

## استخراج ضرایب هیدرودینامیکی مانور یک شناور پروازی تک‌بدنه با استفاده از شبیه‌سازی عددی مدل تست مهار شده

ابراهیم علیزاده<sup>۱</sup>، روح ا. هادی‌پور گودرزی<sup>۲</sup>، سید کاظم ساداتی ساروئی<sup>۳</sup>

rhgoudarzi@mut.ac.ir

۱- محقق پژوهشکده علوم و فناوری دفاعی شمال، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲- استادیار پژوهشکده علوم و فناوری دفاعی شمال، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳- کارشناسی ارشد مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

امروزه استفاده از روش‌های عددی جهت پیش‌بینی حرکات و رفتار شناورها به دلیل مزیت‌هایی چون زمان و هزینه کمتر، دقت فزاینده، تنوع سناریوهای مورد بررسی و اصلاحاتی که در مرحله طراحی شناورها با آن می‌توان ایجاد کرد، از توجه بیشتری برخوردار شده‌است. لذا در بحث مانور شناورهای تندرو نیز توسعه به‌کارگیری روش‌های عددی در کنار روش‌های تحلیلی و نیمه‌تحلیلی می‌تواند دید مناسب اولیه نسبت به عملکرد مانور بدنه موردنظر قبل از اجرای روش‌های پرهزینه‌تر مدل مقیاس و یا تست میدانی فراهم نماید. در این مقاله بر اساس دستگاه متشکل از چهار معادله حرکات سرج، سوی، یاو و رول، ضرایب مانور وابسته به سرعت عرضی و زاویه رول برای یک شناور پروازی تک‌بدنه با شبیه‌سازی عددی محاسبه شده‌است. برای این کار، تست مدل مهارشده مقیاس این شناور و با روش دینامیک سیالات محاسباتی در نرم افزار انسیس سی‌اف‌ایکس مدل‌سازی گردید و نتایج شبیه‌سازی‌ها در زوایای دریافت مختلف، زوایای رول مختلف و سرعت‌های پیشروی متفاوت برای شناور پروازی مدنظر در حرکت خط راست آن استخراج گردید. برخی از نتایج شبیه‌سازی با مقادیر حاصلی از روابط نیمه‌تجربی لواندوفسکی مقایسه گردید که اختلافاتی را نشان داده‌است. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سرعت پیشروی یک عامل موثر بر مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی مانور شناور پروازی است. ضمن اینکه نیروها و گشتاورهای مانور نسبت به سرعت عرضی به صورت خطی تغییر کرده‌است اما با افزایش سرعت پیشروی، نیروی عرضی سوی و گشتاور یاو نسبت به زاویه رول به سمت غیرخطی بودن میل می‌کند. در سرعت‌های کمتر می‌توان با تقریب مناسب‌تر این وابستگی‌ها را به صورت خطی تخمین زد.

واژگان کلیدی: مانور، ضرایب هیدرودینامیکی، شناور پروازی، رول، دریافت، شبیه‌سازی عددی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۳/۱۱

## ۱- مقدمه

مانور شناورها موضوعی مهم و حیاتی در معماری کشتی محسوب می‌گردد. اولین فعالیت‌ها در زمینه مدل‌سازی مانور شناورها به زمان داویدسون<sup>۱</sup> ۱۹۴۶ برمی‌گردد که معادلات کامل مانور استخراج شده و وابستگی پیچیده توانایی دور زدن و حفظ مسیر در مانور نشان داده شده است [۱]. روابط داویدسون پایه و اساس تئوری‌های امروزی مانور می‌باشند. در دهه ۵۰ و ۶۰ با رونق مجدد کشتیرانی و افزایش سایز شناورها و ورود کانتینربرها به بازار حمل و نقل قابلیت‌های مانوردهی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این دوره دو تئوری اساسی ارائه شده است که همچنان بسیار پر کاربرد می‌باشند. تئوری آبکوویتز<sup>۲</sup> و *MMG* پرفسور آبکوویتز از موسسه دریایی دانمارک یکی از پیشگامان در زمینه مانور شناورها می‌باشد. تئوری وی مشتمل بر برآورد نیروهای وارد بر کشتی به عنوان تابعی از مشخصات حرکتی شناور و انتگرال‌گیری از معادلات حرکت جهت بدست آوردن مسیر حرکت شناور در طی مانوهای معمول است [۲].

در سال‌های اخیر با ورود شناورهای تندرو به بازار، در زمینه مدل‌سازی مانور این شناورها کارهای عددی و تجربی توسعه یافته‌است. اولین کارهای تجربی بر روی یک شناور نیمه جابجایی به صورت تست خود رانش انجام شده‌است. این آزمایشات بر روی یک مدل برای بررسی افت پایداری رول<sup>۳</sup> شناور در سرعت‌های بالا صورت گرفته و چندین چیدمان اسپری ریل<sup>۴</sup> روی مدل‌های ۱,۸ و ۳,۶ متری تست شده است. آزمایشات نشان داد که کاهش پایداری رول در سرعت بالا می‌تواند منجر به ناپایداری جهتی یا وقوع پدیده بروچینگ<sup>۵</sup> شود [۳].

تکنیک‌های تجربی مطالعه مانور شناور پروازی توانسته‌است کیفیت‌های لازم برای مانور مناسب و کنترل در سرعت‌های بالا و نیز برخی از پارامترهای طراحی را مطرح نماید. برخی از جنبه‌های طراحی شناور تندرو تاثیر ویژه‌ای روی مانور این نوع شناورها دارند، از آن جمله می‌توان به سرعت شناور، زاویه ددزایر<sup>۶</sup> شناور، موقعیت طولی مراکز ثقل، موقعیت عمودی و ثقل و وسایل کنترل تریم شناور (تریم تب<sup>۷</sup>) اشاره کرد [۴].

در سال‌های اخیر مدل‌سازی و تکنیک‌های تجربی در بررسی مانور شناورها پیشرفت‌های چشمگیری داشته است. روش‌های نوین در حل معادلات حرکت از دهه ۷۰ با معرفی پردازشگرهای با سرعت بالا مورد توجه قرار گرفته است. به طوری که از دهه ۷۰ شبیه‌سازی‌های کامپیوتری جایگزین تست‌های با شناورهای واقعی شده است. در دهه هشتاد توسعه حل‌گرهای معادلات حرکت بر مبنای داده‌های جمع‌آوری شده از روش‌های تجربی، از زمینه‌های فعال تحقیق بوده است. تست‌های مدل مقید و تست‌های مدل خود رانش در تحلیل مسائل غیر خطی مانور بانک اطلاعاتی مناسبی ایجاد می‌کند که از آن‌ها می‌توان در توسعه نرم‌افزار شبیه‌ساز مانور بهره جست. داده‌های ورودی شبیه‌سازی به طور معمول از تست‌های مدل مقید، خود رانش و آزمایش نمونه واقعی بدست می‌آید. در حال حاضر تحقیقات جهت بهبود مدل‌های ریاضی و تکنیک‌های تجربی در حال انجام می‌باشد. از جمله کارهای انجام شده در راستای مدل ریاضی مانور شناور پروازی می‌توان به مدل ارائه شده توسط کاتایاما<sup>۸</sup> [۵ و ۶] و مدل ارائه شده توسط لواندوفسکی<sup>۹</sup> [۷] اشاره کرد. از آنجایی که برای پیش‌بینی مانور شناور پروازی به دستگاه معادلاتی با شش درجه آزادی نیاز می‌باشد و با اینکه کاتایاما و لواندوفسکی در مقالات خود به این موضوع اشاره کرده‌اند، اما هنوز یک دستگاه معادلات جامع و کامل با شش معادله ارائه نشده است.

لواندوفسکی در سال ۱۹۹۶ روش نیمه تجربی را جهت محاسبه تعدادی ضرایب هیدرودینامیکی برای معادلات خطی سوی رول - یاو منتشر کرده است، که برای شناور دارای هاردچاین<sup>۱۰</sup> در سری شناورهای پروازی قابل قبول است [۸]. همچنین یک روش نیمه تجربی جهت تعیین ضریب ممان بازگرداننده رول برای این شناورها بیان کرده است، که شامل سهم استاتیک و دینامیک می‌باشد [۷ و ۸]. سهم متعلقات (سکان) در ضرایب رول بازگرداننده و دمپینگ رول توسط لواندوفسکی در سال ۱۹۹۷ بیان شد، که نشان داده شد متعلقات باعث کاهش ممان بازگرداننده رول در زوایای مثبت تریم می‌شوند. در سال ۱۹۹۰ و ۱۹۹۱ برون<sup>۱۱</sup> و

7 Trim Tab

8 Katayama

9 Lewandowski

10 Hard Chine

11 Brown

1 Davidson

2 Abkwitz

3 Roll

4 Spray Rail

5 Broaching

6 Dead Rise Angle

تشریح می‌شود. در بخش چهارم نیز مشخصات شناور تندرو و مشخصات شبیه‌سازی عددی تست مدل مهار شده در نرم‌افزار انسیس سی‌اف‌ایکس [۱۶] تشریح گردید. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل ضرایب هیدرودینامیکی مانور در بخش پنجم ارایه شده‌است. در بخش ششم تعدادی از این ضرایب با نتایج روش نیمه تحلیل مقایسه و ارزیابی و در بخش انتهایی نیز جمع‌بندی این مقاله ارایه شده‌است.

## ۲- مدل ریاضی مانور شناور پروازی

در بین حرکات شناورهای پروازی، درجات بالایی از کوپلینگ وجود دارد، بنابراین معادلات سرچ، سوی و یاو که برای شناورهای جابجایی مورد استفاده قرار می‌گیرد توانایی پیش‌بینی مانور برای شناورهای پروازی را نخواهد داشت و قابل اعتماد نیستند. به‌دلیل پیچیدگی کوپلینگ ناشی از حرکات این نوع شناورها و وابستگی زیاد ضرایب هیدرودینامیکی و هیدرواستاتیکی به سرعت، در حال حاضر روش عمومی قابل اعتمادی جهت پیش‌بینی عملکرد مانور شناور سرعت بالا وجود ندارد.

در آنالیز مانور و دریامانی شناورهای معمولی (جابجایی) فرض می‌شود که سطح خیس همیشه ثابت می‌ماند در حالی که در شناورهای پروازی سطح خیس به همراه بالا آمدگی مرکز ثقل و زاویه تریم با تغییر سرعت، تغییر می‌کند. بر این اساس: ا. تمام ضرایب هیدرودینامیکی به شدت به سرعت وابسته‌اند.

ب. ضرایب هیدرودینامیکی وابسته به هندسه شناور هستند. ت. حرکات طولی و عرضی وابسته هستند و نیز از آنجا که تغییرات تریم و هیو روی سطح خیس شده شناور تاثیر می‌گذارند در نتیجه نیروهای طولی و عمودی نیز تحت تاثیر قرار می‌گیرند.

ث. به علت وجود لیفت دینامیکی محاسبه ضرایب مورد استفاده در معادلات مانور شناورهای پروازی باید با دقت صورت گیرد.

شکل (۱)، حرکت شناور در صفحه افق در سیستم مختصات ثابت بدنه  $x-y$  و سیستم مختصات اینرسی  $X_0-Y_0$  را نمایش می‌دهد. مبدا سیستم مختصات بدنه در مرکز جرم شناور با

کلوسینسکی<sup>۱</sup> سری‌های زیادی از بدنه‌های منشوری شکل با زوایای ددرایز ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه را تحت آزمایش قرار داده‌اند که مدل‌ها در سرعت‌ها، زوایای دریافت و زوایای رول مختلف در حوضچه کشیده‌اند. اطلاعات ناشی از این آزمایش‌ها برای بدست آوردن شکل تابعی ضرایب هیدرودینامیکی  $N_r, N_v, K_r, K_v, Y_r, Y_v$  توسط اسمایلی<sup>۲</sup> مورد آنالیز قرار گرفت [۹-۱۰].

جهت تبیین رفتار شناورهای پروازی در آب آرام، تست‌های مدل مقید استاتیک با فرم بدنه پروازی در حوضچه کشش دانشگاه صنعتی دلفت<sup>۳</sup> انجام شده است. برنامه تست شامل اندازه‌گیری سه مولفه نیرو و سه مولفه ممان به صورت تابعی از پیچ، هیو، رول و دریافت سرعت مدل بوده است. همچنین در ادامه به وسیله تست مدل، جرم افزوده و نیروی میرایی بدنه‌های پروازی و نیروی سکان و پروانه مدل، اندازه‌گیری شده‌است [۱۱]. آلگرین<sup>۴</sup> و همکارانش با استفاده از نرم‌افزار استار<sup>۵</sup>، ورود مقطعی از شناور پروازی با سرعت عرضی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۲]. کاتایاما و هابارا<sup>۶</sup> با مطالعه بر روی پایداری شناور پروازی با استفاده از مدل ریاضی با چهار درجه آزادی با استفاده از تست‌های مانور به محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی پرداخته‌اند که معیار پایداری را برای شناور پروازی به موتور بیرونی<sup>۷</sup> استخراج کرده‌اند [۱۳]. در ادامه بحث پایداری شناورهای تندرو، یک شناور پروازی با یک شناور هیدروفویلی توسط کالیکس و همکاران مورد مقایسه قرار گرفته است که در این راستا ضرایب مانور برای معادلات سوی-رول و یوا استخراج شده است [۱۴]. در مقاله‌ای توسط کلوس و همکاران برای یک کشتی، ضرایب هیدرودینامیکی مانور به روش عددی و تست آزمایشگاهی محاسبه شده‌اند که صحت کار عددی انجام شده را نشان می‌دهد [۱۵].

هدف اصلی در این مقاله ارایه الگوی به‌کارگیری روش شبیه‌سازی عددی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بدنه پروازی بر مبنای روش تست مدل مهار شده است. از این‌رو ابتدا در بخش دوم این مقاله، مدل ریاضی و معادلات چهار درجه آزادی مانور و پارامترهای آن معرفی می‌شود. سپس در بخش سوم، نحوه استفاده از روش تست مدل مهار شده برای تعیین ضرایب مانور

<sup>5</sup> Star CCM

<sup>6</sup> Habara

<sup>7</sup> Outboard

<sup>1</sup> Kolinsky

<sup>2</sup> Smiley

<sup>3</sup> Delft

<sup>4</sup> Alegrin

که در آن به ترتیب،  $M$  ماتریس اینرسی،  $C$  ماتریس فنریت،  $D$  ماتریس دمپینگ،  $v$  بردار سرعت شامل سه مولفه خطی و سه مولفه دورانی است.  $\tau_c$  و  $\tau_e$  به ترتیب بردار نیروها و گشتاورهای کنترلی و محرکهای محیطی است. یک شکل کاهش یافته معادلات چهاردرجه آزادی حرکت شناور با فرض مبدا مختصات در مرکز جرم، به صورت رابطه زیر ارایه شده است:

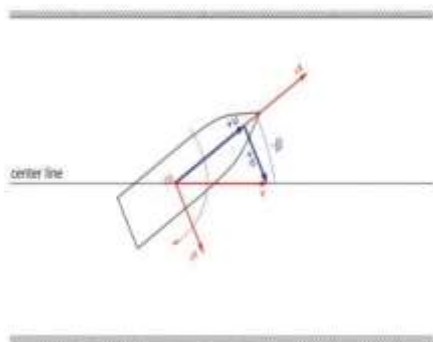
$$\begin{cases} (m - X_{\dot{u}})\dot{u} = (m - Y_{\dot{v}})vr - Y_{\dot{r}}r^2 - Y_{\dot{p}}pr - R_t(u) + \tau_c^u + \tau_e^u \\ (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - Y_{\dot{r}}r - Y_{\dot{p}}\dot{p} = Y_v v + Y_r r + Y_{\phi}\phi - mur + \tau_c^v + \tau_e^v \\ (I_{xx} - K_{\dot{p}})\dot{p} - K_{\dot{v}}\dot{v} - K_{\dot{r}}\dot{r} = K_p p + K_{\phi}\phi + K_v v + K_r r + K_u u + \tau_c^p + \tau_e^p \\ (I_{zz} - N_{\dot{r}})\dot{r} - N_{\dot{v}}\dot{v} - N_{\dot{p}}\dot{p} = N_v v + N_r r + N_{\phi}\phi + \tau_c^r + \tau_e^r \end{cases} \quad (2)$$

### ۳- نحوه محاسبه ضرائب هیدرودینامیکی مانور شناور پروازی از تست مدل مهار شده

برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی  $(N_v, Y_v, K_v)$  در آزمایشگاه، مدل را در یک تانک کشش همانند شکل (۳۲) به اراجه بسته و با سرعت پیشروی  $V$ ، مدل به حرکت در می آید. در زوایای مختلف دریافت  $\beta$ ، مدل دارای سرعت در راستای محور  $y$  می گردد. با توجه به جهت مدل، مولفه عرضی سرعت در راستای محور  $y$  به صورت زیر بدست می آید:

$$v = -V \sin(\beta) \quad (3)$$

علامت منفی با توجه به محور مختصات ظاهر گردیده است. به وسیله یک دینامومتر که در وسط مدل قرار گذاشته می شود، مقادیر نیروی  $Y$  و گشتاور  $N$  ناشی از حرکت مدل در هر زاویه دریافت  $\beta$  اندازه گرفته می شود. این مقادیر به صورت منحنی و تابعی از سرعت عرضی  $v$  ترسیم می گردد. شیب منحنی بدست آمده در  $v=0$  مقادیر ضرایب  $Y_v, N_v$  مدل می باشد. دینامومتر مورد نظر را در مرکز جرم مدل قرار می گیرد و نتایج مستقل از موقعیت  $G$  است.



شکل (۲) مولفه های سرعت و زاویه دریافت.

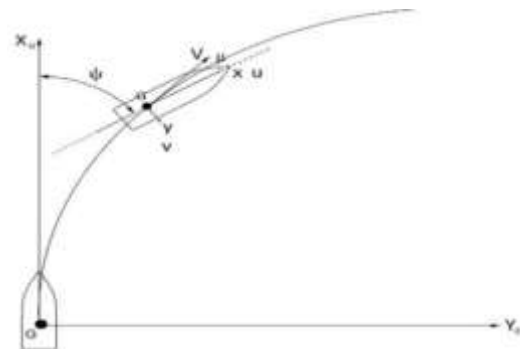
حرکت شناور جابجا و با هرگونه حرکت زاویه دار شناور دوران می کند و مقدار این دوران نسبت به مختصات اینرسی مقادیر زوایای اوپلر را به دست می آورد.

فرم کلی معادلات ۶ درجه آزادی حرکت یک شناور را در دستگاه مختصات ثابت بدنه می توان به شکل زیر نوشت:

$$M\dot{v} + (C(v) + D(v))v = \tau_c + \tau_e \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $u$  و  $\dot{u}$  سرعت و شتاب خطی حرکت سرج،  $v$  و  $\dot{v}$  بیانگر سرعت و شتاب خطی حرکت سوی،  $p$  و  $\dot{p}$  سرعت و شتاب زاویه ای حرکت رول،  $r$  و  $\dot{r}$  بیانگر سرعت و شتاب زاویه ای حرکت یاو است.  $R_t(u)$  مقاومت کل بدنه در جهت محور طولی آن،  $m$  جرم کل شناور،  $X_{\dot{u}}$  جرم افزوده شناور در جهت سرج ناشی از شتاب سرج،  $Y_{\dot{v}}$  و  $Y_{\dot{r}}$  جرم های افزوده شناور در جهت سوی،  $K_{\dot{p}}$ ،  $K_{\dot{v}}$ ،  $K_{\dot{r}}$  ممآن های اینرسی افزوده شناور در جهت رول و  $N_{\dot{p}}$ ،  $N_{\dot{v}}$ ،  $N_{\dot{r}}$  ممآن های اینرسی افزوده شناور در جهت یاو است.

همان طور که در سمت راست رابطه فوق مشاهده می شود، ضرایب هیدرودینامیکی مختلفی در این معادلات بر اساس بسط تیلور وجود دارند که تعیین آن ها برای حل معادله حرکت مورد توجه است. در این مقاله به تعیین ضرایب هیدرودینامیکی وابسته به سرعت عرضی یعنی  $X_v, Y_v, N_v, K_v$  و ضرایب وابسته به زاویه رول یعنی  $Y_{\phi}, N_{\phi}, K_{\phi}$  خواهیم پرداخت.



شکل (۱) سیستم مختصات اینرسی و بدنه.

## ۴- شبیه‌سازی تست مانور مدل مهار شده شناور

## ۴-۱- مشخصات شناور تندور پروازی

شناور تندرو مد نظر در این مقاله یک شناور تک بدنه ۷ شکل می‌باشد. این شناور، یک شناور تک‌چاین و با زاویه ددرایز تقریبی ۲۳ درجه می‌باشد (جدول (۱)). برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی مانور به روش دینامیکی سیالات محاسباتی که در ادامه مطرح می‌شود، به منظور کاهش زمان حل و محدودیت سخت‌افزاری موجود از مدل مقیاس کوچک‌تر اصلی با نسبت ابعادی  $\lambda = 1/3$  جهت انجام محاسبات استفاده شده است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی از طریق روابط تشابه ابعادی به مدل واقعی تعمیم می‌یابد. از آنجایی که قسمت زیر آبی شناور پروازی به هنگام اسکی<sup>۱</sup> در سیال دارای زاویه ددرایز تقریباً ثابت است از این جهت شناور مدل برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی به صورت زاویه ددرایز ثابت در نرم افزار انسیس شبیه‌سازی شده است (جدول (۱)).

با روابط ارائه شده توسط سویتسکی<sup>۲</sup> برای شناور پروازی می‌توان مقادیر طول خیس کیل، تریم، مقاومت و سطح خیس و... را برای شناور پروازی در سرعت‌های مختلف استخراج کرد. محاسبات برای تعیین ضرایب در دو عدد فرود ۱،۳۲ و ۲،۶۴ انجام شده است که برای شناور اصلی معادل دو سرعت ۱۰،۲۸ و ۲۰،۵۶ متر بر ثانیه (معادل سرعت کروز ۲۰ نات و سرعت حداکثر ۴۰ نات) و برای مدل مقیاس برابر با ۵،۹۳ و ۱۱،۷۸ متر بر ثانیه است. با کمک روابط سویتسکی [۱۷-۱۸] برای مدل مقیاس، مقادیر تریم، طول خیس کیل و بالا آمدگی مرکز ثقل در سرعت معلوم، استخراج شده و به عنوان ورودی جهت شبیه‌سازی در نرم‌افزار، مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول (۱) مشخصات شناور تندرو مورد مطالعه.

متغیر	شناور اصلی	مدل	واحد
طول	۶	۲	متر
عرض	۲.۲	۰.۷۲۳	متر
ارتفاع	۰.۹	۰.۳	متر
زاویه ددرایز متوسط	۲۳	۲۳	درجه
حجم جابجایی	۱.۹۵	۰.۰۷	مترمکعب
وزن	۲۰۰۰	۷۴	کیلوگرم

## ۴-۲- معادلات حاکم و روش عددی

با توجه به شرایط حاکم بر جریان سیال، معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس به صورت رابطه (۴) قابل بیان است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \quad (۳)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

در این معادلات،  $u$  مولفه سرعت،  $p$  فشار،  $\nu$  لزجت و  $g_i$  مولفه نیروی گرانش می‌باشد. نکته دیگری که باید همواره مورد توجه قرار گیرد، رژیم جریان آشفته در مساله مورد نظر می‌باشد که برای لحاظ این ویژگی از مدل بهبود یافته از مدل  $k-\varepsilon$  به نام  $RNG k-\varepsilon$  استفاده شده است. در مدل  $RNG k-\varepsilon$  ویژگی‌های میدان جریان آشفته بر اساس دو مفهوم انرژی جنبشی جریان آشفته و نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی آشفته بیان می‌شود که بر اساس معادلات حاکم به شکل روابط (۵) قابل ارائه هستند.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) &= \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) \\ &+ P_k - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) &= \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \nabla \varepsilon \right) \\ &+ \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1 RNG} (P_k + P_{eb}) - C_{\varepsilon 2 RNG} \rho \varepsilon) \end{aligned} \quad (۴)$$

$$C_{\varepsilon 1 RNG} = 1.42 - f_n$$

$$f_n = \frac{\eta(1 - \frac{\eta}{4.38})}{(1 + \beta_{RNG} \eta^3)}$$

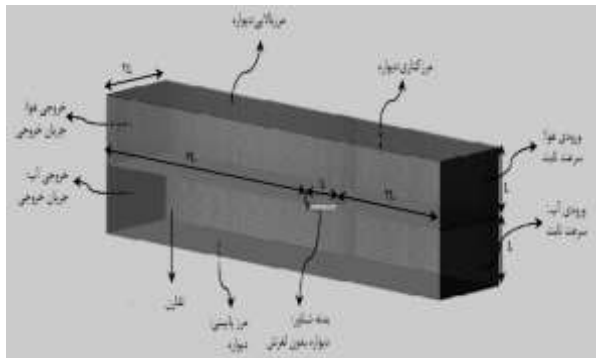
$$\eta = \sqrt{\frac{P_k}{\rho C_{\mu RNG} \varepsilon}}$$

در این روابط  $\rho$  چگالی سیال،  $U$  بردار سرعت،  $k$  انرژی جنبشی توربولانسی،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی،  $\mu_t$  ویسکوزیته آشفته،  $\sigma_k$  عدد پیرانتل آشفته و  $P_k$  تولید آشفتگی به علت نیروهای ویسکوز است.

حال بر اساس معادلات حاکم، برای مدل‌سازی عددی جریان سیال، حول شناور از نرم‌افزار انسیس سی‌اف‌ایکس استفاده شده است که در این نرم‌افزار، حل عددی جریان با روش حجم محدود انجام می‌شود. در این روش، الگوریتم حل شامل سه مرحله انتگرال‌گیری از معادلات حاکم بر جریان سیال

<sup>2</sup> Savitski

<sup>1</sup> Plan



شکل (۳) دامنه محاسباتی.

به همین دلیل از همان ابتدای دامنه محاسباتی، صفحه ورودی به وسیله صفحه آبخور به دو بخش تقسیم گردید که بخش بالای صفحه آبخور، ورودی هوا و بخش پایینی آن ورودی آب در نظر گرفته شده است. شرط مرزی این دو بخش از شرط سرعت ثابت استفاده شده است. برای ناحیه خروجی جریان نیز شرط مرزی جریان خروجی لحاظ شد. بر صفحه میانی شناور که صفحه تقارن می باشد، شرط مرزی تقارن اعمال گردید. با توجه به این که مرزهای کنار، بالا و پایین به اندازه کافی از بدنه شناور فاصله دارند، اثرات جریان در این نقاط بر بدنه شناور ناچیز بوده و می توان از شرط دور دست استفاده کرد؛ لذا برای این مرزها از شرط مرزی دیوار استفاده شده است. برای دیواره شناور نیز از شرط مرزی دیواره بدون لغزش استفاده می شود.

#### ۴-۴- شبکه بندی دامنه محاسباتی

تولید شبکه در ماژول ICEM که در داخل نرم افزار ANSYS-CFX قرار دارد، صورت گرفته و قابلیت تولید تولید شبکه های با سازمان، بی سازمان، منشوری و یا ترکیبی از آنها را برای هندسه های سه بعدی دارا است. هنگام انتخاب نوع شبکه ملاحظات زیر در نظر گرفته می شود: ۱- سادگی تولید شبکه ۲- هزینه محاسباتی. در کار حاضر از شبکه های بی سازمان برای کاهش زمان تولید و حل شبکه استفاده شده است. ویژگی اصلی این نوع شبکه بندی این است که برای هندسه های پیچیده به راحتی قابل پیاده سازی است. مزیت دیگر شبکه های بی سازمان، قابلیت انجام سریع عمل تطبیق و بهینه سازی شبکه است. نکته مهمی که در شبکه بندی باید رعایت شود، تعیین ضخامت لایه مرزی است. ضخامت کل لایه مرزی ( $\delta$ ) به

روی حجم کنترل، گسسته سازی معادلات شامل جایگذاری نوعی از تقریبها برای عبارت های داخل معادله انتگرالی (مربوط به فرآیندهای جریان مثل جابه جایی، نفوذ و چشمه) و تبدیل معادله انتگرالی به یک دستگاه معادلات جبری می شود.

در روش های معمول در شبیه سازی حرکات شناور عموماً از تغییر شکل سازه شناور و تاثیر آن بر نتایج صرف نظر شده، سازه شناور به صورت صلب فرض می گردد. بدین ترتیب شبیه سازی حرکات شناور را می توان به قسمت های زیر تقسیم بندی کرد: حل معادلات اساسی حاکم بر جریان سیال (معادلات ناوراستوکس و پیوستگی)، اعمال معادلات آشفتگی، مدل سازی سطح آزاد و بررسی تعادل. برای ارزیابی و محاسبه نیروهای درگ طولی، عرضی و گشتاور یاو و رول ناشی از زاویه دریافت از روش دو فازی حجم سیال استفاده شده است.

با توجه به استفاده از روش حجم محدود برای گسسته سازی معادلات حاکم برای کوپل میدان سرعت و فشار از مدل سیمپل استفاده شده است. در این مدل معادله اصلاح فشار چندین بار حل شده، بر اساس آن سرعت ها اصلاح می شوند تا پیوستگی در میدان محاسباتی ایجاد گردد.

#### ۴-۳- ابعاد دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

برای حل عددی جریان اطراف شناور ابتدا ابعاد دامنه محاسباتی با توجه به نوع شناور باید انتخاب شود. اگر این ابعاد بیش از حد کوچک باشد، نزدیک بودن مرزها به دیواره شناور روی حل تاثیر منفی می گذارد و اگر بیش از حد بزرگ باشد زمان محاسباتی را افزایش می دهد. بنابراین باید ابعاد بهینه برای دامنه محاسباتی به گونه ای انتخاب شود که در ارضای مرزهای بی نهایت، زمان محاسباتی در کمترین مقدار خود باشد. اگر طول شناور  $L$  باشد، عمق و ارتفاع دامنه محاسباتی برابر با  $L$ ، عرض دامنه محاسباتی  $2L$ ، جلوی شناور به اندازه  $3L$  و پشت شناور به اندازه  $6L$  انتخاب شده است (شکل (۳)).

یکی دیگر از مهمترین بخش های تحلیل عددی تعیین شرایط مرزی است. با توجه به شرایط مساله مورد نظر، مرز ورودی ناحیه حل از دو قسمت مجزای ورودی آب و هوا تشکیل شده است که باید به طور جداگانه تعریف شوند.

جدول (۲) مقایسه مقاومت حاصل از روش سویتسکی و حل عددی.

عدد فرود	۱,۳۲	۲,۶۴
طول کیل	۱,۳۶ متر	۱,۹ متر
زاویه تریم	۶,۴ درجه	۲,۸ درجه
مقاومت (سویتسکی)	۱۳۵,۲ نیوتن	۲۱۴,۹ نیوتن
مقاومت (حل عددی)	۱۲۶,۶ نیوتن	۲۱۶,۹ نیوتن
درصد اختلاف	۶,۳٪	-۱٪

با توجه به موثر بودن مقدار مقاومت بدنه در معادلات مانور، مقادیر عددی مقاومت بدنه در دو عدد فرود با نتایج حاصل از روش نیمه تحلیلی سویتسکی نیز مقایسه گردید (جدول (۳)). همان طور که در این جدول مشاهده می شود، تطابق بین نتایج محاسبات خوب بوده است.

#### ۵- محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی مانور مدل شناور

برای بدست آوردن ضرایب هیدرودینامیکی ناشی از سرعت عرضی  $v$ ، شرایط حرکت مانور مدل ۲ متری مهار شده در زوایای مختلف دریفت  $\beta$  برابر با ۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درجه در دو عدد فرود ۱,۳۲ و ۲,۶۴ در نرم افزار شبیه سازی شد و نیروهای سرچ و سوی و گشتاورهای رول و یاو اندازه گیری شده اند. با رسم نمودار تغییرات هر یک از نیروها و گشتاورها بر حسب تغییرات سرعت عرضی، ضرایب خطی هیدرودینامیکی مانور ( $K_v, N_v, X_v, Y_v$ ) که همان شیب خط عبور داده شده از نقاط در نمودارها هست تعیین شده است. در نمودار شکل های (۵) الی (۱۲)، تغییرات نیروها و گشتاورها بر حسب سرعت عرضی برای دو عدد فرود مورد نظر ارائه شده است. همان طور که در شکل های (۵) و (۶) مشاهده می شود، با افزایش سرعت عرضی (زاویه دریفت) مقدار قدر مطلق نیروی سرچ کاهش می یابد. این موضوع در خصوص سایر ضرایب به طور عکس مشاهده می شود به گونه ای که با افزایش سرعت عرضی، قدر مطلق مقادیر ضرایب مربوطه افزایش می یابد. در تمام این نمودارها می توان یک رابطه خطی بین نیروها و گشتاورها بر حسب سرعت عرضی (زاویه دریفت) مشاهده کرد.

در جدول (۴)، خلاصه ضرایب هیدرودینامیکی (شیب نمودارهای خطی تغییرات نیرو و گشتاور نسبت به سرعت عرضی) و نیز درصد تغییرات این ضرایب را نسبت به تغییر عدد فرود از ۱,۳۲ به ۲,۶۴ نشان می دهد.

صورت تابعی از طول شناور ( $L$ ) و عدد بی بعد رینولدز ( $Re$ ) از رابطه زیر به دست می آید.

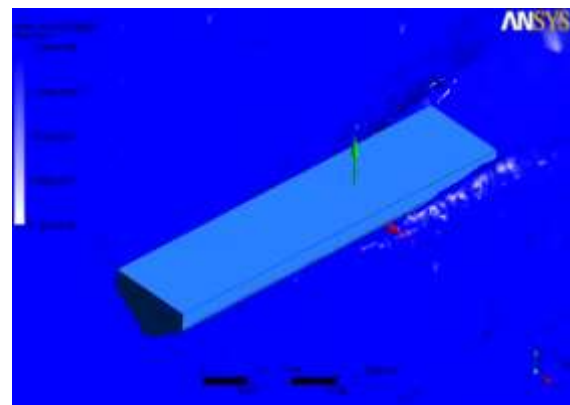
$$\delta = 0.035L(Re)^{-1/7} \quad (5)$$

معیار مهمی که در تولید شبکه داخل لایه مرزی باید به آن توجه نمود،  $y^+$  است که به فاصله بی بعد اولین گره از شبکه نسبت به سطح اطلاق می شود. رابطه زیر با مقدار مشخص  $y^+$  در تعیین فاصله اولین گره تا سطح جسم ( $\Delta y$ ) به کار گرفته می شود.

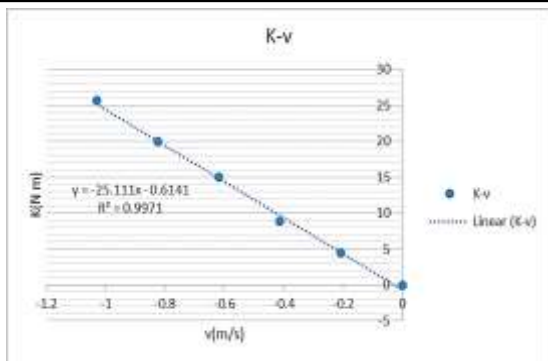
$$\Delta y = Ly^+ \sqrt{74Re_L}^{-13/14} \quad (6)$$

با وجود اینکه رابطه (۶) برای صفحات تخت به دست آمده اما می تواند تقریب خوبی برای شبکه بندی سطوح دارای انحنا نیز باشد. به دلیل عبور جریان سیال بر روی جسم، گردابه هایی در پشت جسم تشکیل می شود که در نیروی وارد بر جسم تأثیرگذار است. بدین منظور شبکه بندی در پشت و نواحی نزدیک به جسم ریزتر از سایر نواحی در نظر گرفته شده است.

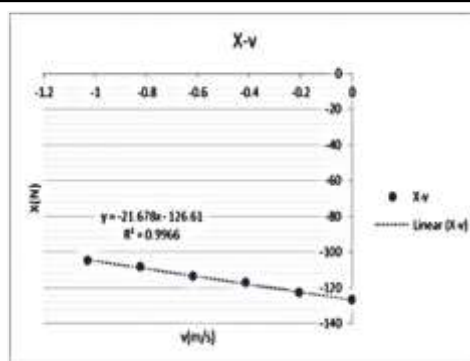
در این شبیه سازی محدوده شبکه بندی شامل چهار قسمت هوا، آب، قسمتی از بدنه که در هوا قرار دارد و قسمتی از بدنه که در آب قرار دارد، است. اولیه انتخاب اندازه مش بندیها، مقاومت مدل ۲ متری در عدد فرود ۱,۳۲ با مش بندی هایی در اندازه های درشت، متوسط، ریز، خیلی ریز و بسیار ریز مطابق جدول زیر، محاسبه و مقایسه شده است. اندازه مش های مثلثی برای چهار ناحیه مشخص شده در این شبیه سازی در نهایت به ترتیب برای هوا: ۰,۱ متر، آب: ۰,۰۵ متر، بدنه در هوا: ۰,۰۰۳ متر، بدنه در آب: ۰,۰۰۱ متر انتخاب شده است. شکل (۴)، یک مدل شبیه سازی شده را در نرم افزار نشان می دهد. بر این اساس سایر شبیه سازی ها با اندازه مش بندی فوق، ادامه یافته است.



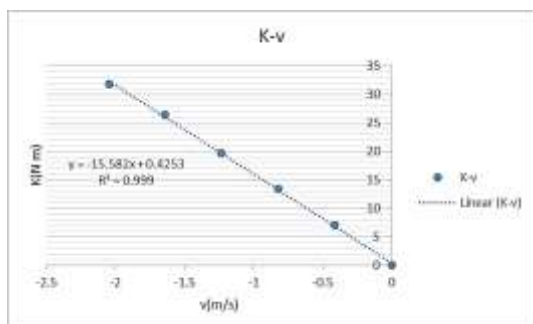
شکل (۴) شبیه سازی مدل شناور در محیط نرم افزار ( $Fr=1.32$ ).



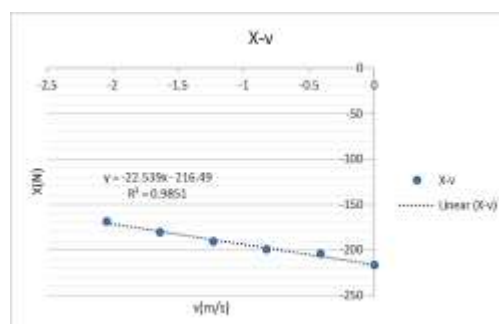
شکل (۹) تغییرات نیروی گشتاور رول نسبت به سرعت عرضی در  $Fr=1.32$



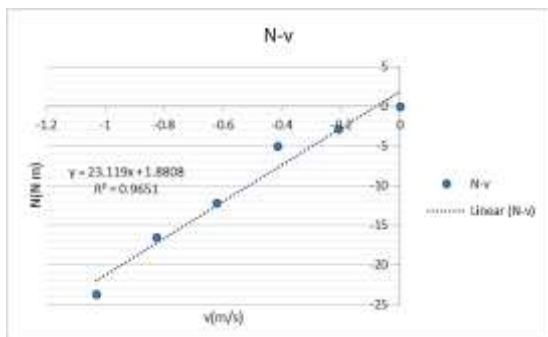
شکل (۵) تغییرات نیروی سرچ نسبت به سرعت عرضی در  $Fr=1.32$



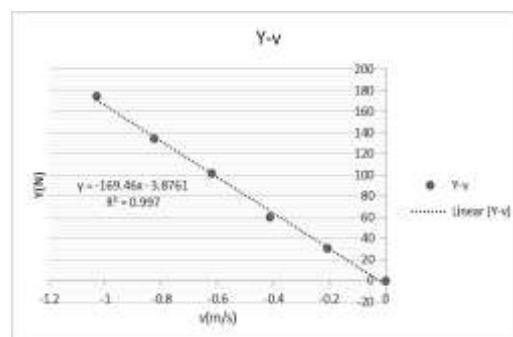
شکل (۱۰) تغییرات گشتاور رول نسبت به سرعت عرضی در  $Fr=2.64$



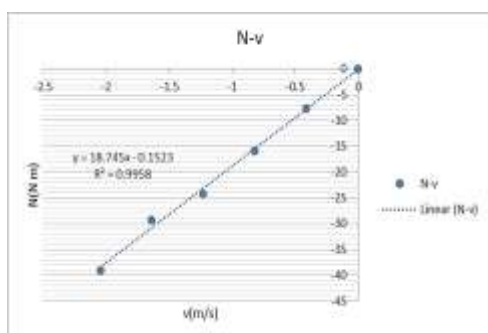
شکل (۶) تغییرات نیروی سرچ نسبت به سرعت عرضی در  $Fr=2.64$



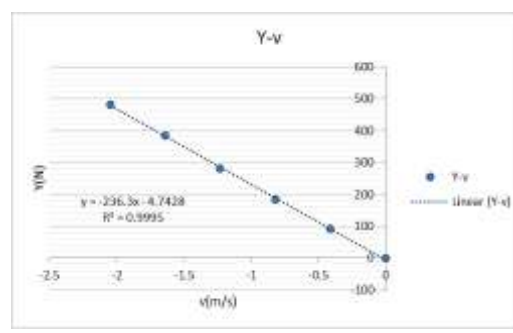
شکل (۱۱) تغییرات گشتاور یاو نسبت به سرعت عرضی در  $Fr=1.32$



شکل (۷) تغییرات نیروی سوی نسبت به سرعت عرضی در  $Fr=1.32$

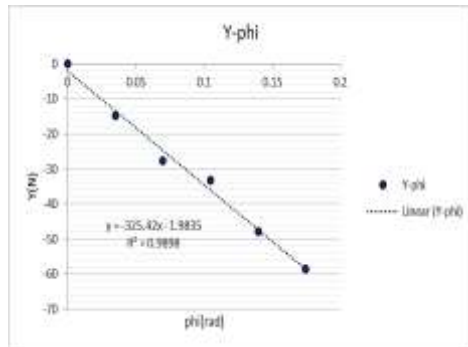


شکل (۱۲) تغییرات گشتاور یاو نسبت به سرعت عرضی در  $Fr=2.64$

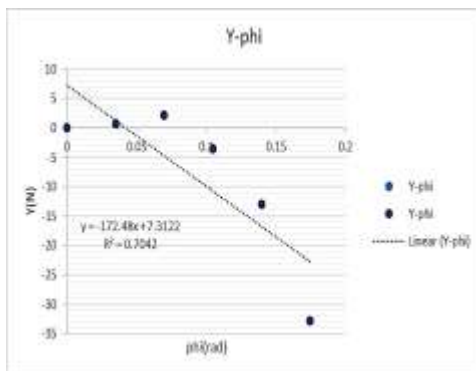


شکل (۸) تغییرات نیروی سوی نسبت به سرعت عرضی در  $Fr=2.64$

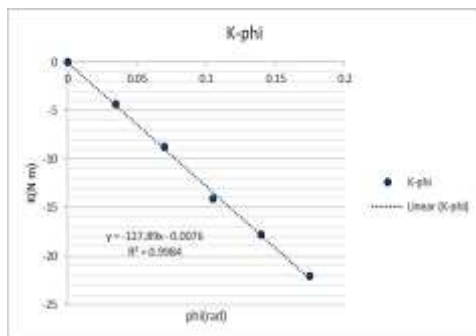




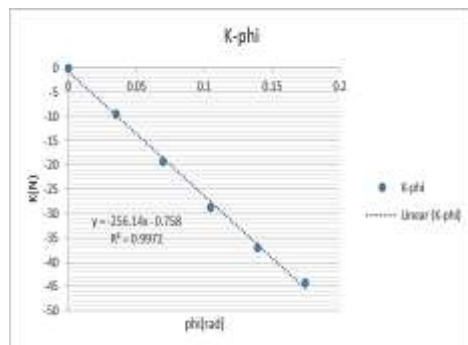
شکل (۱۴) تغییرات نیروی سوی نسبت به زاویه رول در  $Fr=1.32$



شکل (۱۵) تغییرات نیروی سوی نسبت به زاویه رول در  $Fr=2.64$



شکل (۱۶) تغییرات گشتاور رول نسبت به زاویه رول در  $Fr=1.32$



شکل (۱۷) تغییرات گشتاور رول نسبت به زاویه رول در  $Fr=2.64$

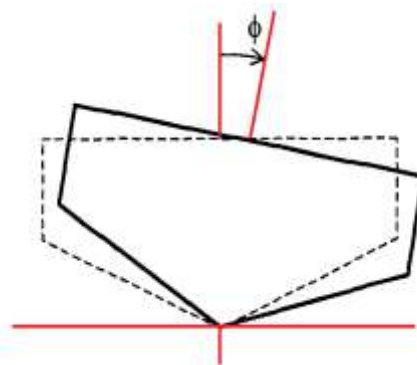
جدول (۳) ضرایب هیدرودینامیکی وابسته به سرعت عرضی .

عدد فرود	$X_v$ (N.s/m)	$Y_v$ (N.s/m)	$K_v$ (N.s)	$N_v$ (N.s)
۱,۳۲	-۲۱,۶۷۸	-۱۶۹,۴۶	-۲۵,۱۱۱	۲۳,۱۱۹
۲,۶۴	-۲۲,۵۳۹	-۲۳۶,۳	-۱۵,۵۸۲	۱۸,۷۴۵
درصد تغییرات	+۰/۴	+۰/۴۰	-۰/۳۸	-۰/۱۹

دسته دیگری از ضرایب مهم مانور شناور تندرو پروازی، ضرایب هیدرودینامیکی ناشی از رول هستند که برای بدست آوردن آنها نیز تستی همانند تست مدل مهار شده استاتیکی قبلی در نرم افزار انسیس شبیه سازی شده است. شناور پروازی به هنگام مانور مخصوصاً به هنگام دور زدن یا حرکت زیگزاگ علاوه بر داشتن زاویه یاء، زاویه رول نیز خواهد داشت. از این رو تست مدل مهار شده برای شناور مدل در محیط نرم افزار به گونه ای طراحی شده است که می تواند در زوایای مختلف رول قرار بگیرد (زوایای ۰، ۲، ۴، ۶ و ۸ درجه). شکل (۱۳) نحوه قرارگیری شناور مدل را برای تعیین ضرایب ناشی از رول نشان می دهد.

پس از قراردادن مدل در زاویه رول مدنظر، حرکت شناور در محیط نرم افزار، شبیه سازی و نیروها و گشتاورهای وارد بر مدل استخراج شده است. با رسم نمودار تغییرات نیروها و گشتاورها بر حسب تغییرات زاویه رول، یک رابطه خطی بین متغیرها به دست آمده است که شیب این خط همان ضرایب خطی هیدرودینامیکی مانور ( $Y_0, N_0, K_0$ ) تعیین شده است. در شکل های (۱۴) تا (۱۹) نتایج محاسبات نیروها و گشتاورها نسبت به زاویه رول ارائه شده است.

در جدول (۵) خلاصه ضرایب هیدرودینامیکی (شیب نمودارهای خطی تغییرات نیرو و گشتاور نسبت به زاویه رول) و نیز درصد تغییرات این ضرایب را نسبت به تغییر عدد فرود از ۱,۳۲ به ۲,۶۴ نشان می دهد.



شکل (۱۳) تست مدل مهار شده از دیدگاه رول.

جدول (۶) مقایسه ضریب هیدرودینامیکی  $K_v (N.s)$ .

درصد اختلاف	روش عددی	روش لواندوفسکی	عدد فرود
-۰.۵۴	-۲۵,۱۱۱	-۵۳,۸۴	۱,۳۲
-۰.۵۷	-۱۵,۵۸۲	-۳۶,۳۲	۲,۶۳

جدول (۷) مقایسه ضریب هیدرودینامیکی  $N_v (N.s)$ .

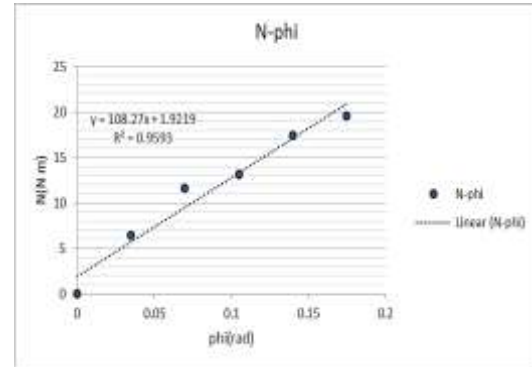
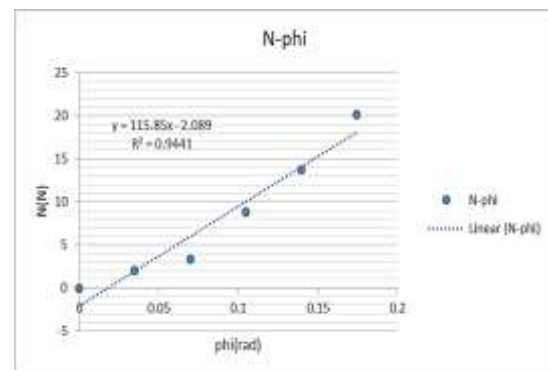
درصد اختلاف	روش عددی	روش لواندوفسکی	عدد فرود
-۰.۴۵	۲۳,۱۱۹	۴۱,۶۷۵	۱,۳۲
-۰.۴۶	۱۸,۷۴۵	۳۴,۷۶۵	۲,۶۳

اما این اختلاف با تغییر سرعت مدل شناور تقریباً ثابت است که به دلیل خطی بودن این ضرایب نسبت به سرعت عرضی قابل توجیه است. اما وجود اختلاف بین نتایج حاصل از روابط لواندوفسکی و حل عددی از دو جهت قابل بررسی است. اول اینکه نتایج شبیه‌سازی ارایه شده بر مبنای مدل‌سازی شرایط تست مدل مهار شده است که با شرایط آزمایشگاهی ممکن است اختلاف داشته باشد. دوم اینکه روابط لواندوفسکی که مبتنی بر فرمول‌بندی نتایج حاصل از تست‌های متعدد آزمایشگاهی است، تعمیم و توسعه آن به تمام شناورها و شرایط مختلف ممکن نباشد.

ضمن اینکه این موضوع در دیگر منابع نیز به این نتیجه رسیده شد که روابط نیمه تحلیلی ارائه شده توسط لواندوفسکی در همه شرایط دقیق نباشد. در این خصوص لازم به ذکر است که در یک سمپوزیم مربوط به شناورهای تندرو، لواندوفسکی دقیق نبودن روابط ارائه شده توسط خود را بیان کرده‌اند که در مقاله مورایتو و همکاران نیز این موضوع ذکر شده است [۱۹].

#### ۷- نتیجه‌گیری

پدیده‌های هیدرودینامیکی موثر در مانور شناورهای پروازی سبب می‌شود که شبیه‌سازی مانور این نوع شناورها از طریق حل معادلات ریاضی بسیار پیچیده باشد به نحوی که بسیاری از اثرات هیدرودینامیکی حاکم بر حرکت شناورهای پروازی همچنان ناشناخته بوده و قابل مدل‌سازی ریاضی نمی‌باشد. در تحقیق حاضر با استفاده از روش عددی، ضرایب هیدرودینامیکی خطی مانور نسبت به سرعت عرضی و زاویه رول مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج بدست آمده به شرح ذیل است:

شکل (۱۸) تغییرات گشتاور یاو نسبت به زاویه رول در  $Fr=1.32$ .شکل (۱۹) تغییرات گشتاور یاو نسبت به زاویه رول در  $Fr=2.64$ .

جدول (۴) ضرایب هیدرودینامیکی وابسته به زاویه رول.

فرود	$Y_\phi (N/rad)$	$K_\phi (N.m/rad)$	$N_\phi (N.m/rad)$
۱,۳۲	-۳۲۵,۴۲	-۱۲۷,۸۹	۱۰۸,۲۷
۲,۶۴	-۱۷۲,۴۲	-۲۵۶,۱۴	۱۱۵,۸۵
درصد تغییرات	-۰.۴۷	+۰.۱۰۰	+۰.۷

#### ۶- اعتبارسنجی مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی

از روابط نیمه‌تحلیلی که توسط لواندوفسکی برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی ارایه گردید [۷]، مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی برای مدل موردنظر محاسبه شده‌است و مقادیر بدست‌آمده با نتایج روش حل عددی در این مقاله در جداول (۶) تا (۸) مقایسه شده است. همان‌گونه که در جداول فوق مشاهده می‌شود، اختلاف بین نتایج حل عددی برای روابط لواندوفسکی برای ضرایب هیدرودینامیکی مدل شناور وجود دارد.

جدول (۵) مقایسه ضریب هیدرودینامیکی  $Y_v (N.s/m)$ .

درصد اختلاف	روش عددی	روش لواندوفسکی	عدد فرود
-۰.۲۸	-۱۶۹,۴۶	-۲۳۴,۳۲	۱,۳۲
-۰.۲۴	-۲۳۶,۳	-۳۰۸,۹۱	۲,۶۳

## ۸- مراجع

- [1] Li, Y., "The Simulation of Ship Maneuvering & Course Keeping with Escorttus", M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, pp.13-60, 2004.
- [2] Procedures-Guidelines, I. R., "Testing and Extrapolation Methods Manoeuvrability Free Running Model Tests", pp.1-10, 2005.
- [3] Suhrbier, K.R., "An Experimental Investigation on the Roll Stability of a Semi-Displacement Craft at Forward Speed", Symposium on Small Fast Warship and Security Vessels, pp.133-142, 1978.
- [4] Deakin, B., "Model Tests to Assess the Manoeuvring of Planing Craft", Wofson Unit M.T.I.A, University of Southampton, The International HISWA Symposium, pp.21-32, 2008.
- [5] Katayama, I.Y., Iida, T. and Ikeda, Y., "Effects of Change in Running Attitude on Turning Diameter of Planing Craft", 2nd PAAMES and AMEC, Jeju Island, pp. 177-183, 2006.
- [6] Toru Katayama, Y.I., "Development of Maneuvering Simulation Method for High Speed Craft using Hydrodynamic Forces Obtained", 10th International Conference on Fast Sea Transportation, Athens, pp.477-489 2009.
- [7] Lewandowski, E., "Dynamic of Marine Craft", Advanced Series on Ocean Engineering, Vol.22, 2004.
- [8] Lewandowski, E., "Transverse Dynamic Stability of Planing Craft", Marine Technology, Vol.34, No.2, p.109, 1997.
- [9] K. Brown. P.W., "Directional Stability Tests of Two Prismatic Planing Hulls. U.S. Coast Guard Research and Development Center", Final Report (No. CG-D- 11-94), 1994.
- [10] Brown, P.W., and Klosinski, W.E., "Directional Stability Tests of a 30 Degree Deadrise Prismatic Planing Hull", Coast Guard Research and Development Center, Report No. CG-D-04-95, Davidson Laboratory Report 2661, 1995.
- [11] Writer, S. Toxopeus, VESSIM user guide, Maritime Research Institute, Delft University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Marine Technology, 1997.
- [12] Alegrin, R. A. Bula and O. Tascon, "CFD Modeling of 2D Asymmetric Entry", Ship Science and Technology, Vol.5, No.9, pp.99-106, 2011.
- [13] Katayama, T. and Habara, K., "An Experimental Study on Instability of a Super High-speed Planing Craft with Outboard Engine at Straight Running", 11th International Conference on Fast Sea Transportation, USA, 2011.
- [14] Calix, J., Hackett, J. Bigler C. and Quadvlieg F., "Controllability of High-speed Craft", 10th International Symposium on Practical Design of

به نظر می‌رسد استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای محاسبه ضرائب هیدرودینامیکی مانور امکان‌پذیر است.

تعیین دقت محاسباتی در مقایسه با روش‌های پایه رگرسیون‌ی شاید منطقی نباشد ولی یک دورنمای کلی ارائه می‌نماید. بر این اساس رابطه بین نیروهای سرج و سوی و گشتاور رول و یاء بر حسب سرعت عرضی را با رابطه‌ای خطی می‌توان تخمین زد و از این‌رو، ضرایب هیدرودینامیکی  $(Y_v, X_v, N_v, K_v)$  بر حسب سرعت عرضی، مقداری ثابت به دست آمده است.

افزایش سرعت عرضی منجر به افزایش (قدرمطلق) نیرو سوی، گشتاور رول و یاء شده است در حالی که با افزایش سرعت عرضی، نیرو در جهت سرج کاهش یافته است.

با دو برابر شدن سرعت پیش‌روی، تغییرات مقدار  $X_v$  اندک است. این موضوع نشان می‌دهد که وابستگی این ضریب به سرعت پیش‌روی ناچیز است. مقدار  $Y_v$  تقریباً ۴۰٪ افزایش یافته و  $K_v$  و  $N_v$  به ترتیب ۳۸٪ و ۱۹٪ کاهش داشتند.

تغییرات نیروی سوی  $Y$  در فرود ۱,۳۲، نسبت به زاویه رول  $\phi$ ، به صورت خطی بوده و این در حالی است که با افزایش سرعت (فرود ۲,۶۴) این تغییرات به صورت غیرخطی مشاهده گردید. این رفتار تا حدودی برای گشتاور یاء  $N$ ، نیز مشاهده می‌شود اما رابطه بین گشتاور رول  $K$  و زاویه رول  $\phi$ ، همچنان خطی مانده است. مقادیر این مولفه‌ها با افزایش زاویه رول افزایش یافته است.

با افزایش ۱۰۰٪ سرعت (دو برابر شدن عدد فرود) مقدار ضریب  $Y_\phi$ ، ۴۷٪ کاهش یافته در حالی که ضریب  $N_\phi$ ، ۱۰۰٪ افزایش و ضریب  $K_\phi$  هم افزایشی در حد ۷٪ نشان داده است. لذا بیشترین تأثیر افزایش سرعت پیش‌روی بر گشتاور یاء وابسته به زاویه رول بوده است.

مقایسه نتایج حاصل از روش عددی با روش نیمه تحلیلی لواندوفسکی اختلاف قابل توجهی را نشان داده است. این موضوع به ماهیت روش‌ها مربوط می‌شود که البته غیردقیق بودن روش لواندوفسکی توسط ایشان نیز اذعان گردید. لذا برای صحه‌گذاری روش‌های عددی بهتر است روش‌های تست آزمایشگاهی مدل، مینا قرار گیرد. هر چند که تست مدل شناور پروازی برای یافتن ضرایب هیدرودینامیکی مانور، تعریف دقیق و استاندارد بر اساس مدارک *ITTC* ندارد.

- Ships and Other Floating Structures, Houston, Texas, USA, 2007.
- [15] Simonsen, C., Otzen J., Klimt, C., and Larsen N., "Maneuvering Predictions in the Early Design Phase Using" 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, Gothenburg, Sweden, 2012.
- [16] Ansys CFX, "Version 14.5 2012", Ansys Inc., Canonsburg, PA.
- [17] Savitsky, D., "Hydrodynamic Design of Planning Hulls", Marine Technology, Vol.1, No.1, 1964.
- [18] Savitsky, D.W., "Prodedure for Hydrodynamic Evaluation of Planning Hulls in Smooth and Rough Water", Marine technology, Vol.13, No.4, No.381-400, 1976.
- [19] Morabito, M.G., "Prediction of Planing Hull Side Forces in Yaw using Slender Body Oblique Impact Theory", Ocean Engineering, Vol.101, pp.47-57, 2015.