

تدوین اصول و مدل ریاضی اندازه گیری حرکات ششگانه شناور پروازی در دریا

حمید زراعتگر^{۱*}، محمد فارسی^۲، رضا یوسف نژاد میاندهی^۳

۱- حمید زراعتگر، استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- محمد فارسی، کارشناسی ارشد از دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- رضا یوسف نژاد میاندهی، دانشجوی دکترا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

اندازه گیری حرکات ششگانه یک شناور در امواج دریا که به Seakeeping Trial معروف است موضوع مهمی است که برای برخی از شناورها انجام می شود. هدف از این تحقیق، تدوین اصول و روش اندازه گیری دریامانی شناور پروازی در دریا می باشد. بدین منظور از اصول مورد استفاده در روش اندازه گیری دریامانی شناور جابجایی استفاده می گردد. شناور پروازی به دلیل داشتن تریم دینامیکی و همچنین شتابها و رفتار دینامیکی که تغییر آن نسبت به زمان بسیار شدیدتر از شناورهای جابجایی می باشد، عملاً پیچیدگی های بیشتری در حرکات از خود بروز می دهد. در این مقاله برای اولین بار سعی می شود تا روابط حاکم مابین مقادیر اندازه گیری شده شتاب خطی و نرخ سرعت زاویه ای در مختصات محلی و آنچه بعنوان سرج، اسوی، هیو، رول، پیچ و یاو در سیستم مختصات هیدرو دینامیکی شناخته می شود، برای شناور پروازی تدوین گردد. بدین منظور ابتدا انواع سیستم های مختصات تعریف می گردد. سپس تبدیلات بین این سیستم های مختصات ارائه می گردد. دستورالعمل تست دریامانی و اصول تبدیل و انتقال ارائه می گردد. نمونه اندازه گیری در دریا و تبدیلات مربوطه ارائه می گردد. در آخر نتایج حاصله از این تحقیق تشریح می گردد.

کلمات کلیدی: دریامانی، شناور پروازی، مدل ریاضی، تست میدانی

DEVELOPMENT OF PRINCIPLES OF SEAKEEPING TRIALS OF PLANING BOAT IN SEA WAVES

H. Zeraatgar¹, M. Farsi², R. Yousef Nejad Miyandehi³

1- Assistant Professor, Amirkabir University of Technology

2- MSC in Naval Architecture, Amirkabir University of Technology

3- Ph.D Candidate, Amirkabir University of Technology

Abstract

Seakeeping recording of a vessel, so called seakeeping trial, is an important issue which is performed for some vessels. The goal of this research is to develop principles of seakeeping trial of planing vessel in sea waves. For this purpose it is initiated with the principles of ship seakeeping in sea trial. The main feature of a planing vessel is dynamic trim, high slamming accelerations and impact nature of slamming acceleration. This behavior makes its seakeeping more complicated. In this study, for the first time, an attempt has been made to extract boat six motions in hydrodynamic coordinate system from measured accelerations and rate of angular motions in body coordinate system. To realize the goal, the three coordinate system and transformations are defined. An instruction for seakeeping trial of planing vessel is introduced.

* نویسنده مسوول مقاله hamidz@aut.ac.ir

A set of seakeeping trial on boat is done and the results of measurement are analyzed according to above principles. Validation and conclusions are also presented.

Keywords: Seakeeping, Planing Craft, Mathematical Model, Sea Trial

۱- مقدمه

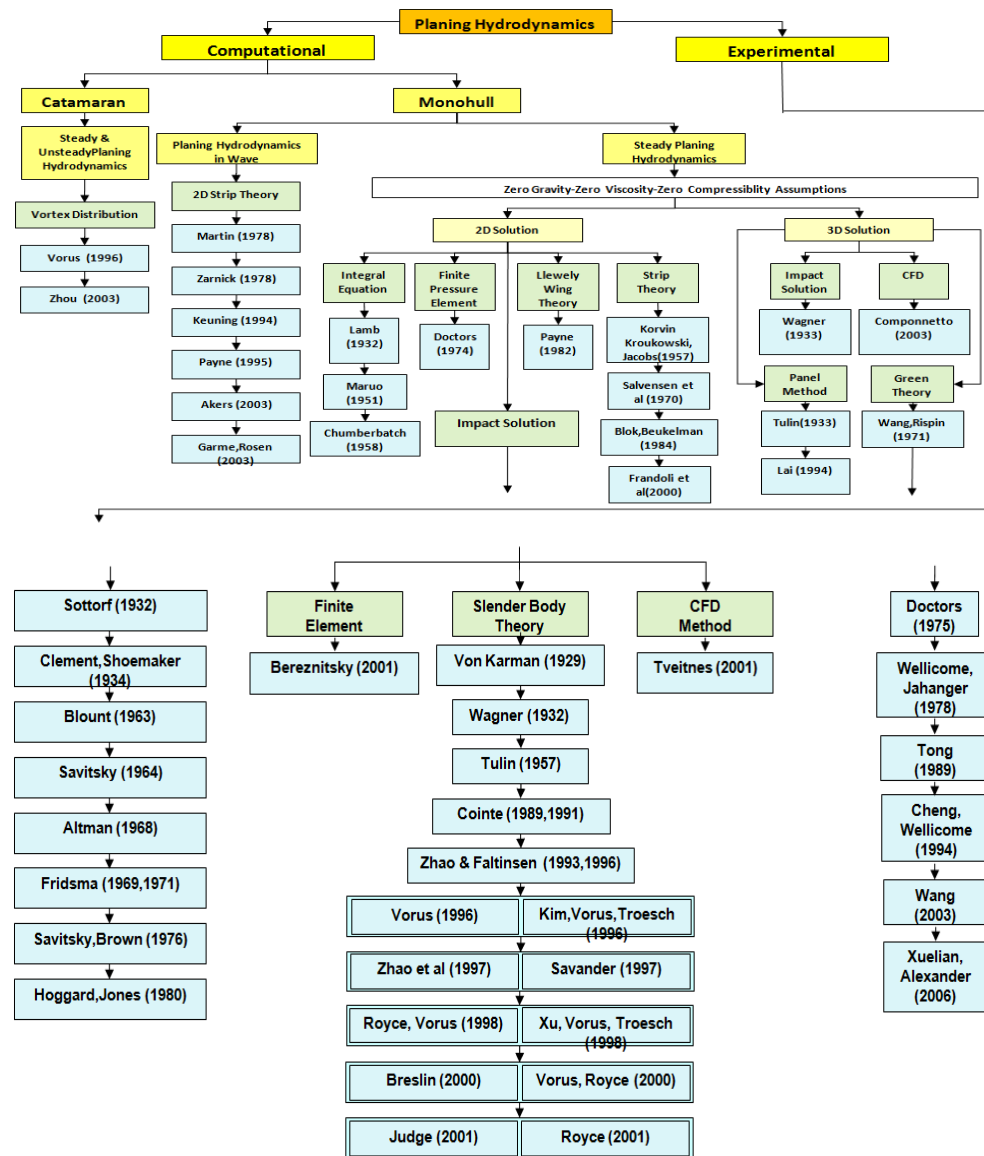
بدلیل پیچیدگی‌های ذاتی در دینامیک شناور پروازی در موج و عدم توسعه‌یافتگی کافی روش‌های محاسباتی، روش ثبت میدانی برای اندازه‌گیری دینامیک شناور پروازی امری اجتناب‌ناپذیر است. وسایل اندازه‌گیری مورد استفاده معمولاً شتاب‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری شتاب‌های خطی و اندازه‌گیرهای نرخ حرکات زاویه‌ای می‌باشند. وسایل اندازه‌گیری را می‌توان به هر نقطه از شناور متصل نمود، بنابراین وسایل اندازه‌گیری همراه با شناور به حرکت در می‌آیند. آنچه که بعنوان حرکات ششگانه شناور شامل سرج، سوی، هیو، رول، پیچ و یاو شناخته می‌شود، حرکات شناور نسبت به صفحه آب‌خور در موقعیت مرکز ثقل می‌باشد. آنچه در هر نقطه از شناور اندازه‌گیری می‌شود، در سیستم مختصاتی است که بطور لحظه‌ای با آن نقطه حرکت می‌کند.

بر اساس اصول مورد استفاده در دینامیک شناور، دینامیک ناشی از مانور و دینامیک ناشی از دریامانی تفکیک گردیده‌اند. شاید این مسئله ناشی از تفاوت ماهیت این دو دینامیک و همچنین ناشی از ساده‌سازی رفتارها باشد. بنابراین، برای استفاده مستقیم از تست‌های ناشی از اندازه‌گیری رفتار شناور در امواج دریا لازم است که این تفکیک اعمال گردد. برای تفکیک هیدرودینامیک ناشی از دریامانی و هیدرودینامیک ناشی از مانور لازم است دستورالعمل صحیحی به هنگام تست اعمال گردد.

شناور پروازی به دلیل داشتن تریم دینامیکی به هنگام تریال و همچنین شتاب‌ها و رفتار دینامیکی که تغییر آن نسبت به زمان بسیار شدیدتر از شناورهای جابجایی است، عملاً پیچیدگی‌های بیشتری در حرکات از خود بروز می‌دهد.

هیدرودینامیک شناور را شاید بتوان به چهار دسته اصلی هیدرودینامیک در حالت دائم (مقاومت)، هیدرودینامیک پروانه، هیدرودینامیک در موج (دریامانی) و هیدرودینامیک مانور تقسیم نمود. اصولاً سه روش برای دستیابی به هیدرودینامیک‌های مذکور وجود دارد که عبارتند از روش‌های محاسباتی (روش-های تجربی و روش‌های عددی)، تست مدل و تست میدانی. هر یک از روش‌های مذکور کارکرد مربوط به خود را دارند. دقت روش‌ها برای هر یک از دسته‌ها و برای انواع شناورها متفاوت است. شاید در یک نگاه کلی بتوان گفت که هر چه دینامیک موجود در دسته‌ها و شناورها قوی‌تر شده و تغییرات نسبت به زمان شدیدتر باشد، پیچیدگی‌های آن دسته از هیدرودینامیک بیشتر می‌گردد. هر چه پیچیدگی‌ها بیشتر می‌شود، دقت روش‌های محاسباتی کمتر و استفاده از روش‌های اندازه‌گیری برای دستیابی به رفتارهای هیدرودینامیکی ضروری‌تر می‌گردد.

علی‌رغم تلاش‌های بسیار زیاد در ۷۰ سال گذشته برای دستیابی به رفتار هیدرودینامیکی شناور پروازی در امواج دریا و موفقیت‌های بزرگ حاصله، ضعف‌های زیادی در آن ملاحظه می‌گردد. فلوجارت شکل ۱ مروری کلی بر کارهای مهم انجام شده در زمینه هیدرودینامیک شناورهای پروازی را ارائه می‌نماید [۱۱]. همانطوریکه در فلوجارت ملاحظه می‌شود، کارهای اساسی انجام شده در دو دسته محاسباتی و تجربی تفکیک شده است. در بخش محاسباتی به دو بخش مونوهایل و کاتاماران و سپس به دو بخش هیدرودینامیک جریان دائم و هیدرودینامیک در موج تقسیم شده است. در بخش تجربی تنها به تست مدل پرداخته شده است. تست‌های میدانی و خصوصاً تست‌های دریامانی در این فلوجارت نیامده است.



شکل ۱- کارهای انجام شده بر روی دینامیک شناورهای تندرو در قالب یک درخت [۱۱]

عبارتند از: یک شتاب سنج، Rate gyro دو محوری، GPS، ۳۲ کرنش سنج و ۶ فشار سنج. Chiu [۳] سیستم ثبت رفتاری را مورد استفاده قرار داده است که توانایی ثبت شتاب، زوایا و تخمین ارتفاع امواج را دارد. Garne [۶] سیستم ثبت رفتاری را مورد استفاده قرار داده است که توانایی ثبت شتاب و زوایا را دارد. ارتفاع امواج دریا نیز به کمک اطلاعات یک بویه محاسبه می‌شود.

Mørch و Jørgen [۸] سیستم ثبت رفتاری را مورد استفاده قرار داده است که توانایی ثبت شتاب، فشار و

تست میدانی دریامانی شناور پروازی علی‌رغم سابقه خوب از توسعه یافتگی و یکنواختی برخوردار نمی‌باشد. با مروری بر برخی از منابع میتوان به وضعیت عمومی این تستها پی برد. Ghozlan [۷] سیستم ثبت رفتاری را مورد استفاده قرار داده است که توانایی ثبت کرنش، حرکات و ارتفاع امواج را دارد و می‌تواند بر روی شناورهای جابجایی نظامی و غیرنظامی نصب شود. Carrera [۲] سیستم ثبت رفتاری را مورد استفاده قرار داده است که توانایی ثبت شتاب، زوایا، فشار و کرنش را دارد. تجهیزات به کار رفته در این سیستم

مرکز مختصات این سیستم بر روی W قرار گرفته است. محور X_h در جهت سر کشتی به سمت جلو، Y_h به سمت راست کشتی (که ایندو صفحه‌ای همواره موازی سطح آزاد آب می‌سازند) و Z_h بسمت پایین می‌باشد. حرکت نوسانی کشتی حول این سیستم مختصات می‌باشد. بردار عمومی مکانی در این سیستم مختصات را می‌توان بشرح زیر نوشت:

$$\xi = [\xi_1 \ \xi_2 \ \xi_3 \ \xi_4 \ \xi_5 \ \xi_6]^T \quad (2)$$

۲-۳- سیستم مختصات متصل به کشتی (b-frame)

مرکز مختصات این سیستم بر نقطه O قرار گرفته است. مرکز مختصات این سیستم با فاصله LCO از وسط طولی کشتی بسمت پاشنه، بر محور تقارن صفحه آبخور در جهت عرضی و با موقعیت عمودی VCO نسبت به خط پایه قرار گرفته است. بر اساس شکل ۲ این سیستم مختصات به بدنه کشتی متصل شده و کلیه حرکات خطی و زاویه‌ای کشتی را خواهد داشت. X_b, Y_b, Z_b نشان دهنده سه محور مختصات این سیستم می‌باشند.

بر اساس شکل ۱ مرکز ثقل کشتی G نسبت به O در موقعیت $r_g^b = [x_g \ y_g \ z_g]^T$ قرار گرفته است. همچنین W مرکز سیستم مختصات هیدرودینامیکی نسبت به O در موقعیت $r_w^b = [x_w \ y_w \ z_w]^T$ قرار گرفته است. بنابراین سیستم مختصات متصل به کشتی حول سیستم مختصات هیدرودینامیکی حرکات نوسانی انجام می‌دهد.

مرکز O دستگاه مختصات متصل به کشتی، دارای سه حرکت خطی و سه حرکت زاویه‌ای نسبت به دستگاه مختصات ثابت بشرح زیر می‌باشد:

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{V}_o^n \\ \vec{\omega}_b^n \end{bmatrix} \quad (3)$$

کرنش را دارد. تجهیزات به کار رفته در این سیستم عبارتند از ۱۴ سنسور فشار، ۶ کرنش سنج، ۳ شتاب سنج برای راستای عمودی و یک سنسور جابجایی عمودی. $Ambrosovskaya$ و $Ambrosovsky$ [۱] سیستم ثبت رفتاری را مورد استفاده قرار داده است که برای تخمین مسیر حرکت (مانور) شناورهای تندرو طراحی شده است.

در این مقاله برای اولین بار سعی می‌شود تا روابط حاکم مابین مقادیر اندازه‌گیری شده شتاب خطی و نرخ سرعت زاویه‌ای در مختصات محلی و آنچه بعنوان سرج، سوی، هیو، رول، پیچ و یاو در سیستم مختصات هیدرودینامیکی شناخته می‌شود، تدوین گردد. بدین منظور ابتدا انواع سیستم‌های مختصات تعریف می‌گردد. سپس تبدیلات بین این سیستم‌های مختصات ارائه می‌گردد. دستورالعمل تست درyamانی و اصول تبدیل و انتقال ارائه می‌گردد. نمونه اندازه‌گیری در دریا و تبدیلات مربوطه ارائه می‌گردد. در آخر نتایج حاصله از این تحقیق تشریح می‌گردد.

۲- سیستم مختصات در تحلیل غیرخطی دینامیک شناور [۹]

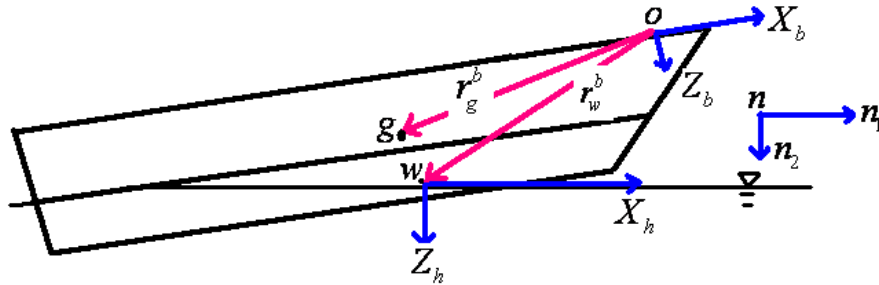
۲-۱- سیستم مختصات ثابت (n-frame)

شکل ۲ سه سیستم مختصات مورد استفاده در این تحقیق را بر روی یک شناور پروازی نشان می‌دهد. در سیستم مختصات متصل به زمین X_n به سمت شمال، Y_n به سمت شرق و Z_n بر صفحه مماسی $X_n - Y_n$ عمود بوده و به سمت عمق زمین می‌باشد. موقعیت مکانی در این سیستم با بردار $P^n = [n \ e \ d]^T$ و زوایای اولیه بصورت برداری $\Theta = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ تعریف شده است. بنابراین در حالت کلی می‌توان شش درجه آزادی در این سیستم را بصورت زیر نشان داد.

$$\eta = [n \ e \ d \ \phi \ \theta \ \psi]^T \quad (1)$$

۲-۲- سیستم مختصات هیدرودینامیکی (h-frame)

این سیستم مختصات در راستای مماس بر مسیر کشتی با سرعت ثابت U نسبت به سیستم مختصات ثابت در حال حرکت می‌باشد. بر اساس شکل شماره ۲



شکل ۲- تعریف سیستم‌های مختصات و مراکز آنها. سیستم مختصات متصل به کشتی (b-frame) به مرکزیت نقطه O با هر موقعیت دلخواه، سیستم مختصات هیدرودینامیکی (h-frame) به مرکزیت W که بر روی خط آب راکد و بالای مرکز ثقل کشتی G قرار می‌گیرد.

۳- روابط بین سرعت‌ها و شتابها در سه سیستم مختصات

اگر سرعت خطی مرکز O را نسبت به دستگاه مختصات ثابت بدانیم و برابر \vec{v}_o بوده و سرعت خطی مرکز W نسبت به سیستم مختصات ثابت را با \vec{v}_w نشان دهیم، آنگاه رابطه بین سرعت‌های \vec{v}_o و \vec{v}_w بشرح زیر است:

$$\begin{aligned} \vec{v}_w &= \vec{v}_o + \omega_{bn} \times \vec{r}_w \\ \vec{\omega}_{bn} &= \vec{\omega}_{bn} \\ \vec{\omega}_{bn} &= \vec{\omega}_{hb} + \vec{\omega}_{bn} = \vec{0} \end{aligned} \quad (7)$$

در اینجا $\vec{\omega}_{bn}$ سرعت زاویه دستگاه مختصات متصل به کشتی را نسبت به دستگاه مختصات ثابت نشان می‌دهد، به عبارت دیگر سرعت زاویه‌ای مطلق کشتی می‌باشد. بردار \vec{r}_w بر اساس شکل ۱ برداری از مبدا O به W می‌باشد.

سرعت نقطه W را می‌توان در دستگاه مختصات متصل به کشتی نیز نوشت که همان سرعت نسبی نقطه W نسبت به O است و عبارتست از:

$$\begin{aligned} \vec{v}_w^b &= \vec{v}_o^b + \omega_{bn}^b \times \vec{r}_w^b \\ \vec{\omega}_{hb}^b &= -\vec{\omega}_{bh}^b = -\vec{\omega}_{bn}^b \end{aligned} \quad (8)$$

برای تبدیل ضرب برداری به ضرب ساده، ماتریس اسکویو S بشرح زیر تعریف می‌گردد:

$$\begin{aligned} \vec{V} &= \bar{V} + \delta V \\ \bar{V} &= [U, 0, 0, 0, 0, 0]^T \\ \delta V &= [\delta u, \delta v, \delta w, \delta p, \delta q, \delta r]^T \end{aligned} \quad (4)$$

۲-۴- ماتریس چرخش

چرخش حول محور i بمقدار زاویه α را با عبارت $R_{i,\alpha}$ که یک ماتریس 3×3 است نشان می‌دهند. بر این اساس چرخش حول یک محور برای سه محور X، Y و Z را می‌توان بصورت زیر نشان داد:

$$\begin{aligned} R_{x,\phi} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \\ R_{y,\theta} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \\ R_{z,\psi} &= \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

که در رابطه (۵) زوایای ϕ ، θ و ψ زوایای اویلر هستند. اگر چرخش حول چند محور انجام شود، آنگاه در چرخش با زاویه بزرگ ترتیب چرخش محورها اهمیت دارد. همچنین حاصلضرب ماتریس چرخش نشان دهنده چرخش حول چند محور است. ماتریس‌های بالا از خواص زیر برخوردار هستند:

$$\begin{aligned} \det \bar{R} &= I \\ R.R^T &= I \\ R^T &= R^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

متصل به بدنه و دستگاه مختصات هیدرودینامیکی سه زاویه چرخش ناشی از سه حرکت رول، پیچ و یاو می‌باشد، بنابراین ماتریس چرخش بصورت زیر خواهد بود:

$$R_b^h(\Theta) = R_{z,\psi} R_{y,\theta} R_{x,\phi}$$

با فرض کوچک بودن زاویه یاو می‌توان نوشت:

$$\psi \cong 0 \rightarrow R_b^h(\Theta) = R_{y,\theta} R_{x,\phi} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \theta \sin \psi & \sin \theta \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ -\sin \theta \cos \psi & \sin \theta \sin \psi & \cos \theta \end{bmatrix}$$

برای بیشتر زمان‌ها مقادیر حرکات زاویه‌ای نوسانی پیچ و رول دستگاه مختصات متصل به بدنه، حول دستگاه مختصات هیدرودینامیکی نیز کوچک است پس می‌توان نوشت (زوایا بر حسب رادیان می‌باشد):

$$R_b^h(\Theta) = \begin{bmatrix} 1 & -\psi & \theta \\ \psi & 1 & -\phi \\ -\theta & \phi & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

در حالی که زوایا بسیار کوچک باشد به ماتریس یکه تبدیل می‌شوند،

$$R_b^h(\Theta) = I_{3 \times 3}$$

بر اساس رابطه (۱۰)، رابطه بین سرعت خطی و زاویه‌ای دستگاه مختصات هیدرودینامیکی و دستگاه مختصات متصل به بدنه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} R_b^h(\Theta) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_b^h(\Theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_w^h \\ \omega_{bh}^h \end{bmatrix} = H(r_w^b) \begin{bmatrix} v_o^b \\ \omega_{bh}^b \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_w^b \\ \omega_{bh}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_b^h(\Theta) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_b^h(\Theta) \end{bmatrix} \bullet H(r_w^b) \begin{bmatrix} v_o^b \\ \omega_{bh}^b \end{bmatrix}$$

در رابطه بالا $R_b^h(\Theta) = R_h^b(\Theta)^{-1}$ می‌باشد.

$$S(r_w^b) = -S^T(r_w^b) = \begin{bmatrix} 0 & -z_w & y_w \\ z_w & 0 & -x_w \\ -y_w & x_w & 0 \end{bmatrix}$$

سیس ضرب برداری را بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\omega_{bn}^b \times r_w^b = -r_w^b \times \omega_{bn}^b = -S(r_w^b) \omega_{bn}^b = S^T(r_w^b) \omega_{bn}^b$$

رابطه (۸) را میتوان به کمک ماتریس (۹) کاملا از حالت برداری به حالت ماتریسی تبدیل نمود. بدین منظور ماتریس چرخش- انتقال $H(r_w^b)$ را بصورت زیر تعریف می‌کنیم،

$$H(r_w^b) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_w & -y_w \\ 0 & 1 & 0 & -z_w & 0 & x_w \\ 0 & 0 & 1 & y_w & -x_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

آنگاه بردار سرعت W در سیستم مختصات متصل به کشتی را بر اساس سرعت مرکز سیستم مختصات متصل به کشتی O بشرح زیر می‌توان نوشت:

(۱۰)

$$\begin{bmatrix} v_w^b \\ \omega_{bh}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_w & -y_w \\ 0 & 1 & 0 & -z_w & 0 & x_w \\ 0 & 0 & 1 & y_w & -x_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} v_o^b \\ \omega_{bn}^b \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_{wx}^b \\ v_{wy}^b \\ v_{wz}^b \\ \omega_{bhx}^b \\ \omega_{bhy}^b \\ \omega_{bhz}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_w & -y_w \\ 0 & 1 & 0 & -z_w & 0 & x_w \\ 0 & 0 & 1 & y_w & -x_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} v_{Ox}^b \\ v_{Oy}^b \\ v_{Oz}^b \\ \omega_{bnx}^b \\ \omega_{bny}^b \\ \omega_{bnz}^b \end{bmatrix}$$

۳-۱- تبدیل سرعت از مختصات متصل به بدنه به مختصات هیدرودینامیکی

به وسیله ماتریس چرخش مناسب می‌توان سرعت‌ها را به سیستم مختصات هیدرودینامیکی انتقال داد. به دلیل اینکه تفاوت اصلی بین دستگاه مختصات

$$\begin{bmatrix} R_b^h(\Theta) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_b^h(\Theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \theta \sin \psi & \sin \theta & 0 & 0 & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta \cos \psi & \sin \theta \sin \psi & \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta \cos \psi & -\cos \theta \sin \psi & \sin \theta \\ 0 & 0 & 0 & \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \theta \cos \psi & \sin \theta \sin \psi & \cos \theta \end{bmatrix}$$

به همین ترتیب نیروهای در سیستم مختصات متصل به بدنه F^b را می توان به نیروها در سیستم مختصات هیدرودینامیکی F^h تبدیل نمود.

$$F^h = J^T(\Theta)F^b \quad (14)$$

۳-۲- تبدیل سرعت از مختصات متصل به بدنه به مختصات ثابت

تبدیل سرعت نقطه O را بین دو سیستم مختصات می توان بصورت زیر نوشت:

$$V_O^n = R_b^n(\Theta)V_O^b$$

ماتریس چرخش را می توان از زاویه چرخش اوپلر به ترتیب در جهات z, y و x مابین سیستم مختصات ثابت و سیستم مختصات متصل به بدنه بشرح زیر تعریف نمود،

$$R_b^n(\Theta) = R_{z,\psi} R_{y,\theta} R_{x,\phi}$$

که $R_b^n(\Theta)$ را می توان بشرح زیر نوشت:

$$R_b^n(\Theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \theta \sin \psi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \sin \psi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \phi + \sin \theta \sin \psi \sin \phi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \theta \sin \theta \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix}$$

رابطه بین سرعت زاویه ای در دستگاه مختصات ثابت $\dot{\Theta}$ و دستگاه مختصات متصل به بدنه ω_{bn}^b را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\dot{\Theta} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \dot{\Theta} = T_{\Theta}(\Theta)\omega_{bn}^b,$$

ماتریس $T_{\Theta}(\Theta)$ که ماتریس انتقال زاویه عمودی اوپلر نامیده می شود را می توان بصورت زیر تعریف نمود:

رابطه سرعت در سیستم مختصات متصل به بدنه و سیستم مختصات هیدرودینامیکی بشرح زیر است:

تغییر سرعت در دستگاه مختصات هیدرودینامیکی را نشان می دهد،

$$(12)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \\ \dot{\xi}_3 \\ \dot{\xi}_4 \\ \dot{\xi}_5 \\ \dot{\xi}_6 \end{bmatrix}, \vec{V} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix},$$

$$J(\Theta) = \begin{bmatrix} R_b^h(\Theta) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_b^h(\Theta) \end{bmatrix} H(r_w^b) \stackrel{\Theta \text{ Small}}{\cong} H(r_w^b)$$

$$\dot{\xi} = J(\Theta)\vec{V}$$

به دلیل اینکه سیستم مختصات هیدرودینامیکی با سرعت ثابت پیشروی کشتی U در حال حرکت است پس به ترم سرعت در جهت x هیدرودینامیکی مقدار U اضافه می گردد.

$$(13)$$

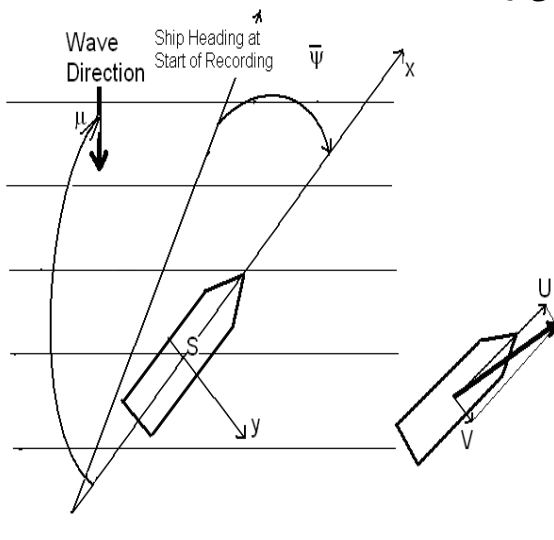
$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_1 + U \\ \dot{\xi}_2 \\ \dot{\xi}_3 \\ \dot{\xi}_4 \\ \dot{\xi}_5 \\ \dot{\xi}_6 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \theta \sin \psi & \sin \theta & 0 & 0 & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta \cos \psi & \sin \theta \sin \psi & \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta \cos \psi & -\cos \theta \sin \psi & \sin \theta \\ 0 & 0 & 0 & \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \theta \cos \psi & \sin \theta \sin \psi & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

۴- اصول ثبت رفتار شناور پروازی در دریا و معتبر سازی

۴-۱- اصول ثبت رفتار

شکل ۳ کاربری اصول مطرح شده تا بحال را در این تحقیق نشان می‌دهد. موج نامنظمی در جهت دلخواه سطح دریا را متلاطم ساخته است. شناور در لحظه شروع اندازه‌گیری نسبت به موج زاویه برخوردی دارد که در لحظه حاضر زاویه برخورد به مقدار متوسط $\bar{\psi}$ نسبت به لحظه شروع اندازه‌گیری تغییر کرده است. در این لحظه زاویه برخورد کشتی و موج μ می‌باشد. در حالت عمومی سرعت پیشروی شناور با محور X زاویه‌ای می‌سازد که منجر به شکل‌گیری دو سرعت U و V می‌گردد.



شکل ۳- نمایش متغیرهای اصلی برای شناور در حال اندازه‌گیری

در بخش ۲ و ۳ از این تحقیق، تئوری و اساس روابط بین سرعتها و شتابها در سیستم مختصات مختلف بر روی شناور بیان گردید که اصولی مرسوم در هیدرومکانیک و دینامیک شناور در دریا می‌باشد. بکارگیری اصول مذکور برای شناور پروازی با در نظرگرفتن واقعیتهای موجود بر روی شناور و محیط دریا آسان نمی‌باشد. نویسندگان این مقاله پس از تستهای مکرر و سعی و خطا به روشی مفید و عملی در

$$T_{\Theta}(\Theta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix}, \quad \theta \neq \pm 90^\circ$$

در نتیجه رابطه کلی بین سرعت در دو سیستم مختصات را می‌توان بصورت زیر نوشت:

(۱۵)

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} \dot{n} \\ \dot{e} \\ \dot{d} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} K(\Theta) = \begin{bmatrix} R_b^n(\Theta) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & T_{\Theta}(\Theta) \end{bmatrix}, \quad \theta \neq \pm 90^\circ$$

$$\dot{\eta} = K(\Theta)V$$

۳-۳- رابطه شتاب با فرض حرکات زاویه‌ای کوچک

با فرض حرکات زاویه‌ای کوچک، تبدیل سرعت بصورت زیر خواهد بود:

(۱۶)

$$\begin{cases} u - \bar{u} \approx \xi_1 + z_{Sob}^S \xi_5 - y_{Sob}^S \xi_6 - \sin(\bar{\psi})U \xi_6 - \cos(\bar{\psi})V \xi_6 \\ v - \bar{v} \approx \xi_2 - z_{Sob}^S \xi_4 + x_{Sob}^S \xi_6 + \cos(\bar{\psi})U \xi_6 - \sin(\bar{\psi})V \xi_6 \\ w - \bar{w} \approx \xi_3 + y_{Sob}^S \xi_4 - x_{Sob}^S \xi_5 \\ p \approx \xi_4 \\ q \approx \xi_5 \\ r \approx \xi_6 \end{cases}$$

سیس شتاب به صورت زیر تبدیل می‌شود:

(۱۷)

$$\begin{cases} \dot{u} \approx \dot{\xi}_1 + z_{Sob}^S \dot{\xi}_5 - y_{Sob}^S \dot{\xi}_6 - \sin(\bar{\psi})U \dot{\xi}_6 - \cos(\bar{\psi})V \dot{\xi}_6 \\ \dot{v} \approx \dot{\xi}_2 - z_{Sob}^S \dot{\xi}_4 + x_{Sob}^S \dot{\xi}_6 + \cos(\bar{\psi})U \dot{\xi}_6 - \sin(\bar{\psi})V \dot{\xi}_6 \\ \dot{w} \approx \dot{\xi}_3 + y_{Sob}^S \dot{\xi}_4 - x_{Sob}^S \dot{\xi}_5 \\ \dot{p} \approx \dot{\xi}_4 \\ \dot{q} \approx \dot{\xi}_5 \\ \dot{r} \approx \dot{\xi}_6 \end{cases}$$

اندازه‌گیری نموده که پس از حذف نویز بشرح زیر در اختیار می‌باشند:

$$\Theta_{nb} = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}$$

$$\Theta_{hs} = \begin{bmatrix} \xi_4 \\ \xi_5 \\ \xi_6 \end{bmatrix} = \Theta_{hb} = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi - \bar{\psi} \end{bmatrix}$$

When $\bar{\psi} = 0 \rightarrow \Theta_{nb} = \Theta_{hb} = \Theta_{hs}$

بنابراین مقادیر Θ_{hs} در اختیار می‌باشد.

۸- با دو بار مشتق گرفتن نسبت به زمان مقادیر شتاب در سیستم مختصات متصل به بدنه و نتیجتاً در سیستم مختصات هیدرودینامیکی بشرح زیر محاسبه می‌گردد،

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \ddot{\xi}_4 \\ \ddot{\xi}_5 \\ \ddot{\xi}_6 \end{bmatrix}$$

۹- شتاب نقاط A و B ثبت شده توسط سنسورهای شتاب، پس از فیلتر شدن و حذف نویزها بشرح زیر در بازه زمان در اختیار می‌باشند:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix}$$

برای نقطه A:

$$\begin{cases} \dot{u} \approx \ddot{\xi}_1 + z_{Sob}^S \ddot{\xi}_5 - y_{Sob}^S \ddot{\xi}_6 \\ \dot{v} \approx \ddot{\xi}_2 - z_{Sob}^S \ddot{\xi}_4 + x_{Sob}^S \ddot{\xi}_6 + U \ddot{\xi}_6 \\ \dot{w} \approx \ddot{\xi}_3 + y_{Sob}^S \ddot{\xi}_4 - x_{Sob}^S \ddot{\xi}_5 \end{cases}$$

و برای نقطه B:

$$\begin{cases} \dot{u} \approx \ddot{\xi}_1 + z_{Sob}^S \ddot{\xi}_5 - y_{Sob}^S \ddot{\xi}_6 \\ \dot{v} \approx \ddot{\xi}_2 - z_{Sob}^S \ddot{\xi}_4 + x_{Sob}^S \ddot{\xi}_6 + U \ddot{\xi}_6 \\ \dot{w} \approx \ddot{\xi}_3 + y_{Sob}^S \ddot{\xi}_4 - x_{Sob}^S \ddot{\xi}_5 \end{cases}$$

۱۰- با یک دستگاه معادلات ساده سه معادله و سه مجهول بکمک مقادیر در نقطه A شتابها $\begin{bmatrix} \ddot{\xi}_1 & \ddot{\xi}_2 & \ddot{\xi}_3 \end{bmatrix}^T$ در بازه زمان محاسبه می‌شوند.

۱۱- با داده‌های ثبت شده برای نقطه B مجدداً شتابهای $\begin{bmatrix} \ddot{\xi}_1 & \ddot{\xi}_2 & \ddot{\xi}_3 \end{bmatrix}^T$ محاسبه می‌گردد. در صورت اختلاف نسبی قابل توجه بین مقادیر محاسبه

ثبت و تحلیل رفتار شناور پروازی دست یافته‌اند که در ذیل ارائه می‌گردد. فرض بر آن است که شناوری تندرو پروازی با بار و پرسنل معین که حدالمقدور پرسنل و بار در محل مربوط به خود ثابت هستند در اختیار می‌باشد. ترتیب انجام اندازه‌گیری و محاسبات بصورت زیر می‌باشد.

۱- موج نامنظمی با ارتفاع موثر مشخص، بصورت جبهه بلند در یک جهت مشخص در آب عمیق دور از ساحل وجود دارد.

۲- زاویه برخورد مشخصی (μ) را از قبل در نظر گرفته و از سکاندار می‌خواهیم تا این زاویه برخورد را در طول زمانی اندازه‌گیری حفظ نماید. این بدان مفهوم است که $\bar{\psi} = 0$ می‌باشد.

۳- از سکاندار می‌خواهیم که پس از رساندن سرعت شناور به یک مقدار مشخص U، تا آنجا که ممکن است شناور را در این سرعت ثابت نگه دارد.

۴- ترکیب دستور شماره ۲ و شماره ۳ به این مفهوم است که شناور دارای سرعت $V = 0$ است بعبارت دیگر زاویه دریافت صفر بوده و سرعت پیشروی و محور X بر هم منطبق هستند.

۵- در این شرایط متغیرهای معین شامل سرعت شناور، زاویه یاو و غیره در حالت دائم معین (Steady) و متغیرهای نامعین (Stochastic) شامل دامنه و پریود موج و رفتار دینامیکی شناور نیز در حالت دائم تصادفی (Stationary) قرار گرفته‌اند.

۶- بر دو نقطه پیشنهادی زیر، شتاب سنج‌ها نصب شده‌اند.

نقطه A بر روی وسط طولی شناور به مختصات تقریبی:

$$A(x_{sob}^s, y_{sob}^s, z_{sob}^s) = (0.0, 0.0, FB)$$

نقطه B بر روی سینه شناور به مختصات تقریبی:

$$B(x_{sob}^s, y_{sob}^s, z_{sob}^s) = \left(\frac{L}{2}, 0.0, FB \right)$$

۷- سنسورهای A و B توانایی ثبت حرکات زاویه‌ای را نیز دارند و حرکات زاویه‌ای رول، پیچ و یاو (Θ_{nb}) را

است ناشی از روش اندازه‌گیری در آزمایشگاه و همچنین محاسبات عددی این روش باشد.

۵- نمونه ثبت رفتار

۵-۱- معرفی وسایل اندازه‌گیری

همانطوریکه می‌دانیم در دریا می‌توان پارامترهایی نظیر شتاب در سه جهت، حرکات زاویه‌ای (سرعت زاویه‌ای-ای)، سرعت شناور، ارتفاع موج و زاویه برخورد موج را اندازه‌گیری نمود. برای اندازه‌گیری هر یک از پارامترهای مذکور انتخاب‌های متعددی وجود دارد. بر اساس مطالعات به عمل آمده مجموعه‌ای از سنسورهای اندازه‌گیری بشرح جدول (۱) برای این منظور استفاده شده است.

جدول ۱- مجموعه قطعات استفاده شده برای ثبت رفتار شناور

ردیف نام سنسور و یا قطعه	پارامتر اندازه‌گیری شونده	ملاحظات
۱	GPS	سرعت - موقعیت
۲	3DM-GX1	شتاب خطی در سه جهت - حرکات زاویه‌ای در سه جهت
۳	Data Logger	- ذخیره داده‌ها
۴	کامپیوتر	- ثبت و تحلیل داده‌ها
۵	-	ارتفاع موج
۶	-	جهت برخورد موج به شناور

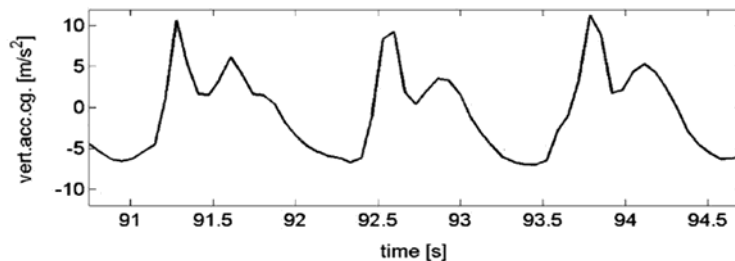
شده در آیتم (۱۰) و آیتم (۱۱) لازم است داده‌های اندازه‌گیری شده کنترل گردد تا منشا این تفاوت پیدا شود. در غیر اینصورت متوسط آیتم (۱۰) و آیتم (۱۱) بعنوان مقدار شتاب حرکات سرج، اسوی و هیو لحاظ می‌گردد.

۱۲- با انتگرال گرفتن مقادیر شتاب حرکات خطی، مقادیر سرعت و جابجایی‌های خطی سرج، اسوی و هیو محاسبه می‌گردد.

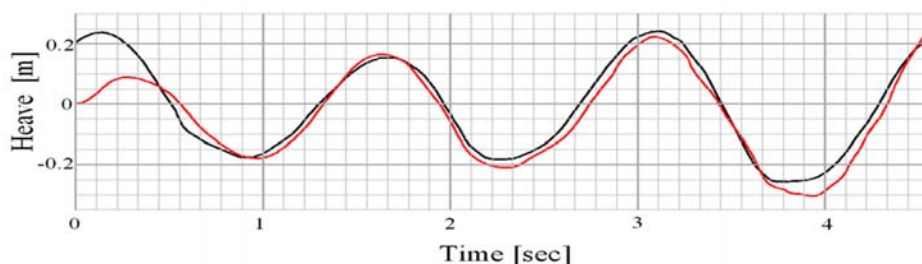
۴-۲- معتبرسازی

معتبر سازی کل سیستم اندازه‌گیری بصورت همزمان امکان‌پذیر نیست چون در اینصورت باید یک سیستم مشابه در اختیار باشد تا بتوان با اندازه‌گیری و پردازش همزمان و مقایسه آنها سیستم موجود را بررسی نمود. تنها میتوان بصورت بخشی به معتبرسازی پرداخت.

برای معتبرسازی روش محاسباتی، یک نمونه اندازه‌گیری همزمان شتاب عمودی و حرکت هیو مدل در آزمایشگاه مورد استفاده قرار گرفته است [۵] که شکل ۴ شتاب عمودی اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. در شکل ۵ منحنی با خط سیاه حرکت هیو اندازه‌گیری شده مدل در آزمایشگاه و خط قرمز محاسبه شده بروش ارائه شده در ۴-۱ را نشان می‌دهد. با مقایسه این دو منحنی میتوان دید که پس از یک سوم از ثانیه اول، اختلافات ناچیز بوده و کاملاً قابل مقایسه می‌باشند. این اختلافات ناچیز ممکن



شکل ۴- شتاب عمودی اندازه‌گیری شده در مرکز ثقل شناور [۵]



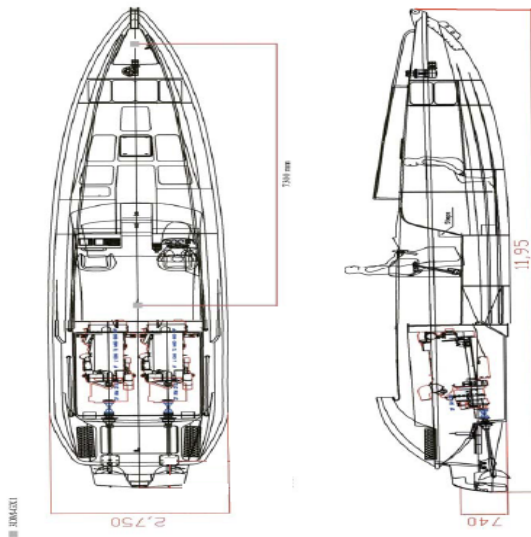
شکل ۵- هیو اندازه‌گیری شده (منحنی به رنگ سیاه) [۵] و هیو محاسبه شده بروش بالا (منحنی به رنگ قرمز)



شکل ۶- الگوریتم برنامه پردازنده [۱۰]

۳-۵- مشخصات شناور

شناوری پروازی با مشخصات اصلی به شرح جدول ۲ مورد تست قرار گرفته است. جانمایی شناور بشرح شکل ۷ می‌باشد.



شکل ۷- شناور مورد مطالعه

جدول ۲- مشخصات شناور تحت تست

طول	عرض	آبخور سینه	آبخور پاشنه
۱۱/۹۵m	۲/۷۵m	۰/۶m	۱/۲m

سنسور 3DM-GX1، Data Logger و باتری همگی در یک جعبه آلومینیومی ضد آب نصب شده است. بر روی هر جعبه یک کلید برای روشن و خاموش کردن، یک کلید برای حالت ارسال اطلاعات به صورت بی‌سیم و باسیم نصب شده است. سه دیود نورانی که نمایانگر روشن و خاموش بودن دستگاه، ارسال باسیم یا بدون سیم اطلاعات و وضعیت بودن باتری وجود دارد. همچنین یک فیش برای نصب آنتن مودم و یک فیش برای ارسال اطلاعات از طریق روش باسیم و همچنین شارژر باتری‌ها وجود دارد. سه عدد از مجموعه توصیف شده وجود دارد که به کمک چسب می‌توان آنها را به شناور متصل نمود.

۲-۵- کد تدوین شده برای ثبت و پردازش اطلاعات

این سیستم دارای دو نرم‌افزار است. نرم‌افزار اول با زبان دلفی نوشته شده و کار داده برداری از سنسور و ثبت آن را در کامپیوتر انجام می‌دهد. این نرم‌افزار توانایی ثبت همزمان داده‌ها و سنکرون نمودن سنسورها را دارد. نرم‌افزار دوم با زبان MATLAB نوشته شده و تحلیل داده‌ها را بر عهده دارد. فایل‌های خروجی از نرم‌افزار اول به عنوان ورودی به نرم‌افزار دوم داده می‌شود. مختصات محل نصب سنسورها به عنوان یکی از ورودی‌های این نرم‌افزار است. الگوریتم این برنامه در شکل ۶ آمده است. بخشی از خروجی نرم‌افزار تحلیل داده شتاب در سیستم مختصات هیدرودینامیکی در بازه زمان و بازه فرکانس و مقادیر آماری مربوطه در سه جهت طولی، عرضی و عمودی می‌باشد. بخش دیگری از خروجی نرم‌افزار مقادیر حرکات زاویه‌ای و سرعت زاویه‌ای در بازه زمان، بازه فرکانس و همچنین مقادیر آماری مربوطه می‌باشد. از دیگر خروجی‌های این نرم‌افزار می‌توان به مقدار حرکات خطی شناور شامل سرج، اسوی و هیو در بازه زمان می‌باشد [۱۰].

۴-۵- مشخصات تست

تست در تاریخ ۱۳۸۶/۶/۱ در دریای مازندران و در منطقه نکا انجام شده است. دیگر مشخصات تست بشرح جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳- مشخصات تست

سرعت (گره)	زاویه برخورد (درجه)	ارتفاع موج (متر)	ملاحظات
۲۲	۱۵۰	۱/۵	سرعت در انتهای تست تغییراتی داشته است و ارتفاع موج بصورت بصری اندازه گیری شده است.

۵-۵- مقادیر شتاب‌های اندازه‌گیری شده در سیستم

مختصات محلی

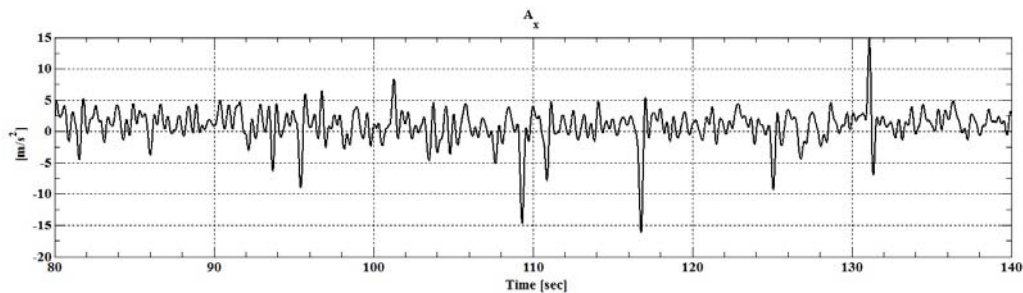
شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ اندازه‌گیری شتاب در سیستم مختصات محلی در موقعیتی بر روی مرکز ثقل نشان می‌دهد. همانطوریکه دیده می‌شود مقدار شتاب در جهت X و Y با مقدار حداکثری در حدود 2g تغییر می‌کند که عمدتاً دامنه‌ای کمتر از ۵ متربرثانیه دارد. در جهت Z مقدار دامنه شتاب به ۳۰ متربرثانیه می‌رسد. تعداد دفعات تکرار دامنه زیاد بمراتب بیشتر از دو جهت دیگر است. شتاب عمودی در واقع بازای هر اسلم به مقدار زیاد می‌رسد. بعبارت دیگر برای این شناور، تقریباً هر یک پرپود کامل موج منجر به یک اسلم می‌گردد.

۵-۶- مقادیر شتاب‌ها در سیستم مختصات

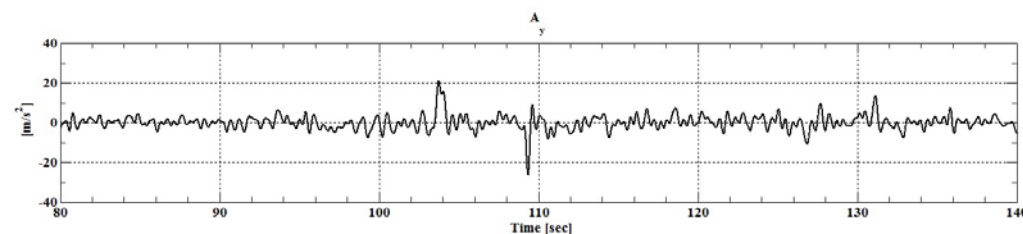
هیدرودینامیکی

پس از تبدیلات مربوطه، مقدار شتاب از سیستم مختصات محلی به سیستم مختصات هیدرودینامیکی انتقال داده شده است که شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ آن را به نمایش می‌گذارند. شکل عمومی این شتابها با شکل عمومی شتاب در سیستم مختصات محلی تطابق دارد.

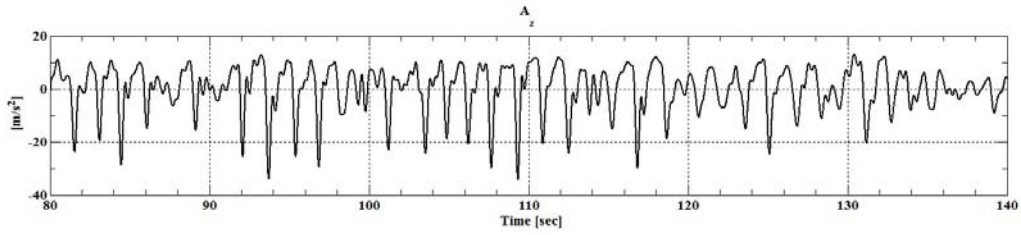
این تست بر اساس بندهای دوارده‌گانه مطروحه در ۴-۱ اجرا گردید. شناوری پروازی با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ و شکل ۷ در موج نامنظم جبه‌بلندی به ارتفاع چشمی ۱/۵ متر و با زاویه برخورد ثابت و با سرعت تقریباً ثابت ۲۲ گره تلاقی نمود. شتاب‌سنجها بر نقاط A و B به ثبت شتاب در مختصات محلی و حرکات زاویه‌ای پرداختند. سپس محاسبات به کمک نرم‌افزار معرفی شده در ۵-۲ انجام گردیده که نتایج آن در ذیل ارائه گردیده است.



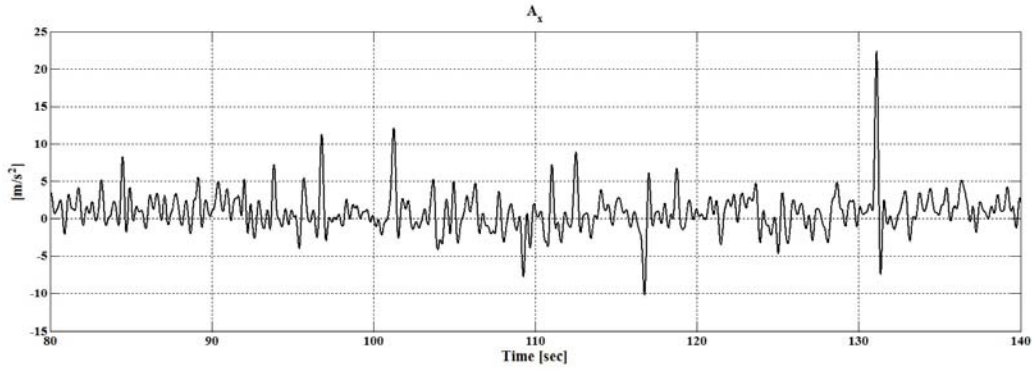
شکل ۸- شتاب ثبت شده در سینه شناور در راستای X



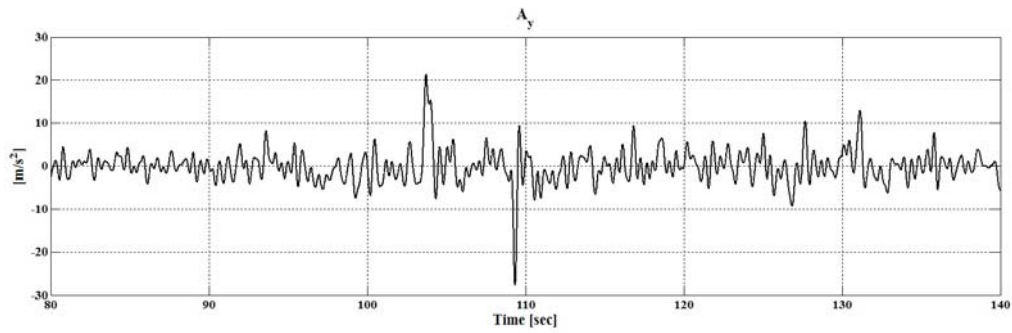
شکل ۹- شتاب ثبت شده در سینه شناور در راستای Y



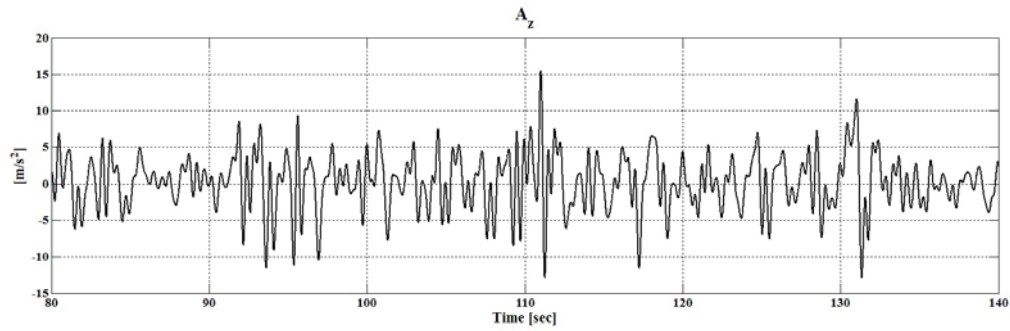
شکل ۱۰- شتاب ثبت شده در سینه شناور در راستای Z



شکل ۱۱- شتاب در راستای X در مختصات هیدرودینامیکی



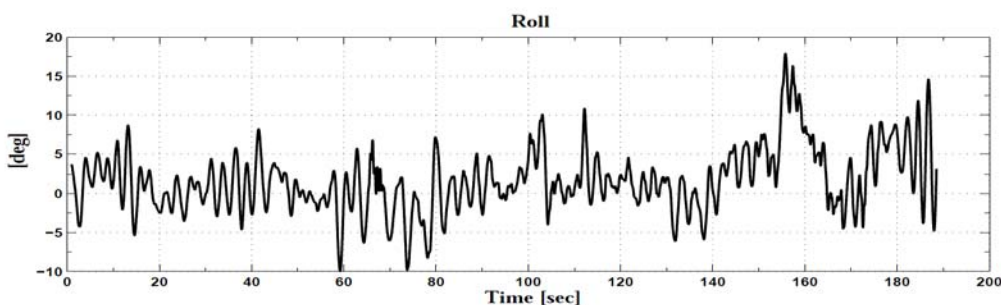
شکل ۱۲- شتاب در راستای Y در مختصات هیدرودینامیکی



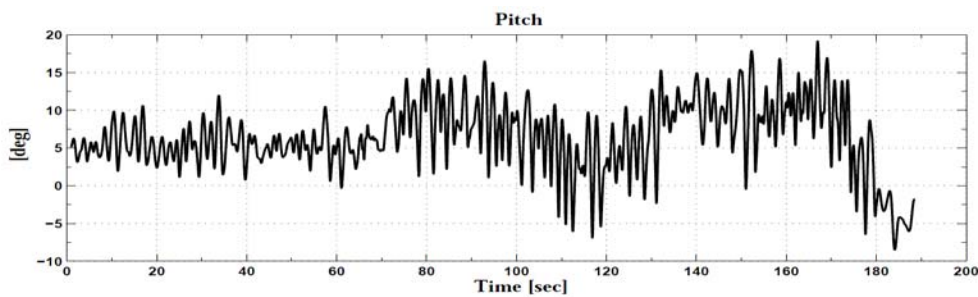
شکل ۱۳- شتاب در راستای Z در مختصات هیدرودینامیکی

شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ سرچ، اسوی و هیو محاسبه شده بر اساس فرمولبندی بالا را نمایش می‌دهد. دامنه حرکت سرچ کمتر از ۸ سانتیمتر، دامنه حرکت اسوی حدود ۱۰ سانتیمتر و دامنه حرکت هیو به ۲۰ سانتیمتر می‌رسد. شاید در عمل حرکت هیو مهمتر بوده و بیشتر در تحلیل‌های دریامانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نوسانات شدید شتاب کمتر در حرکات هیو دیده می‌شود که از نظر فیزیکی نیز با واقعیتها منطبق می‌باشد. تغییرات شبه پرودیک و نامنظم هیو و تکرار آن در هر پرود بر خورد موج در شکل ۱۷ نیز قابل مشاهده می‌باشد.

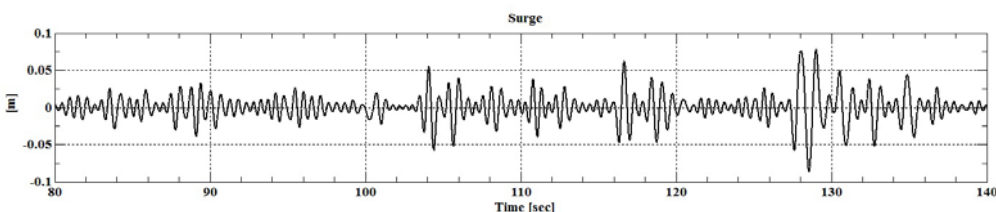
۵-۷- مقادیر اندازه‌گیری شده حرکات زاویه‌ای و مقادیر محاسبه شده جابجایی سرچ، اسوی و هیو شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مقادیر اندازه‌گیری شده حرکات زاویه‌ای رول و پیچ را نشان می‌دهد. حرکت رول عمدتاً حول زاویه صفر درجه است. حرکت پیچ ابتدا حول زاویه ۵ درجه است که سپس با تغییر سرعت تغییر پیدا میکند. دامنه حرکت رول حدود ۵ درجه است. پس از حذف مقادیر زاویه پیچ دینامیکی ناشی از سرعت پیشروی، دامنه حرکت پیچ حدود ۸ درجه در این ثبت می‌باشد. بازاء هر یک پرود کامل موج، یک پرود کامل پیچ و رول اتفاق می‌افتد.



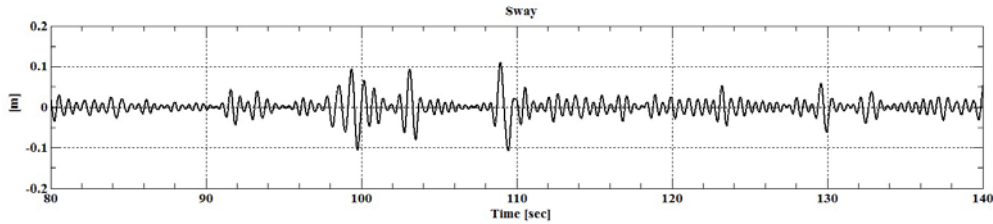
شکل ۱۴- منحنی رول ثبت شده در سیستم مختصات محلی



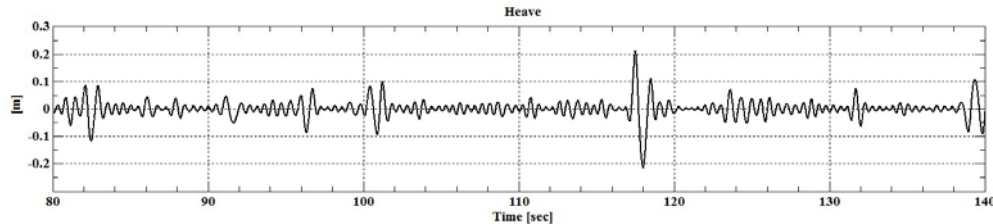
شکل ۱۵- منحنی پیچ ثبت شده در سیستم مختصات محلی



شکل ۱۶- منحنی سرچ در مختصات هیدرو دینامیکی محاسبه شده



شکل ۱۷- منحنی اسوی در مختصات هیدرودینامیکی محاسبه شده



شکل ۱۸- منحنی هیو در مختصات هیدرودینامیکی محاسبه شده

۶- نتیجه گیری

این مقاله به بررسی مسئله بسیار مهم دینامیک شناور پروازی در امواج نامنظم دریا می پردازد. ابزار اصلی برای این منظور تست میدانی می باشد. بدین منظور پس از ارائه اصول کلی حاکم بر دینامیک شناورها در امواج دریا، روشی برای بکارگیری این اصول برای شناور تندرو پروازی برای اولین بار تدوین می گردد. سیستم ثبت رفتار دینامیکی ساخته و نرم افزار پردازشگر تدوین می گردد. بطور خاص نتایج زیر از این مطالعه حاصل شده است:

- تدوین اصول ثبت رفتار شناور پروازی در امواج دریا
- تهیه نرم افزار پردازشگر داده های ثبت شده و محاسبه حرکات (جابجایی) ششگانه شناور در سیستم مختصات هیدرودینامیکی
- معتبرسازی روش و نرم افزار بصورت بخشی
- بکارگیری روش ارائه شده در ثبت رفتار یک شناور پروازی در امواج نامنظم در دریای خزر و تحلیل آن
- لازم به ذکر است که از این دستگاه ثبت رفتار شناور پروازی و نرم افزار پردازشگر بصورت پیوسته در کشور استفاده می گردد.

۷- مراجع

- 1-Ambrosovsky, V., Ambrosovskaya, E., 2005. Sea Trials of High Speed Crafts Data Processing and Model Identifications, Transaction of Fast 2005, St. Petersburg.
- 2-Carrera, G., Rizzo, C., 2005. Measurements of Motion, Loads and Structural Response on a Fast FRP Pleasure Craft, Transaction of Fast 2005, St. Petersburg.
- 3-Chiu, F., Liu, S., Tiao, W., Guo, J., 2005. Development of a Simple System to Measure 5 DOF Ship Motions in a Seaway, Transaction of Fast 2005, St. Petersburg.
- 4-Faltinsen, O., 2005. Hydrodynamics of High Speed Marine Vehicles, Cambridge University Press (book).
- 5-Garme, K., 2004. Modeling of Planing Craft in Waves, KTH Aeronautical and Vehicle Engineering, Division of Systems, SE 100 44, Stockholm, ISBN: 91-7283-861-2.
- 6-Garme, K., Kutteneuler, J., 2005. Simulations and Full-Scale Trials for a HSC Linked by Wave-Height Measurements, Transaction of Fast 2005, St. Petersburg.
- 7-Ghozlan, F., 2005. Ship Motion and Hull Monitoring System, www.sirehna.com.

۱۱- رضا یوسف‌نژاد، حمید زراعتگر، "مروری بر کارهای انجام شده بر روی مدل‌سازی ریاضی و آزمایشگاهی دینامیک شناورهای تندرو پلنینگ"، مجموعه مقالات یازدهمین همایش صنایع دریایی ایران، ۱۹ الی ۲۱ آبان ۱۳۸۸، انجمن مهندسی دریایی ایران.

8-Jørgen, H., Mørch, B., Hermundstad, A., 2005. Planing Craft in Wave – Full Scale Measurements, Transaction of Fast 2005, St. Petersburg.

9-Perez, T., 2005. A review of Geometrical Aspects of Ship Motion in Maneuvering and Seakeeping, and the Use of a Consistent Notation, MSS Technical Report (MSS-TR001-2005), Marine System Simulator (MSS) Group, NTNU, Norway.

۱۰- محمد فارسی، "ثابت رفتار شناور تندرو و تحلیل آن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۷.