه‌ی پیش‌بینی‌شده برای حرکات شناور پروازی دوپله‌ی مُدل C2 در در عدد فرود عرضی ۴/۷۸۳: الف) دامنه‌ی حرکت هیو، ب) دامنه‌ی حرکت پیچ، ج) دامنه‌ی حرکت شتاب مرکز ثقل، د) دامنه‌ی حرکت شتاب سینه.

۱

جمع‌بندی و مطالعات آینده

در این مقاله، یک مُدل ریاضی جدید برای حرکات هیو و پیچ بدنه‌های دوپله ارائه گردید. اساس مُدل ریاضی و برنامه‌ی کامپیوتری تهیه‌شده بر پایه تغییرات مومنوم و در نظرگیری تئوری ویک خطی است. در همین راستا، یک عبارت مشخص برای جرم افزوده‌ی گوه در حال ورود به آب ارائه شد. صحت روابط مُدل ارائه‌شده، برای شناورهای بدون پله فریدیزما صورت پذیرفت. تمامی مقایسه‌ها نشان از دقت مناسب روش و آمادگی آن برای پیش‌بینی رفتار یک شناور پروازی دوپله در آب مواج می‌باشد. در پایان، نتایج خروجی نرم‌افزار برای شناور دوپله C2 از سری ساوتهمپتون نمایش داده شده است. از روش حاضر، می‌توان برای بررسی اثرات فرکانس و دامنه‌ی موج‌های مختلف بر روی دینامیک شناور دوپله‌ی پروازی استفاده کرد. افزایش سرعت در یک فرکانس ثابت موج، فرکانس طبیعی شناور دوپله را کاهش داده است، اما در یک سرعت ثابت با کاهش فرکانس و افزایش دامنه‌ی موج، فرکانس طبیعی شناور دوپله افزایش یافته است. در آینده نزدیک، مُدل ریاضی ارائه‌شده برای شناورهای چندپله نیز توسعه خواهد یافت. همچنین، مطالعه برای چگونگی بررسی حرکت رول و کوپل حرکات هیو، پیچ و رول برای شناور پله‌دار در حال انجام است.

منابع:

- [2] Garland, W. R., "Stepped planing hull investigation," *SNAME Trans.*, pp. 1-11, 2010.
- [3] Savitsky, D., "Hydrodynamic design of planing hulls," *Marine Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 71-95, 1964.
- [4] Savitsky, D., and Morabito, M., "Surface wave contours associated with the forebody wake of stepped planing hulls," *Marine Technology*, Vol. 47, Jan. 2010.
- [5] Svahn, D., "Performance prediction of hulls with transverse steps," Master Thesis, Marina System Centre for Naval Architecture, KTH University, June 2009.
- [6] Makasyeyev, M. V., "Numerical modeling of cavity flow on bottom of a stepped planing hull, 2009.
- [7] Loni, A., Ghadimi, P., Nowruzi, H., and Dashtimanesh, A., "Developing a computer program for mathematical investigation of stepped planing hull characteristics," *International Journal of Physical Research*, Vol. 1, No. 2, pp. 34-47., 2013.
- [8] Lee, E., Pavkov, M., and McCue-Weil, L., "The systematic variation of step configuration and displacement for a double-step planing craft," *Journal of Ship Production and Design*, Vol. 30, No. 2, pp. 89-97, 2014.
- [9] Dashtimanesh, A., Tavakoli, S., and Sahoo, P., "A simplified method to calculate trim and resistance of a two-stepped planing hull," *Ships and Offshore Structures*, Vol. 12, No. 1, pp. 317-329, 2017.
- [10] Von Karman, T. H., "The impact on seaplane floats during landing," 1929.
- [11] Milwitzky, B., "A generalized theoretical and experimental investigation of the motions and hydrodynamic loads experienced by V-

- [1] Danielson, J., and Stromquist, J., "Conceptual design of super yacht tender," *Marine System Center for Naval Architecture, KTH University*, 2012.

- [22] Sebastiani, L., Bruzzone, D., Gualeni, P., Rambaldi, G., Ruscelli, D., and Viviani, M., "A practical method for the prediction of planing craft motions in regular and irregular waves," In ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, pp. 687-696, Jan. 2008.
- [23] Ghadimi, P., Dashtimanesh, A., Djeddi, S. R., and Maghrebi, Y. F., "Development of a mathematical model for simultaneous heave, pitch and roll motions of planing vessel in regular waves," International Journal of Scientific World, Vol. 1, No. 2, pp. 44-56, 2013.
- [24] Ghadimi, P., Dashtimanesh, A., and Faghfoor Maghrebi, Y., "Initiating a mathematical model for prediction of 6-DOF motion of planing crafts in regular waves," International Journal of Engineering Mathematics, 2013.
- [25] Tavakoli, S., Ghadimi, P., and Dashtimanesh, A., "A nonlinear mathematical model for coupled heave, pitch, and roll motions of a high-speed planing hull," Journal of Engineering Mathematics, pp. 1-38, 2016.
- [۲۶] نیازمند بیلندی، رسول، دشتی‌منش، عباس، توکلی، ساسان، محاسبه‌ی کارآیی شناور دوپله‌ی پروازی با رویکرد توزیع فشار نامتقارن، پنجمین همایش ملی شناور تندرو، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اردیبهشت ۱۳۹۶.
- [27] Algarín, R., and Tascón, O., "Hydrodynamic modeling of planning boats with asymmetry and steady condition," Paper presented at the HSMV 2011 Conference proceedings, 2011.
- [28] Taunton, D., Hudson, D., and Sheno, R., "Characteristics of a series of high speed hard chine planning hulls part 1: Performance in calm water," International Journal of Small Craft Technology, Vol. 152, pp. 55-75, 2010.
- bottom seaplanes during step-landing impacts," 1948.
- [12] Schnitzer, E., "Theory and procedure for determining loads and motions in chine-immersed hydrodynamic impacts of prismatic bodies (No. NACA-TN-2813)," NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION WASHINGTON DC, 1952.
- [13] Fridsma, G., "A systematic study of the rough-water performance of planing boats (No. 1275)," STEVENS INST OF TECH HOBOKEN NJ DAVIDSON LAB, 1969.
- [14] Fridsma, G. E. R. A. R. D., "A systematic study of the rough-water performance of planing boats-Part 2 irregular waves," Davidson Laboratory, Stevens Institute of Technology, Hoboken, NJ., 1971.
- [15] Savitsky, D., and Brown, P. W., "Procedures for hydrodynamic evaluation of planing hulls in smooth and rough water," Marine Technology, Vol. 13, No. 4, pp. 381-400, 1976.
- [16] Martin, M., "Theoretical prediction of motions of high-speed planing boats in waves (No. DTNSRDC-76-0069)," DAVID W TAYLOR NAVAL SHIP RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER BETHESDA MD, 1976.
- [17] Martin, M., "Theoretical determination of porpoising instability of high-speed planing boats (No. DTNSRDC-76-0068)," DAVID W TAYLOR NAVAL SHIP RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER BETHESDA MD, 1976.
- [18] Zarnick, E. E., "A nonlinear mathematical model of motions of a planing boat in regular waves (No. DTNSRDC-78/032)," DAVID W TAYLOR NAVAL SHIP RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER BETHESDA MD, 1978.
- [19] Van Deyzen, A., "A nonlinear mathematical model of motions of a planning monohull in head seas," In Proceedings of the 6th international conference on high performance marine vehicles, Naples, Italy, Sep. 2008.
- [20] Sayeed, T. M., "Numerical simulation of planning hull in regular waves," Doctoral dissertation, Memorial University of Newfoundland. 2010.
- [21] Ruscelli, D., "Dynamic of high-speed craft," PhD Thesis, University of Genoa, Genoa, Italy, 2009.