

توسعه یک برنامه کامپیوتری جهت تحلیل حرکات هیو، پیچ و رول

شناور پروازی در امواج منظم و نامنظم

عباس دشتی منش

استادیار هیدرودینامیک دریا، دانشگاه خلیج فارس، دانشکده مهندسی، a.dashtimanesh@pgu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۳۰)

چکیده

بازار شناورهای پروازی در طول سال‌های اخیر رشد فزاینده‌ای داشته است. از این‌رو، نیاز به ابزار طراحی به‌شدت افزایش یافته است. این موضوع به‌خصوص در حیطه‌ی پیش‌بینی عملکرد دریامانی و مانوردهی شناورهای پروازی ضروری می‌باشد. اگرچه روش‌های عددی برای شناورهای جابجایی معمولی ابزاری بسیار مفید هستند، اما هنوز نتوانسته‌اند مواجهه مناسبی با پیچیدگی‌های هیدرودینامیکی موجود در شناورهای پروازی داشته باشند. این مقاله، یک روش ساده برای پیش‌بینی حرکات هیو، پیچ و رول شناور پروازی در امواج منظم ارائه خواهد داد. در فرمول‌بندی، یک روش دوبعدی بر اساس تئوری مومنتوم اتخاذ گردیده است. جنبه‌های مختلف تئوری جرم افزوده و تئوری $2D+t$ نیز برای مدل‌سازی ویژگی‌های مقاطع شناور استفاده می‌گردد. جهت اعتبارسنجی، مبنای روش ارائه‌شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت و از داده‌های تجربی موجود در تاریخچه‌ی مسئله استفاده خواهد شد و سپس، نتایج در کلیه درجات آزادی مذکور مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

واژه‌های کلیدی

شناور پروازی، هیو، پیچ، رول، امواج منظم و نامنظم، مدل ریاضی.

Development of a Computer Program for Analysis of Coupled Heave, Pitch and Roll Motions of Planing Craft in Regular and Irregular Waves

Abbas Dashtimanesh

Assistant Professor of Marine Hydrodynamics, Engineering Department, Persian Gulf University

a.dashtimanesh@pgu.ac.ir

(Submitted: 2017/Jan/7; Accepted: 2017/Jan/19)

Abstract

The market for planing boats has shown steady growth in the recent years and this has caused an increase in the need for designing tools. The need is even more vital for the prediction of seakeeping and maneuverability of planing boats. Although the numerical methods are proved to be useful for the displacement vessels, they seem to be relatively impractical dealing with the complexities of the hydrodynamic behavior of planing boats. In this paper, a simple method for prediction of Heave, Pitch and Roll motions of the vessels in regular waves is presented. In the formulation of the present mathematical model, a 2-dimensional technique using momentum theory is applied. Different aspects of the added mass and $2D+t$ theories are also implemented for the section-based simulations of the planing vessel. The developed method is analyzed through a set of validation tests while the experimental results of the literature are used in order to validate the obtained results. The results are then evaluated in different degrees of freedom and favorable agreement has been achieved against the experimental data.

Keywords

Planing craft, Heave, Pitch, Roll, Regular and Irregular waves, Mathematical Model.

دریامانی شناورها را می‌توان با شتاب‌ها، حرکات و رفتار رول شناور مورد مطالعه قرار داد. همچنین، توجه به شرایط آسایش و راحتی سرنشینان شناور، کارکرد مناسب سازه‌ای و سیستم‌های نصب‌شده بر روی شناور از اهمیت فراوانی برخوردار است؛ بنابراین، پیش‌بینی کارایی شناور نکته‌ای کلیدی در فرایند طراحی خواهد بود. در طول دهه های اخیر، تاریخچه‌ی موضوع نشان می‌دهد که مطالعات فراوانی در این زمینه صورت پذیرفته است.

پیچیدگی‌ها و دشواری‌های مربوط به هیدرودینامیک خاص این شناورها، از زمانی که شناورهای پروازی مورد توجه قرار گرفته‌اند، به‌وسیله‌ی فالتینسن مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. در سرعت‌های بالا، شرایط پروازی نمایانگر وجود پدیده‌های غیرخطی بسیار شدیدی است که در حوزه‌ی شناورهای جابجایی مشاهده نمی‌شود. این شرایط غیرخطی منجر به ناپایداری‌های شدیدی می‌شود [۲].

حاکم بودن فشار دینامیکی، تغییرات زیاد سطح خیس‌شده، تأثیر اسپری، تغییرات شدید بالآمدگی و تریم شناور برخی از فاکتورهایی هستند که می‌بایست در مدل‌سازی کاملاً دقیق شناورهای پروازی مورد توجه قرار بگیرند؛ بنابراین، فعالیت‌های تحقیقاتی گسترده‌ای به‌صورت آزمایشگاهی و نظری در زمینه‌ی تحلیل حرکت پایدار شناور در آب آرام انجام شده است [۳، ۴]. برای حالت ناپایدار حرکات شناور پروازی در امواج نیز یکی از روش‌های قابل اطمینان استفاده از داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. روش‌های تحلیلی مختلفی نیز در طی سال‌های گذشته هم در بازه‌ی فرکانس و هم در بازه‌ی زمان توسعه یافته‌اند [۵، ۶، ۷]. در این میان، روش‌های مبتنی بر نظریه‌ی $2D+t$ مورد توجه بسیار قرار گرفته و به‌وسیله‌ی محققان مختلف بهبود داده شده است [۸، ۹]. اخیراً، ادعا گردیده که فرایندی قاب اطمینان به‌عنوان ابزاری مفید برای پیش‌بینی رفتار شناور توسعه یافته است [۱۰]. از آنجایی که روش $2D+t$ به‌صورت کاملاً گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته و معتبر گردیده است، می‌تواند به‌عنوان روش مورد علاقه‌ی طراحان و محققین مورد استفاده قرار گرفته و ارائه نتایج با زمان و دقت محاسباتی قابل قبول را تضمین نماید.

در این مقاله، بر مبنای روش ارائه‌شده به‌وسیله‌ی پایین [۱۱]، روشی برای در نظر گرفتن حرکت رول شناور توسعه یافته است. در این روش، به‌جای در نظر گرفتن برخورد متقارن مقطع به سطح آب در تئوری $2d+t$ ، برخورد یک مقطع نامتقارن در نظر گرفته شده است. همچنین، جهت در نظر گرفتن اثرات امواج، از نظریه‌ی امواج منظم استفاده خواهد شد. علاوه بر این، نظریه‌ی مومنتوم و جرم افزوده جهت محاسبه‌ی نیروهای وارد بر مقاطع دوبعدی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

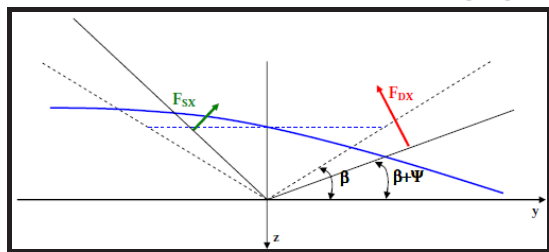
در ادامه، به تفصیل روش توسعه داده شده بیان گردیده و پس از معتبرسازی مبنای اصلی روش، نتایج ترکیب رول، هیو و پیچ ارائه خواهد شد. در واقع، این مطالعه از گام‌های اولیه برای توسعه مدل‌های ریاضی به درجات آزادی بالاتر می‌باشد. از این‌رو، استفاده از فرض‌های ساده‌کننده می‌تواند تا حد بسیار زیادی منطقی باشد.

۲- بیان موضوع و تعریف سیستم مختصات

به دلیل فیزیک کاملاً غیرخطی شناورهای پروازی، ترکیب حرکات مختلف در درجات آزادی مختلف می‌تواند امری معمول به شمار آید. در این میان، حرکات هیو و پیچ و رول شناور توانسته‌اند توجه بسیاری از محققین را به خود معطوف نمایند. علاوه بر این، در نظر گرفتن این حرکات بدون در نظر گرفتن اثرات امواج کاربرد چندانی نخواهد داشت. به‌طور کلی، در این مقاله، با در نظر گرفتن یک بدنه‌ی پروازی منشوری و با مدل‌سازی امواج منظم، دینامیک سه درجه آزادی شناور مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

بنابراین، جهت توسعه مدل ریاضی دو سیستم مختصات یکی منطبق بر آب آرام و دیگری منطبق بر مرکز جرم شناور معرفی می‌گردد. جهت ارائه‌ی مدل ریاضی، ابتدا می‌بایست سیستم مختصات مورد استفاده، معرفی گردد. Oxyz سیستم مختصات مطلق با مبدأ O روی خط آب آرام WL است (شکل‌های ۱ و ۲). محور X بر روی صفحه تقارن شناور و در جهت پیشروی آن و محور Z به‌صورت عمودی و به سمت پایین مثبت است. سیستم مختصات دیگر بر روی بدنه قرار گرفته و با شناور حرکت می‌کند (شکل‌های ۱ و ۲).

با شرایط مرزی لحظه‌ای در صفحه کنترل حل می‌گردد. در واقع، یک مسئله‌ی دوبعدی با شرایط مرزی سه‌بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌طور کلی، شناوری پروازی با بدنه‌ی منشوری را در نظر بگیرید که در زاویه تریم τ قرار دارد و با سرعت پیشروی U حرکت می‌کند. علاوه بر این، برای در نظر گرفتن حرکت رول، یک گشتاور کج کننده که در اثر عوامل مختلفی ایجاد گردیده است، معرفی می‌شود (شکل ۳).



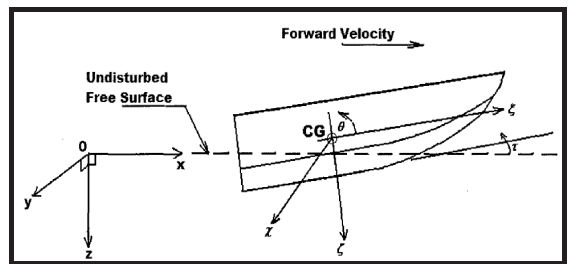
شکل (۳): تأثیرات عدم تقارن.

به‌طور اخص، سه تأثیر اصلی در نظر گرفته شده‌اند:
الف- نیروی نامتقارن سیال بر شناور: شناور در شرایط دریایی مورب متحمل نیروهای متفاوتی در سمت راست و چپ می‌شود که ناشی از سرعت‌های مطلق موج و حرکات نسبی شناور نسبت به رول هستند.

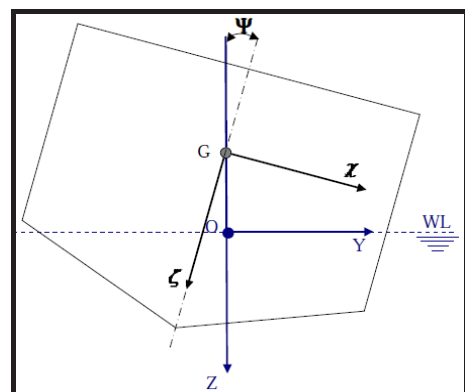
ب- عدم تقارن در برخورد مقطع گوه‌ای به سطح آب: به دلیل رول، مقطعی که به سطح آب برخورد می‌کند، متقارن نیست. سمت راست و چپ به‌صورت مجزا با زاویه‌ی رأس معادل‌شان در نظر گرفته می‌شوند که آنها نیز نتیجه‌ای از زاویه‌ی رأس هندسی محلی و زاویه‌ی رول برای محاسبه‌ی جملات جرم افزوده هستند.

ج- حجم هندسی مغروق نامتقارن: حجم مغروق و سطح خیس‌شده در اغلب اوقات متقارن نیستند و محل تأثیر نیروهای هیدرواستاتیکی و دیگر نیروها را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

به‌عنوان نتیجه‌ی نهایی، نیروهای جانبی سمت راست و چپ به‌طور مجزا و مقطع و به مقطع محاسبه می‌گردند. این بدان معناست که می‌بایست به‌جای برخورد متقارن مقطع در تئوری 2d+t، از برخورد نامتقارن استفاده نمود. همچنین، پیش از آنکه به بررسی روش تعیین ضرایب هیدرودینامیکی و جملات نیرویی پرداخته شود، فرض می‌گردد که نیروهای وارد بر سمت راست و چپ بدنه بر



شکل (۱): سیستم مختصات در حالت تریم شناور (نمای جانبی).



شکل (۲): سیستم مختصات در حالت رول شناور (نمای روبرو).

۳- معادلات حاکم

سیستم مختصات ثابت را در نظر بگیرید که محور X منطبق بر سطح آزاد آرام و در جهت حرکت شناور و محور Z به سمت پایین هستند. اگر حرکت شناور محدود به پیچ θ ، هیو Z_{CG} و سرچ x_{CG} و رول ψ باشد، معادلات حرکت را می‌توان به‌صورت زیر نوشت (زیرنویس‌های w ، f و τ نشان‌دهنده‌ی جمله‌های هیدرواستاتیک، موج و هیدرودینامیک هستند):

$$\begin{aligned} m \ddot{x} &= F_x(t) = X_r(t) + X_w(t) + X_f(t) \\ m \ddot{z} &= F_z(t) = Z_r(t) + Z_w(t) + Z_f(t) \\ I_{Gxx} \ddot{\psi} &= M_x(t) = K_r(t) + K_w(t) + K_f(t) \\ I_{Gyy} \ddot{\theta} &= M_y(t) = P_r(t) + P_w(t) + P_f(t) \end{aligned} \quad (1)$$

در معادلات بالا m نمایانگر ترم جرم و I گشتاور اینرسی شناور هستند. F و M نیز نشان‌دهنده‌ی جملات نیرو و گشتاورهای وارد بر شناور می‌باشند.

همچنین، در مورد یک شناور با بدنه منشوری، به دلیل یکسان بودن مقاطع در طول شناور، تحلیل حرکت شناور معادل با ورود یک گوه به سطح آب با سرعت V خواهد بود. بر اساس شکل ۳، گوه ابتدا و در لحظه

$$f_B = a_{BF} \rho g A \quad (6)$$

a_{BF} ضریب تصحیح بویانسی و A مساحت مقطع عرضی می‌باشند. فرض می‌شود که جریان در صفحات عرضی عمود بر کیل اتفاق افتاده و تحت تأثیر جریان‌های متقاطع موقعیت‌های طولی دیگر نخواهد بود. دو حالت جریان وجود دارد. ابتدا، شرایطی که طی آن چاین خشک باقی می‌ماند که در نزدیکی ورودی طول خیس‌شده‌ی شناور اتفاق می‌افتد. حالت دوم نیز زمانی است که چاین در نزدیکی پاشنه ترانسوم خیس می‌شود. مقاطع بین سینه و پاشنه‌ی شناور میان دو حالت مذکور نوسان می‌کنند.

۵- نظریه‌ی جرم افزوده

جرم افزوده مفهومی است که به‌طور گسترده‌ای در بسیاری از موارد نظیر مانوردهی، دریامانی و محاسبات پروازی استفاده شده است. مقدار جرم افزوده بر اساس شکل و اندازه جسم تغییر می‌کند. جرم افزوده یک مقطع گوه‌ای شکل به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$m_a = k_a \frac{\pi}{2} \rho b^2 \quad (7)$$

$$\dot{m}_a \approx k_a \pi \rho b (C_{pu} \cot \beta) \frac{\dot{z} - \dot{\eta}}{\cos \theta - v \sin \theta} \quad (8)$$

که در آن v شیب موج محلی و C_{pu} ضریب پاشش است. k_a نیز یک ضریب ثابت است.

۶- نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی نیروی عمودی

نیروی عمودی نیز کاملاً مشابه با نیروی‌های محوری و جانبی مورد محاسبه قرار می‌گیرد. تنها تفاوتی که وجود دارد، در تصویر کردن مؤلفه‌های نیرویی در جهت عمودی است. با استفاده از دیاگرام نیرویی خواهیم داشت:

یکدیگر اثرگذاری کمی دارند. در واقع، فرض می‌شود که اگر بدنه‌ای پس از حرکت رول در یک سوی خود دارای زاویه‌ی رأس β باشد، نیروی وارد بر این سمت بدنه معادل با نیروی وارد بر یک بدنه‌ی متقارن با زاویه‌ی رأس β خواهد بود. بر اساس مرجع [۱۴] فرض محاسبه نیروهای سمت چپ و راست مقاطع به‌صورت مجزا، تقریبی منطقی و قابل قبول است.

۴- نظریه‌ی مومنتوم

نیروهای وارد بر یک مقطع شامل چهار جز می‌باشد: وزن مقطع W ، لیفت هیدرودینامیکی مربوط به تغییر مومنتوم سیال f_M ، نیروی لیفت ویسکوز مربوط به درگ جریان متقاطع f_{CD} و یک نیروی بویانسی مربوط به حجم جابجایی لحظه‌ای f_B . نیروی لیفت هیدرودینامیکی مربوط به تغییر مومنتوم سیال در واحد طول که بر یک مقطع وارد می‌شود، به‌صورت زیر است:

$$f_M = \frac{D}{Dt} (m_a V) = m_a \dot{V} + V \dot{m}_a - \frac{\partial}{\partial \xi} (m_a V) \frac{d\xi}{dt} \\ = m_a \dot{V} + V \dot{m}_a - U \frac{\partial}{\partial \xi} (m_a V) \quad (2)$$

که m_a جرم افزوده مقطع، U سرعت نسبی سیال موازی با کیل و V سرعت در صفحه مقطع و عمود بر خط مبنا هستند.

راجع به جرم افزوده، عبارات یکسانی در ارزیابی نیروهای هیدرودینامیک برای دو بخش متفاوت هر مقطع (سمت چپ و سمت راست) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$f_{MPT} = -\frac{D}{Dt} (m_{A_{PT}} v_{n_{rel PT}}) \quad (3)$$

$$f_{MSB} = -\frac{D}{Dt} (m_{A_{SB}} v_{n_{rel SB}}) \quad (4)$$

علاوه بر این، لیفت ناشی از درگ جریان متقاطع در واحد طول نیز به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$f_{CD} = C_D \rho b V^2 \quad (5)$$

که C_D ضریب درگ جریان متقاطع، ρ چگالی سیال و b نیم عرض هستند. نیروی بویانسی در واحد طول نیز به شکل زیر خواهد بود:

گشتاوری که منجر به حرکت پیچ می‌شود نیز می‌تواند با استفاده از نیروی هیو تعیین گردد. در واقع با مشخص شدن جملات نیرویی، محاسبه‌ی گشتاور امری امکان‌پذیر خواهد بود. با این وجود، نیازمند محاسبه مرکز اثر نیروها خواهیم بود. در اینجا دو روش برای محاسبه‌ی گشتاور پیچ بیان می‌گردد.

الف- روش اول: گشتاور پیچ تنها می‌تواند متأثر از نیروی عمودی کل وارد بر شناور باشد؛ بنابراین، خواهیم داشت:

$$M_{yy} = (F_{z_p} x_{c_p} + F_{z_s} x_{c_s}) = F_z x_c \quad (11)$$

نیروهای عمودی F_{z_p} و F_{z_s} در سمت چپ و راست بدنه هستند که منجر به ایجاد گشتاور پیچ می‌شوند. ب- روش دوم: در این روش، بازوی گشتاور به صورت جداگانه در مقدار نیروی هر مقطع ضرب می‌گردد. در این صورت داریم:

$$\begin{aligned}
 M_{yy} = & [Q_{a_p} \ddot{x}_{CG} \sin \theta - I_{a_p} \ddot{\theta} + Q_{a_p} \ddot{z}_{CG} \cos \theta \\
 & - \int_l m_{a_p} \left(\frac{dw_{z_p}}{dt} + U \frac{\partial w_{z_p}}{\partial \xi} \right) \cos \theta d\xi \\
 & - Q_{a_p} \dot{\theta} (\dot{x}_{CG} \cos \theta - \dot{z}_{CG} \sin \theta) \\
 & + \int_l m_{a_p} w_{z_p} \dot{\theta} \sin \theta d\xi + \int_l \dot{m}_{a_p} V_P \xi d\xi \\
 & + U_P V_P m_{a_p} \xi \Big|_{stern} \\
 & + \int_l m_{a_p} V_P \frac{\partial w_{z_p}}{\partial \xi} \sin \theta d\xi \\
 & + \int_l C_D \rho b_P V_P^2 \xi d\xi \\
 & + \{\text{Similar S terms}\} \cdot \cos \psi \\
 & - \int_l a_{BF} \rho g A \cos \theta d\xi
 \end{aligned} \quad (12)$$

در این مقاله، از روش دوم استفاده می‌شود.

معادله گشتاور رول: پس از تعیین همه‌ی جملات نیرویی در سه راستای محوری، جانبی و عمودی، به راحتی می‌توان گشتاورهای وارد بر شناور در جهات مختلف را مورد محاسبه قرار داد. در این بخش، گشتاور حرکت

$$\begin{aligned}
 F_z = & \left(\int_l f_M d\xi - \int_l f_{CD} d\xi \right) \cos \psi \cos \theta - \int_l f_B d\xi \\
 = & \left(\int_l (N_{M_P} + N_{M_S}) d\xi - \int_l (f_{CD_P} + f_{CD_S}) d\xi \right) \cos \psi \cos \theta \\
 & - \int_l a_{BF} \rho g A d\xi \\
 = & \left(\int_l \left(\frac{D}{Dt} (m_{a_P} V_P) + \frac{D}{Dt} (m_{a_S} V_S) \right) d\xi \right. \\
 & \left. - \int_l (f_{CD_P} + f_{CD_S}) d\xi \right) \cos \psi \cos \theta \\
 & - \int_l a_{BF} \rho g A d\xi \\
 & (m_{a_P} \dot{V}_P + m_{a_S} \dot{V}_S + \dot{m}_{a_P} V_P + \dot{m}_{a_S} V_S) \\
 = & - \left[\int_l -U_P \frac{\partial}{\partial \xi} (m_{a_P} V_P) - U_S \frac{\partial}{\partial \xi} (m_{a_S} V_S) \right] d\xi \\
 & + \int_l (C_D \rho (b_P V_P^2 + b_S V_S^2)) d\xi \cos \psi \cos \theta \\
 & - \int_l a_{BF} \rho g A d\xi
 \end{aligned} \quad (9)$$

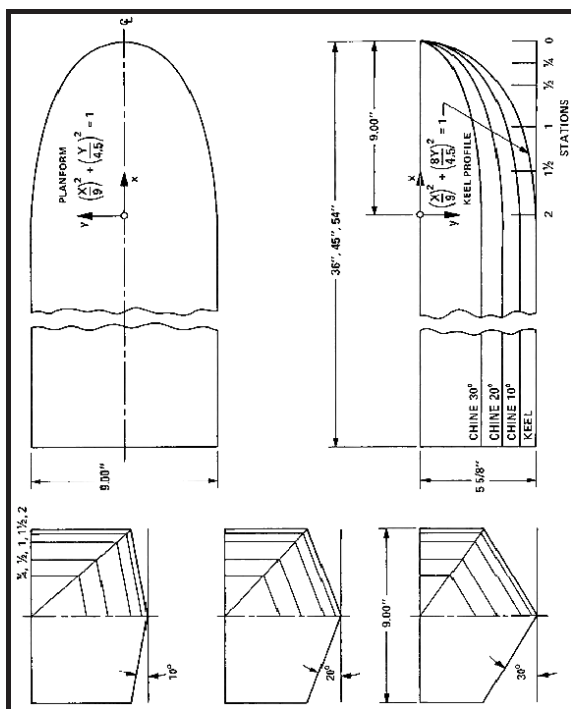
در نهایت، معادله نیرو در راستای عمودی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}
 F_z = & [-M_{a_p} \ddot{x}_{CG} \sin \theta + Q_{a_p} \ddot{\theta} \\
 & - M_{a_p} \ddot{z}_{CG} \cos \theta + \\
 & \int_l m_{a_p} \left(\frac{dw_{z_p}}{dt} + U \frac{\partial w_{z_p}}{\partial \xi} \right) \cos \theta d\xi \\
 & - M_{a_p} \dot{\theta} (\dot{x}_{CG} \cos \theta - \dot{z}_{CG} \sin \theta) \\
 & - \int_l m_{a_p} w_{z_p} \dot{\theta} \sin \theta d\xi - \int_l \dot{m}_{a_p} V_P d\xi \\
 & + U_P V_P m_{a_p} \Big|_{bow}^{stern} \\
 & - \int_l m_{a_p} V_P \frac{\partial U_P}{\partial \xi} d\xi - \int_l C_D \rho b_P V_P^2 d\xi \\
 & + \{\text{Similar S terms}\} \cdot \cos \theta \cdot \sin \psi - \int_l a_{BF} \rho g A d\xi
 \end{aligned} \quad (10)$$

معادله گشتاور پیچ

گسترش مدل ریاضی فرض بر آن بود که طول موج به اندازه‌ی کافی از طول شناور بزرگ‌تر باشد. با این وجود، نتایج به دست آمده جهت انجام طراحی‌های اولیه کاملاً مفید خواهد بود و با درصدی خطا می‌توان از آنها استفاده نمود.

علاوه بر این، دلیل خطای مشاهده‌شده، محدودیت‌های موجود در مدل ریاضی و ساده‌سازی‌های انجام شده است. با این وجود، می‌توان با وارد نمودن ضرایب تجربی و نیمه‌تجربی به معادلات گسترش‌یافته، دقت آن را بهبود داد.



شکل (۴): بدنه پروازی.

جدول (۱): مشخصات مدل‌های آزمایش فریدسما.

Model	A	B
L/b	۵	۵
β (deg)	۲۰	۲۰
LCG (%L)	۵۹	۶۲
τ (deg)	۴	۴
V/ \sqrt{L}	۴	۶
C_{Δ}	۰/۶۰۸	۰/۶۰۸

شکل‌های (۶) تا (۸) نیز دینامیک شناور را با در نظر گرفتن حرکت رول ارزیابی نموده است. در شکل (۶)، یک زاویه رول ۵ درجه به شناور داده شده است. مشاهده می‌گردد که با گذشت چند ثانیه حرکت رول دمپ شده و حرکات هیو و پیچ تحت تأثیر امواج منظم، تغییرات

رولینگ که متأثر از نیروهای دو راستای جانبی و عمودی می‌باشد، بررسی می‌گردد.

نیروهای جانبی در سمت راست و چپ دارای مراکز تأثیر مختلفی در راستای عمودی هستند. علاوه بر این، نیروهای عمودی در سمت‌های راست و چپ نیز می‌توانند دارای مقادیر متفاوت و مراکز اثر نامتقارن باشند. هر سه عامل یادشده می‌توانند منجر به ایجاد گشتاور رول گردند؛ بنابراین، خواهیم داشت:

$$M_{xx} = (F_{y_p} - F_{y_s})z_c + (F_{z_p}y_p - F_{z_s}y_s) \quad (۱۳)$$

که M_{xx} گشتاور رول، F_{y_p} ، F_{y_s} ، F_{z_p} و F_{z_s}

نیروهای جانبی و عمودی در دو سمت بدنه هستند که پیش از این مورد محاسبه قرار گرفته‌اند. تنها نکته‌ی باقیمانده، محاسبه‌ی مراکز تأثیر نیروهای یادشده است که با استفاده از انتگرال‌گیری تعیین می‌گردند.

۷- حل معادلات حاکم

معادلات حرکت شناور به صورت زیر بازنویسی می

شوند:

$$A\ddot{x} = \ddot{g} \rightarrow \ddot{x} = A^{-1}\ddot{g} \quad (۱۴)$$

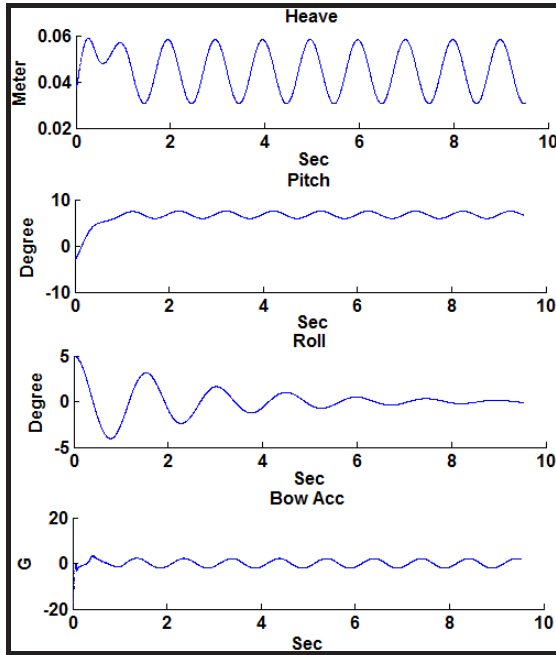
که A^{-1} معکوس ماتریس A است. این معادله با

روش رانگ کوتا مرسون حل خواهد شد.

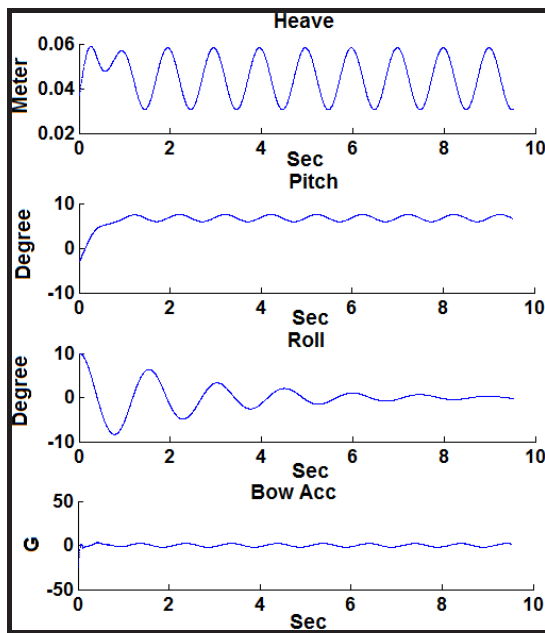
۸- نتایج

از آنجایی‌که نتایج تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی جهت اعتبارسنجی حرکت رول شناورهای پروازی در دسترس نیست، مبنای روش توسعه داده‌شده، برای معتبرسازی ریاضیات حاکم بر مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمایش‌های فریدسما [۱۵] در امواج منظم، بر روی بدنه‌های پروازی با زوایای رأس ۲۰ درجه (شکل (۴) و جدول (۱)) انجام شده است. این شناور در حالت B (جدول (۲)) قرار داده شده است. حالات مختلف برای مدل یادشده، با استفاده از نرم‌افزار مورد بررسی قرار گرفته و نتایج به دست آمده در شکل (۵) ارائه گردیده‌اند.

در شکل (۵)، نتایج مربوط به حرکات هیو و پیچ مدل B در طول موج‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در طول موج‌های بزرگ‌تر، نتایج نرم‌افزاری انطباق بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارند. این موضوع به این دلیل است که در



شکل (۶): حرکات شناور پروازی در چهار درجه آزادی تحت امواج منظم.



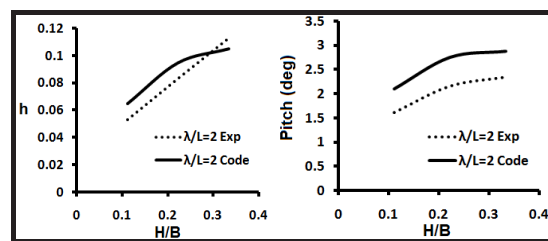
شکل (۷): دینامیک شناور پروازی در ۴ درجه آزادی با زاویه رول اولیه ۱۰ درجه.

حرکت رول شناور در امواج نامنظم نیز می‌تواند جالب توجه باشد. بدین منظور، در شکل (۹) نتایج مربوط به دینامیک هیو، پیچ و رول شناور پروازی تحت امواج نامنظم ارائه گردیده است. مشاهده می‌شود که حرکت رول می‌خواهد دمپ شود، اما حضور امواج نامنظم اجازه‌ی

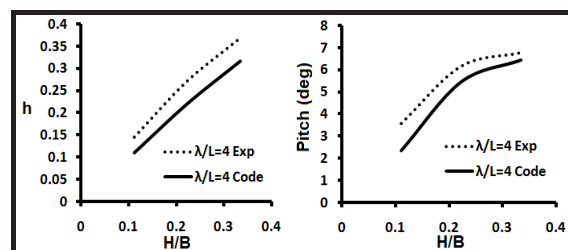
منظمی را دارا می‌باشند. مقادیر شتاب در سینه و مرکز جرم شناور نیز ارائه شده است. مقادیر شتاب کاملاً مشابه با حرکات شناور، تغییرات منظمی دارند. حالت دیگری که مورد بررسی قرار گرفته است، با زاویه‌ی رول اولیه ۱۰ می‌باشد که در شکل (۷) به تصویر کشیده شده و نتایج معقول و منطقی مشاهده می‌گردد. به دلیل صرف نظر از اسوی و یاو، حرکت رول پس از چند ثانیه دمپ می‌شود. در حالت رول ۱۵ درجه نتایج تقریباً یکسانی دیده می‌شود. تغییرات زاویه رول نمی‌تواند تأثیر چندانی بر حرکات هیو و پیچ و مقادیر شتاب داشته باشد. مگر اینکه، حرکات یاو و اسوی نیز در نظر گرفته شوند. این موضوع، در مطالعه‌ی بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول (۲): حالات مختلف مورد مطالعه برای مدل A.

Model B			
NO	H/b	λ/L	h/H
1	۰/۱۱۱	۱	۰/۱۶
2	۰/۱۱۱	۱/۵	۰/۳۷
3	۰/۱۱۱	۲	۰/۶۴
4	۰/۲۲۲	۲	۰/۵
5	۰/۳۳۴	۲	۰/۴۵
6	۰/۱۱۱	۳	۱/۴۵
7	۰/۱۱۱	۴	۱/۷۵
8	۰/۲۲۲	۴	۱/۶۳
9	۰/۳۳۴	۴	۱/۴۷
10	۰/۱۱۱	۶	۱/۰۸



الف



ب

شکل (۵): مقایسه‌ی نتایج هیو و پیچ با نتایج آزمایشگاهی

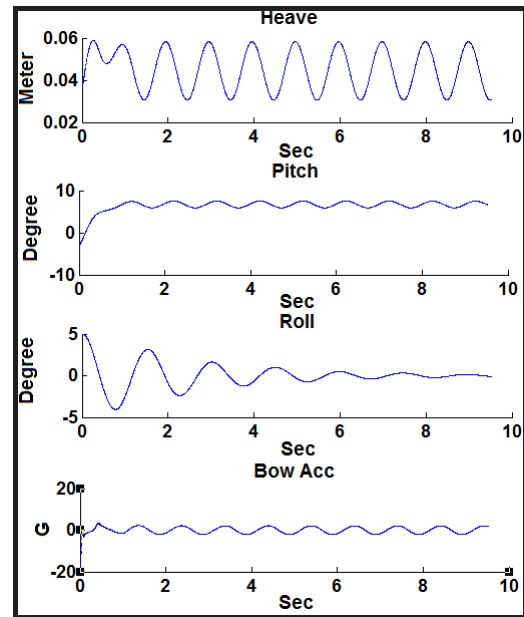
خود را بر حرکات هیو و پیچ و شتاب‌های وارده نیز خواهد داشت.

۹- جمع‌بندی

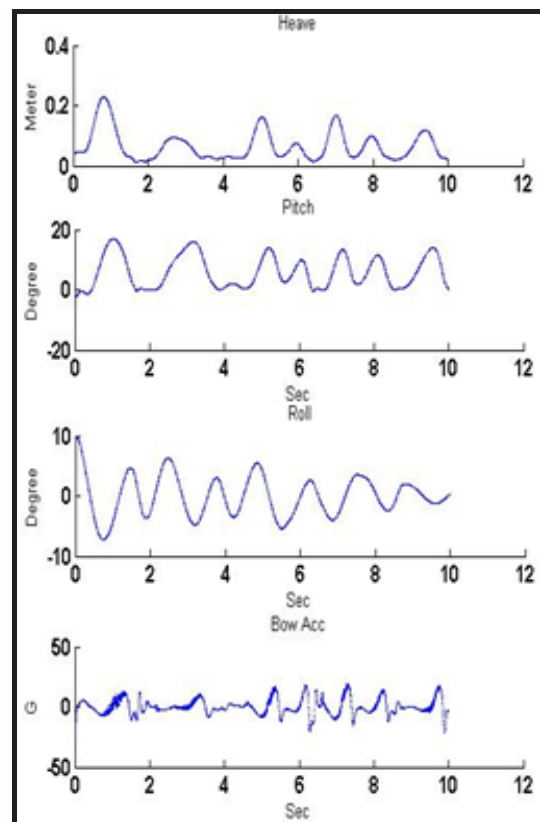
مدل‌های ریاضی که تاکنون گسترش یافته‌اند، تنها توانایی تحلیل دینامیک شناور در دو درجه آزادی را دارا می‌باشند. در این مقاله، با استفاده از برخورد نامتقارن مقطع گوه‌ای شکل به سطح آب و استفاده از تئوری $2D+t$ ، یک مدل ریاضی برای تحلیل هم‌زمان هیو، پیچ و رول توسعه داده شده است. علاوه بر این، تئوری مومنوم و جرم افزوده به کار گرفته شده‌اند. شرایط دریایی نیز به صورت امواج منظم و نامنظم مدل‌سازی می‌شود. در این شرایط، جهت اعتبارسنجی مدل ریاضی از نتایج آزمایشگاهی استفاده می‌گردد که از ویژگی‌های مهم این مطالعه می‌باشد. اعتبارسنجی انجام شده نشان می‌دهد که مدل فعلی قادر است تا با دقتی مناسب، حرکات شناور پروازی را شبیه‌سازی کند. علاوه بر این، حرکات شناور در سه زاویه‌ی رول اولیه‌ی متفاوت ارزیابی گردید و مشاهده شد که شناور رفتاری قابل‌انتظار از خود نشان می‌دهد. در مطالعه بعدی، دینامیک شناور پروازی با در نظر گرفتن حرکات یاو و اسوی ارزیابی خواهد شد. همچنین، سعی می‌شود تا به تدریج دقت مدل ارائه شده را با استفاده از تکنیک‌های مختلف بهبود داد.

منابع:

- [1] Faltinsen, O. M., "Hydrodynamics of high-speed marine vehicles," Cambridge University Press, 2005.
- [2] Müller-Graf, B., "Dynamic stability of high speed small craft," WEGEMT Association, 25th School of Craft Technology, Atene, Greece, 1997.
- [3] Zhao, R., "A simplified non-linear analysis of a high speed planing craft in calm water," 4th Int. Conf. On Fast Sea Transportation (FAST), Sydney, Australia, 1997.
- [4] Lai, C., and Troesch, A. W., "Modeling issues related to the hydrodynamics of 3-dimensional steady planing," Journal of Ship Research, Vol. 39, No. 1, 1995.
- [5] Martin, M., "Theoretical predictions of motions of high-speed planing boats in waves," David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center, DTNSRDC 76/0069, 1976.
- [6] Zarnick, E., "A nonlinear mathematical model of motions of a planing boat in regular waves," David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center, DTNSRDC 78/032, 1978.
- [7] Zarnick, E., "A nonlinear mathematical model of motions of a planing boat in irregular waves," DTNSRDC/SPD 0867-01, 1979.



شکل (۸): هیو، پیچ و رول شناور پروازی با زاویه رول اولیه ۱۵ درجه.



شکل (۹): دینامیک شناور پروازی در امواج نامنظم در درجات آزادی هیو، پیچ و رول.

- [8] Keuning, J. A., "The non-linear behavior of fast mono-hulls in head waves," PhD Thesis, Technische Universiteit Delft, 1994.
- [9] Payne, P., "Contribution to planing theory," Ocean Engineering Vol. 22, No. 7, 1995.
- [10] Garne, K., "Improved time domain simulation of planing hulls in waves by correction of the near transom lift," International Shipbuilding Progress, Vol. 52, No. 3, pp. 201-230, 2005.
- [11] Payne, P., "BOAT3D: a time-domain suite of computer programs for planing craft, version 2.3," Payne Associates, Severna Park, Maryland, 1995.
- [۱۲] سلیمان‌نیا سیدمهدی، قدیمی پرویز، فیضی چکاب امین و دشتی‌منش عباس، «تحلیل برخورد نامتقارن یک مقطع گوه‌ای شکل به سطح آب»، نشریه علوم و فناوری دریا، نوشهر، ۱۳۹۱.
- [13] Wagner, H., "U. ber stoX-und Gleitvorga.nge an der Oberfla.che von Flu. ssigkeiten. Zeitschrift fr.," Angewandte Mathematik und Mechanik, Vol. 12, pp. 192–215, 1932.
- [14] Sebastianii, L., Bruzzone, D. and Gualeni, P., "A practical method for the prediction of planing craft motions in regular and irregular waves," Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, pp. 687–696, 2008.
- [15] Fridsma, G., "A systematic study of the rough-water performance of Planing boats," Stevens Institute of Technology, Davidson Laboratory, Report 1275, Nov., 1969.