



بررسی اثرات زاویه پله رو به جلو بر روی عملکرد هیدرودینامیکی شناور سرشی

هادی نورقاسمی، حسن قاسمی*، محمد بختیاری، مصباح سایه‌بانی

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۶ اردیبهشت ۱۳۹۵
بازنگری: ۲۵ مرداد ۱۳۹۵
پذیرش: ۲ اردیبهشت ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

شناور سرشی پله‌دار
زاویه پله رو به جلو
نیروی پسا
پروفیل دنباله

چکیده: یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش پسا در شناورهای سرشی استفاده از پله در کف بدنه شناور است. پله باعث کاهش سطح تماس بدنه شناور با آب و در نتیجه کاهش پسای شناور می‌شود. شکل پله می‌تواند به صورت خط مستقیم در کل عرض بدنه یا به صورت V شکل دارای رأس رو به جلو یا عقب طراحی شود. در این مقاله، اثرات زاویه پله رو به جلو بر روی عملکرد هیدرودینامیکی یک شناور سرشی چاین‌دار به روش عددی حجم محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. معادلات متوسط زمانی ناپرواستوکس همراه با مدل اغتشاشی استاندارد کی- ϵ پسیلون کوپل شده با معادلات حجم سیال برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد آشفته گذرا در اطراف بدنه شناور به کمک نرم افزار آنسیس سی اف ایکس حل می‌شوند. برای پیش‌بینی حرکات شناور، معادلات دو درجه آزادی جسم صلب با معادلات حاکم بر جریان سیال کوپل می‌شوند. به منظور اعتبارسنجی مدل عددی ارائه شده در این مقاله، ابتدا نتایج عددی محاسبه شده با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه می‌شوند. سپس نتایج عددی به دست آمده برای نیروی پسا، تریم دینامیکی، بالا آمدن مرکز جرم، طول کیل خیس شده، طول چاین خیس شده، توزیع فشار روی بدنه، سطح خیس و پروفیل دنباله پاشنه در سرعت‌های مختلف و زوایای مختلف پله ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد که افزایش زاویه پله رو به جلو تا ۱۰ درجه تأثیر ناچیزی روی تریم دینامیکی و بالا آمدن مرکز جرم شناور دارد، اما اثرات آن بر روی کاهش نیروی پسا قابل ملاحظه بود.

۱- مقدمه

در طول چند دهه اخیر، تلاش‌های زیادی توسط محققین برای کاهش نیروی پسا و در نتیجه افزایش سرعت شناورهای سرشی از طریق تغییر فرم بدنه صورت گرفته است. شکل‌های مختلفی همچون چاین، استریک، پد^۱ و تونل و پله تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است. از میان این روش‌ها، استفاده از پله در کف بدنه شناور به عنوان یکی از مؤثرترین روش‌ها شناخته شده است. پله‌ها می‌توانند به صورت مستقیم در کل عرض بدنه (استفاده از این نوع پله امروزه کمتر دیده می‌شود) یا به صورت V شکل دارای زاویه رو به جلو (شکل ۱) یا رو به عقب ایجاد شود. معمولاً در کناره‌های بیرونی پله حفره‌هایی برای امکان مکش هوا به داخل و هوادهی پله ایجاد می‌کنند. به طور کلی، افزایش سرعتی حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد را می‌توان از بدنه‌های پله‌دار در مقابل بدنه بدون پله در یک توان ثابت انتظار داشت [۱]. ایده اصلی استفاده از پله کاهش میزان سطح تماس بدنه با آب بر روی دو یا چند سطح سرشی کوچک به جای یک سطح بزرگ است (شکل ۲). از آنجایی که در این حالت نیروی برآ بر روی چند سطح در طول بدنه توزیع می‌شود، پایداری طولی افزایش می‌یابد. در میان این مزایای پله، خطر واژگون شدن شناور در صورت بسته شدن مسیر هوا توسط امواج نیز وجود دارد. اگر هوادهی متوقف شود، جریان معکوس در پشت پله رخ می‌دهد که منجر به افزایش بیش

از حد پسا می‌شود. در نتیجه سرعت بطور ناگهانی کاهش یافته و ممکن است شناور واژگون شود. برای جلوگیری از این مشکل هوا اغلب از طریق دریچه‌هایی در بالای خط آب به داخل مکش می‌شود و یا از طریق لوله‌هایی در سطح عرشه تأمین می‌شود.

تاکنون، مطالعه هیدرودینامیک شناورهای سرشی با روش‌های مختلف، اکثراً بر روی بدنه‌های بدون پله متمرکز بوده است. سویتسکی [۲] در سال ۱۹۶۴ مطالعات جامعی با مدل‌سازی شناورهای سرشی بر روی بدنه‌های منشوری با زاویه ددرایز^۲ انجام داد و توانست روابط رگراسیون براساس تست مدل برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی به دست آورد. در سال ۲۰۰۷، سویتسکی و همکاران [۳] اثر اسپری آب را در پاشنه و اثر آن بر روی پسا شناور سرشی را بررسی کردند. در همین سال، بریزولا و سرا [۴] سطوح سرشی را در حالت ثابت به روش دینامیک سیالات محاسباتی مورد مطالعه قرار دادند و نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. قاسمی و همکاران یک کد کامپیوتری بر پایه روش المان مرزی را برای تحلیل شناورهای سرشی و غیر سرشی توسعه دادند و نتایج کاربرد این کدها در تحلیل هیدرودینامیک شناورهای سرشی را در سال‌های ۲۰۰۷، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ منتشر کردند [۵-۸]. در سال ۲۰۱۲، آکرمین و همکاران [۹] بدنه‌های سرشی فریزدما را به روش عددی المان محدود در شش درجه آزادی تحلیل کردند. در همین سال، یومین و همکاران [۱۰] عملکرد هیدرودینامیکی شناور

1 Strake
2 Pad

قرار دادند. در سال ۲۰۱۴، ویسی و همکاران [۱۶] یک شناور سرشی با هارد چاین را در حالت بدون پله و با پله در آب آرام به روش عددی شبیه‌سازی کردند و اثرات پله بر روی عملکرد هیدرودینامیکی شناور را مورد مطالعه قرار دادند. مدل‌سازی عددی شناور سرشی پله دار توسط بختیاری و همکاران [۱۷] مورد بررسی قرار گرفت.

در این مقاله، اثرات زاویه پله رو به جلو بر روی عملکرد هیدرودینامیکی یک شناور سرشی چاین‌دار به روش عددی حجم محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور از نرم‌افزار انسیس سی‌اف‌ایکس^۳ استفاده می‌شود. جریان سطح آزاد آشفته گذرا در اطراف بدنه شناور توسط معادلات رنس همراه با مدل اغتشاشی استاندارد کی-اِپسیلون^۴ کوپل شده با معادلات روش حجم سیال^۵ مدل‌سازی می‌شود. برای پیش‌بینی حرکات شناور نیز معادلات دو درجه آزادی جسم صلب با معادلات حاکم بر جریان سیال کوپل می‌شوند. به منظور اعتبارسنجی مدل عددی ارائه شده در این مقاله، ابتدا نتایج عددی محاسبه شده برای زاویه پله صفر درجه (یا پله عرضی سرتاسری) در سرعت‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه می‌شوند. سپس نتایج عددی بدست آمده برای پسا، تریم دینامیکی، بالا آمدن مرکز جرم، طول کیل خیس شده، طول چاین خیس شده، توزیع فشار روی بدنه، سطح خیس و پروفیل سطح آزاد در ۴ زاویه مختلف رو به جلوی پله و در سرعت‌های مختلف ارائه و تغییرات ایجاد شده در عملکرد هیدرودینامیکی شناور بر اثر تغییر در زاویه پله مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲- معادلات حاکم

برای پیش‌بینی هیدرودینامیک شناور سرشی در آب آرام، شناور به عنوان یک جسم صلب دارای دو درجه آزادی در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی به صورت گذرا انجام می‌شود. بنابراین نیاز است که معادلات حاکم بر جریان آشفته سطح آزاد اطراف شناور به صورت کوپل شده با معادلات حرکت جسم صلب در دو درجه آزادی در زمان حل شوند.

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان سیال

معادلات حاکم بر جریان سیال عبارتند از معادله پیوستگی و معادله ناویراستوکس، که پس از اعمال روش متوسط‌گیری رینولدز به این معادلات، به معادلات رنس می‌رسیم:

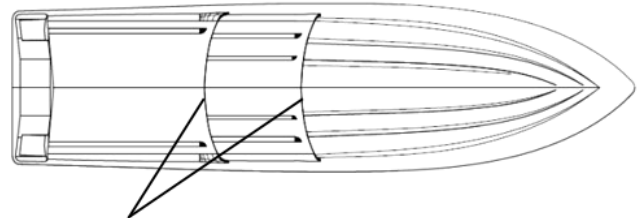
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

که در آن:

ρ : چگالی سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)

t : زمان (ثانیه)

سرشی را به روش دینامیک سیالات محاسباتی بر پایه معادلات رنس^۱ شش درجه آزادی مورد بررسی قرار دادند. قصاب‌زاده و قاسمی [۱۱] نیروهای وارد بر شناور چند بدنه تونل‌دار در حالت پایدار را به کمک کد دینامیک سیالات محاسباتی در دو درجه آزادی محاسبه کردند.



پله ها با زاویه رو به جلو

Fig. 1. Schematic of bottom of step sweep-forward angle of the planing craft

شکل ۱: نمایی از کف شناور سرشی دارای پله با زاویه رو به جلو

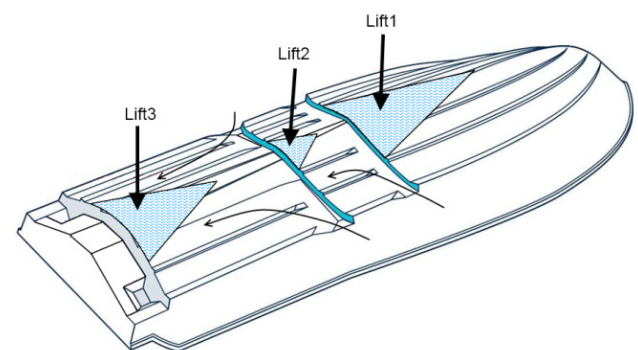


Fig. 2. Schematic of wetted surface distribution and acted lift at the bottom of the planing craft

شکل ۲: نمایی از نحوه توزیع سطح خیس و نیروی برای در کف شناور سرشی

اخیراً با توجه به نیازهای بازار و همچنین دست‌یابی به راندهای بالاتر با استفاده از بدنه‌های سرشی پله‌دار، محققان با انگیزه بیشتری این موضوع را دنبال کرده‌اند و تلاش‌های بیشتری هم به صورت عددی و هم آزمایشگاهی صرف مطالعه و بررسی این موضوع شده است. مطالعات انجام گرفته انگشت‌شماری را می‌توان بر روی بدنه‌های پله‌دار در طول ۱۰ سال اخیر یافت. ساوان [۱۲] در سال ۲۰۰۹ یک مدل را برای پیش‌بینی عملکرد بدنه‌های سرشی با پله عرضی توسعه داد. در سال ۲۰۱۰، سویتسکی و مورابیتا [۱۳] با انجام تست‌های مدل گسترده یک مدل ریاضی را برای تعیین پروفیل دنباله پاشنه بدنه‌های سرشی منشوری ارائه کردند. در همین سال، تاوتون و همکاران [۱۴] یک سری جدید از شناورهای سرشی با هارد چاین^۲ را بدون پله و با پله، به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دارند. گارلند و مکی [۱۵] عملکرد یک شناور سرشی پله‌دار را از طریق شبیه‌سازی عددی جریان غیرخطی زیر یک جسم دوبعدی در سال ۲۰۱۲ مورد مطالعه

3 ANSYS CFX

4 Standard $k-\epsilon$

5 Volume Of Fluid (VOF)

1 Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS)

2 Hard-chine

که در آن C_{e1} ، C_{e2} و σ_k مقادیری ثابت و ترم P_k تولید اغتشاش ناشی از نیروهای لزجت است.

به منظور شبیه سازی تغییر شکل های پیچیده در سطح مشترک آب و هوا، از مدل حجم سیال استفاده می شود. در این حالت معادله انتقال زیر برای محاسبه نسبت حجمی آب به هوا در هر گام زمانی حل می شود:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\alpha \bar{u}) = 0 \quad (۸)$$

که در آن:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{سلول داخل هوا} \\ 0 & \text{سلول داخل آب} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{سلول روی سطح آزاد} \end{cases}$$

در این مدل، از چگالی و لزجت مؤثر در هر سلول محاسباتی برای حل معادلات ناویراستوکس استفاده می شود که از روابط زیر محاسبه می شود:

$$\rho_{eff} = \alpha \rho_{air} + (1 - \alpha) \rho_{water} \quad (۹)$$

$$v_{eff} = \alpha v_{air} + (1 - \alpha) v_{water} \quad (۱۰)$$

که در آن، اندیس های ۱ و ۲ بیانگر دو فاز هوا و آب هستند.

۲-۲- معادله حرکت جسم صلب

معادلات حرکات انتقالی مرکز ثقل یک جسم صلب به صورت زیر است:

$$m \ddot{X}_G = \sum F_{Ext} \quad (۱۱)$$

که در آن، \ddot{X}_G تانسور شتاب انتقالی مرکز ثقل و m جرم جسم می باشد. معادلات حرکت دورانی حول مرکز ثقل بصورت زیر است:

$$\sum M_{Ext} = I \ddot{\theta}_G \quad (۱۲)$$

که در آن، $\ddot{\theta}_G$ تانسور شتاب زاویه ای حول مرکز ثقل و I تانسور ممان اینرسی می باشد. در معادلات (۱۱) و (۱۲)، برآیند نیروها و ممان های خارجی شامل نیروهای ناشی از سیال و وزن شناور است. در این جا حرکات شناور دارای دو درجه آزادی هیو^۲ (حرکت خطی شناور در راستای محور عمودی) و پیچ^۳ (حرکت دورانی شناور حول محور عرضی) می باشد، بنابراین فقط یک معادله انتقال در راستای z برای حرکت هیو و یک معادله دورانی حول محور y برای حرکت پیچ باید حل شوند. برای حل دو معادله حرکت مقدار جرم شناور و ممان اینرسی آن حول محور y ، I_{yy} مورد نیاز است. وزن مدل شناور سرشی برابر با ۲۰ کیلوگرم و ممان اینرسی آن حول محور y برابر ۱/۲۷ کیلوگرم در متر مربع می باشد.

2 Heave

3 Pitch

u : سرعت (متر بر ثانیه)

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \overline{\rho u_i u_j'}) + g_i \quad (۲)$$

که در آن:

u : سرعت (متر بر ثانیه)

P : فشار (نیوتن بر متر مربع)

g : شتاب جاذبه (متر بر مجذور ثانیه)

$\overline{\rho u_i u_j'}$ بیانگر تنش های رینولدز می باشد. بر اساس نظریه لزجت آشفستگی

که تنش های رینولدز و گرادیان های سرعت را با هم مرتبط می سازد، معادله (۲) به صورت زیر در می آید:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + g_i \quad (۳)$$

که در آن μ_{eff} لزجت مؤثر نامیده می شود و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (۴)$$

در جریان آشفته، مکانیزم انتقال مومنوم تنها توسط حرکات مولکولی صورت نمی گیرد و شدت آن به دلیل وجود جریان های متلاطم و گردابه ای افزایش می یابد. بنابراین در هنگام مدل سازی آشفستگی نیاز است که لزجت آشفستگی، μ_t ، را به لزجت مولکولی ذاتی سیال، μ ، اضافه کرده و در معادلات مومنوم به عنوان لزجت مؤثر، μ_{eff} ، در نظر بگیریم.

برای مدل سازی اغتشاش از مدل دو معادله ای کی-پسیلون استفاده شده و در آن، K معرف انرژی جنبشی جریان آشفته و ε نرخ اضمحلال لزجت انرژی جنبشی آشفته نامیده می شود. مدل کی-پسیلون یک مدل رینولدز-بلا می باشد، بنابراین این امکان را به ما می دهد که گره های شبکه محاسباتی را به بیرون از زیر لایه آرام (یعنی ناحیه بوفر و کاملاً مغشوش) منتقل کرده و برای تحلیل جریان در داخل زیر لایه آرام از توابع تجربی نزدیک دیواره^۱ استفاده شود. در نتیجه با کاهش تعداد لایه های سلولی در داخلی لایه مرزی، حجم محاسبات و در نتیجه زمان اجرا تا حد زیادی کاهش می یابد. در این مدل لزجت اغتشاشی توسط معادله (۵) به ترم های انرژی جنبشی لزجی و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی مرتبط می شوند:

$$\mu_t = c_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۵)$$

که در آن، C_{μ} یک عدد ثابت و مقادیر k و ε از طریق معادلات انتقال (۶) و (۷) محاسبه می شوند:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + p_k - \rho \varepsilon \quad (۶)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{e1} p_k - C_{e2} \rho \varepsilon) \quad (۷)$$

1 Wall function

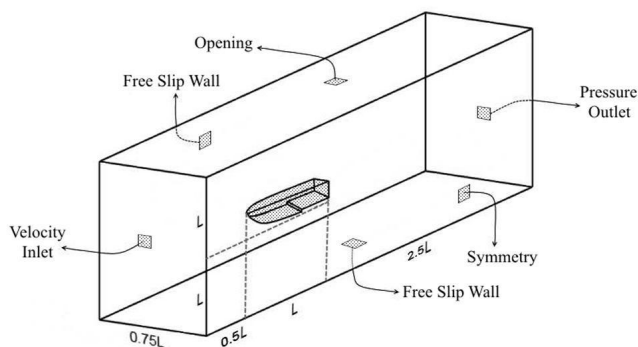


Fig. 4. Solution domain and boundary conditions

شکل ۴: دامنه حل و شرایط مرزی

۳- گسسته‌سازی دامنه

مهم‌ترین مرحله در تمام تحلیل‌های عددی تولید شبکه محاسباتی است. نوع شبکه و اندازه المان‌ها در دقت و همگرایی حل تأثیر فراوانی دارد. به دلیل پیچیده بودن هندسه دامنه حل، از یک شبکه‌بندی بی‌سازمان شامل سلول‌های چهار وجهی برای گسسته‌سازی دامنه استفاده می‌شود. با توجه به گرادیان‌های بالای سرعت در راستای عمود بر بدنه در داخل لایه مرزی جریان، در این ناحیه یک شبکه‌بندی لایه‌ای متورم به کار گرفته می‌شود. در تولید شبکه‌بندی لایه‌ای، فاصله اولین گره محاسباتی از دیواره (ضخامت اولین لایه سلولی) و تعداد گره‌های محاسباتی داخل لایه مرزی بسیار مهم است و بستگی شدیدی به مدل آشفتگی انتخاب شده دارد. در این مطالعه به دلیل استفاده از مدل توربولانسی کی-اِپسیلون، تعداد لایه‌های سلولی داخل لایه مرزی ۲۰ و ضخامت بی بعد اولین لایه سلولی روی سطح بدنه شناور $y^+ = 50$ در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، به منظور تقریب بهتر انحناها و گوشه‌های تیز، اندازه سلول‌ها روی سطوح بدنه شناور به اندازه کافی ریز می‌شود. همچنین اندازه سلول‌ها در دو ناحیه از جریان که گرادیان‌های بزرگی در متغیرهای حل در آن نواحی انتظار می‌رود ریزتر می‌شوند. ناحیه اول در اطراف سطح آزاد، جایی که حل دقیق شکل آن مورد نیاز است و ناحیه دوم بخشی از ناحیه اول در نزدیکی بدنه که جدایش جریان از چاین، پله و اسپری آب رخ می‌دهد. شبکه محاسباتی تولید شده اطراف بدنه با جزئیات در شکل ۵ نشان داده شده است. در تحلیل وابسته به زمان انجام شده در این مطالعه، از روش شبکه‌بندی متحرک استفاده شده است. در این روش شبکه محاسباتی در هر گام زمانی با تغییر وضعیت بدنه شناور به‌روز رسانی می‌شود. برای جلوگیری از تغییر شکل شبکه محاسباتی لایه‌ای داخل لایه مرزی، یک صلیبیت تا فاصله ۳۰ میلی‌متر از بدنه شناور به شبکه اعمال شده است به گونه‌ای بدون تغییر شکل همراه با حرکت بدنه جابه‌جا می‌شود.

به منظور بررسی استقلال از شبکه‌بندی حل به دست آمده، محاسبات برای زاویه پله صفر درجه در چند شبکه محاسباتی با تعداد سلول‌های مختلف انجام شده است. به عنوان نمونه، تغییرات نسبت نیروی پسا به جابه‌جایی برحسب تعداد سلول‌های محاسباتی برای زاویه پله صفر درجه در سرعت $10/13 \text{ m/s}$ در شکل ۶ نشان داده شده است.

۲-۳- دامنه حل و شرایط مرزی

مطالعه حاضر بر روی یک مدل بدنه شناور سرشی پله‌دار، به نام مدل C_1 ، انجام می‌شود. این مدل در سال ۲۰۱۰ توسط تاونتون و همکاران در دانشگاه ساوتهمپتون تست شد و نتایج تست آن برای استفاده عموم در دسترس است [۱۴]. مشخصات هندسی و جرمی این مدل در جدول ۱ آمده است. یک تصویر دوبعدی از این مدل نیز در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات مدل

Table 1. Model specifications

مقدار	پارامتر
۲	طول (m)
۰/۴۶	عرض (m)
۰/۰۹	آبخور (m)
۲۲/۵	زاویه ددرایز (درجه)
۰/۶۲	فاصله پله از پاشنه (m)
۰/۰۲	ارتفاع پله (m)
۱۹/۹۴	جرم (kg)
۱/۲۷	ممان اینرسی حرکت پیچ (kgm^2)
۰/۷۴۲	فاصله طولی مرکز ثقل از پاشنه (m)
۰/۰۹۹	فاصله عمودی مرکز ثقل از کیل (m)



Fig. 3. Body plan of the simulated model at the software

شکل ۳: خطوط بدنه مدل‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار

جریان اطراف شناور را می‌توان نسبت به صفحه مرکزی بدنه متقارن فرض کرد. بنابراین محاسبات جریان سیال تنها به یک نیم‌دامنه در یک طرف صفحه مرکزی کاهش می‌یابد. فاصله مرزهای این دامنه از بدنه شناور به گونه‌ای انتخاب می‌شود که امکان اعمال شرایط مرزی سازگار با شرایط واقعی روی مرزها وجود داشته باشد. دامنه حل همراه با شرایط مرزی اعمال شده در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، به مرز ورودی (جریان بالادست) یک سرعت عمودی یکنواخت برابر با سرعت شناور، به مرز خروجی (جریان پایین دست) یک توزیع فشار هیدرواستاتیک متناسب با عمق آب، به مرز بالایی یک شرط مرزی Opening (که امکان ورود و خروج آزاد جریان هوا را می‌دهد)، به صفحه تقارن یک شرط مرزی تقارن، به مرزهای جانبی و کف یک شرط دیواره با لغزش آزاد (مؤلفه عمودی سرعت صفر است) و به بدنه شناور یک شرط مرزی دیواره بدون لغزش (سرعت صفر روی دیواره) اعمال شده است.

۴- اعتبارسنجی مدل عددی

در این بخش، به منظور اعتبارسنجی مدل عددی حاضر، نتایج عددی به دست آمده برای زاویه پله صفر درجه ارائه و با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه می‌شود. مدل شناور مورد بررسی در این مقاله، در سال ۲۰۱۰ توسط تاوتون و همکاران برای زاویه پله صفر درجه مورد تست قرار گرفته است [۱۴]. نتایج آزمایشگاهی ارائه شده شامل طول کیل خیس شده، طول چاین خیس شده، بالا آمدن مرکز جرم دینامیکی، تریم دینامیکی، و نیروی پسا می‌باشد. پس از مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی، مدل عددی اعتبار سنجی شده برای تحلیل شناور در زوایای مختلف پله و در نتیجه بررسی اثر زاویه پله بر روی عملکرد هیدرودینامیکی شناور، به کار گرفته می‌شود و نتایج آن در بخش بعد ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرد.

نتایج عددی بدست آمده برای طول کیل خیس شده، طول چاین خیس شده، بالا آمدن مرکز جرم دینامیکی، تریم دینامیکی، و نیروی پسا در اعداد فرود طولی مختلف به ترتیب در شکل‌های ۸ تا ۱۲ با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. این نمودارها انطباق خوبی را بین نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همچنین مقادیر عددی و آزمایشگاهی همراه با مقدار خطای محاسباتی در جدول ۲ آورده شده است. خطای نسبی متوسط عددی برای طول کیل خیس شده، طول چاین خیس شده، بالا آمدن مرکز جرم دینامیکی، تریم دینامیکی، و نیروی پسا به ترتیب برابر با ۱۰/۷٪، ۶/۳٪، ۲۹/۵۳٪، ۱۲/۱٪، و ۹/۴۶٪ است.

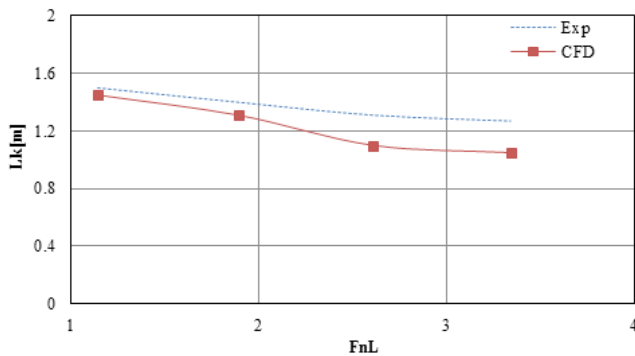


Fig. 8. Comparison of the wetted keel length

شکل ۸: مقایسه نتایج طول کیل خیس شده

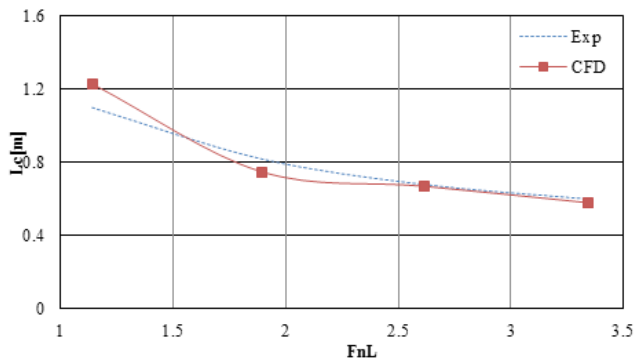


Fig. 9. comparison results of the wetted chine length

شکل ۹: مقایسه نتایج طول چاین خیس شده

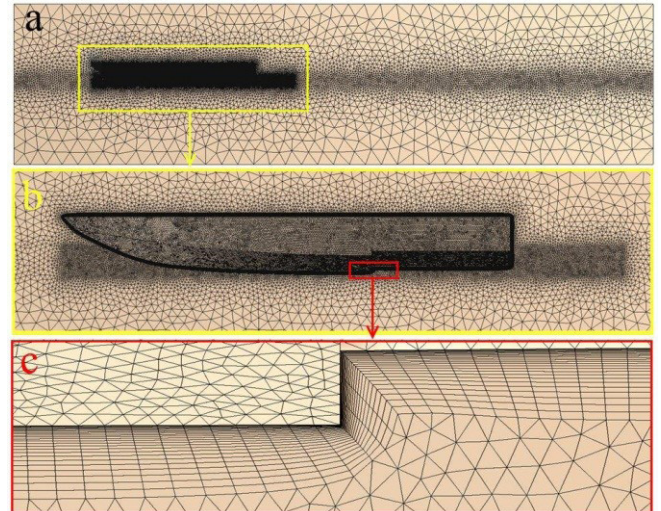


Fig. 5. Computational grid around the hull, a) Full domain, b) Near field domain, c) Step region

شکل ۵: نمایشی از شبکه محاسباتی تولید شده، (a) کل دامنه محاسباتی، (b) ناحیه نزدیک بدنه، (c) ناحیه پله

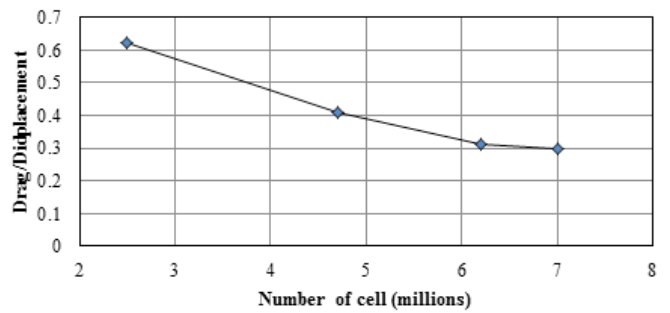


Fig. 6. Mesh dependency for drag/displacement at speed 10.13 m/s

شکل ۶: تغییرات نیروی پسا نسبت به تعداد المان‌ها برای سرعت ۱۰/۱۳ متر بر ثانیه

نمایی از مدل‌سازی انجام شده و تنظیمات در محیط نرم افزار انسیس سی‌اف‌ایکس در شکل ۷ نشان داده شده است.

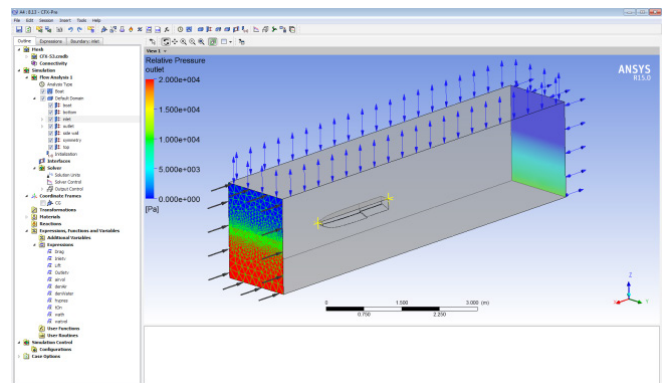


Fig. 7. Modelling set at CFX

شکل ۷: نمایشی از مدل‌سازی انجام شده در نرم افزار انسیس سی‌اف‌ایکس

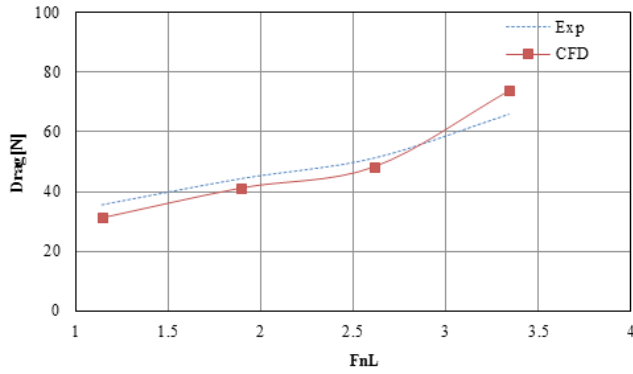


Fig. 12. comparison results of the drag force

شکل ۱۲: مقایسه نتایج نیروی پسا

جلو و عقب شناور و همچنین حجم زیر آب شناور ثابت باقی بماند. این زاویه α در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

۵-۱- تریم و بالا آمدن مرکز جرم دینامیکی

تغییرات تریم و بالا آمدن مرکز جرم دینامیکی برای زوایای مختلف پله در اعداد فرود $1/89$ و $3/34$ (معادل با سرعت‌های $6/25$ و $10/13$ متر بر ثانیه) به ترتیب در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. می‌توان دید که بطور کلی در هر دو سرعت، مقدار تریم دینامیکی با افزایش زاویه پله افزایش می‌یابد. این تغییرات نشان می‌دهد که با افزایش زاویه رو به جلوی استپ، مرکز فشار شناور به سمت جلو حرکت کرده و باعث افزایش تریم دینامیکی می‌شود. البته این تغییرات بسیار ناچیز است به طوری که حداکثر تغییر تریم



Fig. 13. Definition of the step forward angle

شکل ۱۳: نمایش پله با زاویه رو به جلو α نسبت به پله صفر درجه

جدول ۲: طول کیل خیس شده، طول چاین خیس شده، بالا آمدن مرکز جرم، تریم دینامیکی و پسا در اعداد فرود مختلف

Table 2. Comparison of the wetted keel length, wetted chine length, Rise of the center of gravity, dynamic trim, and drag at different Froude numbers

نتایج تجربی	نتایج عددی	درصد خطا %	نتایج تجربی	نتایج عددی	درصد خطا %	نتایج تجربی	نتایج عددی	درصد خطا %	نتایج تجربی	نتایج عددی	درصد خطا %	نتایج تجربی	نتایج عددی	درصد خطا %
عدد فرود	$1/14$		$1/89$			$3/34$								
(m) طول کیل خیس شده	$1/5$	$3/33$	$1/31$	$1/4$	$6/42$	$1/31$	$1/31$	$1/4$	$1/5$	$1/45$	$1/5$	$17/32$	$1/05$	$1/27$
(m) طول چاین خیس شده	$1/1$	$11/81$	$0/75$	$0/82$	$8/5$	$0/75$	$0/82$	$0/75$	$1/1$	$1/23$	$1/1$	$3/33$	$0/58$	$0/6$
(m) بالا آمدگی مرکز جرم	$0/02$	$0/023$	$0/047$	$0/04$	$7/5$	$0/047$	$0/04$	$0/047$	$0/02$	$0/023$	$0/02$	13	$0/0435$	$0/05$
تریم دینامیکی (m)	$2/34$	$29/27$	$3/14$	$2/6$	$20/76$	$3/14$	$2/6$	$20/76$	$2/34$	$1/65$	$2/34$	19	$2/31$	$93/1$
پسا (N)	$35/6$	$12/35$	$41/19$	$44/36$	$7/14$	$41/19$	$44/36$	$7/14$	$35/6$	$31/2$	$12/35$	$12/62$	$73/82$	$97/65$

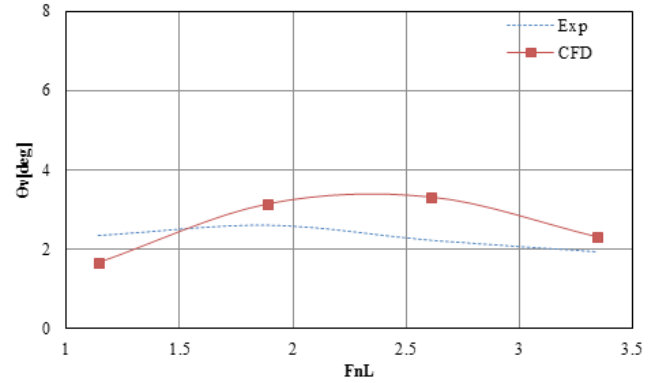


Fig. 10. Comparison results of the dynamic trim

شکل ۱۰: مقایسه نتایج تریم دینامیکی

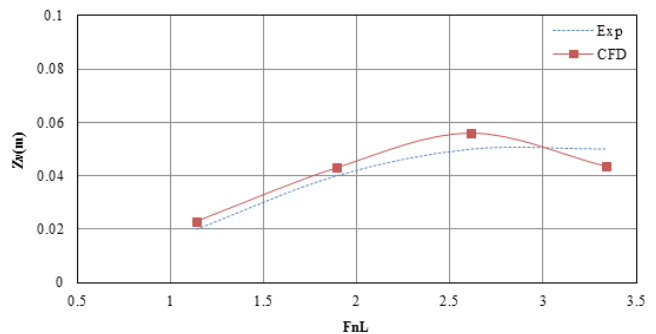
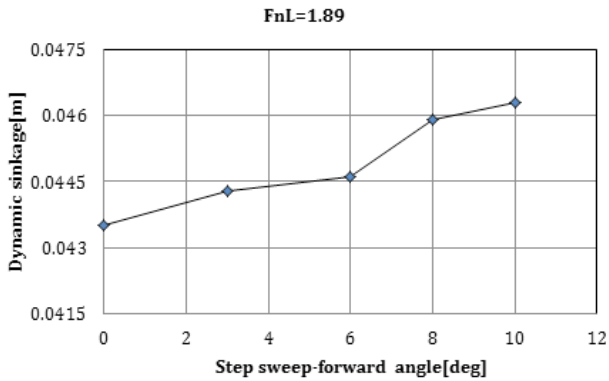


Fig. 11. Comparison results of the rise of the center of gravity

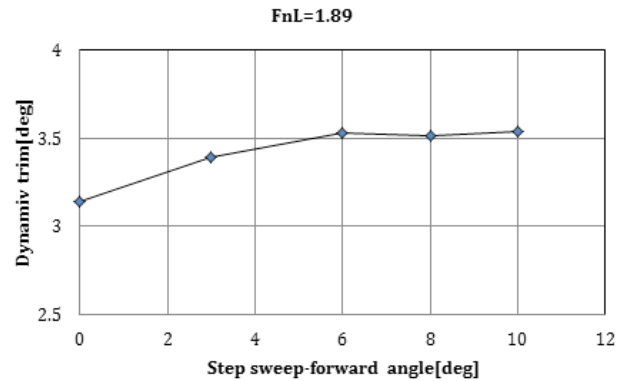
شکل ۱۱: مقایسه نتایج بالا آمدن مرکز جرم دینامیکی

۵- نتایج شناور پله دار

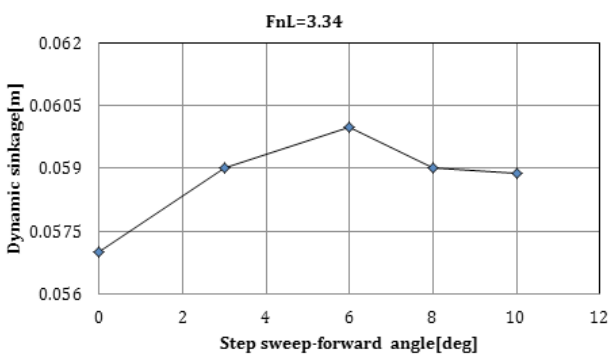
در این بخش، نتایج محاسبه شده برای زوایای مختلف رو به جلوی پله ارائه می‌شود و اثرات تغییر زاویه پله بر روی متغیرهای هیدرو دینامیکی شناور مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. محاسبات در ۵ زاویه مختلف پله (زوایای صفر، ۳، ۶، ۸ و ۱۰ درجه) برای ۲ عدد فرود مختلف (اعداد فرود $1/89$ و $3/34$) انجام شده است. برای ایجاد زاویه رو به جلوی دلخواه α در پله، پله را از وسط نیم عرض شناور به اندازه α چرخانده‌ایم به گونه‌ای که سطح بدنه



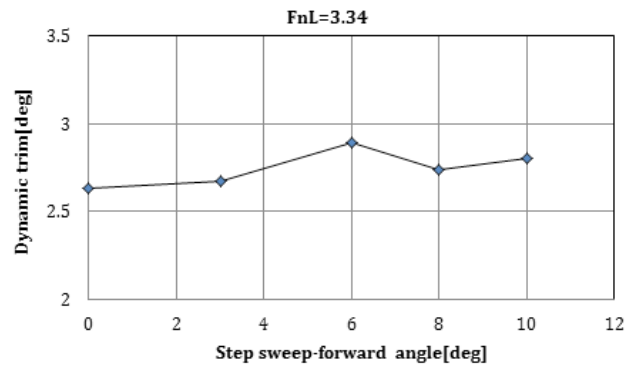
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

Fig. 15. Rise of center of gravity at different step angles for FnL=1.89 and 3.34

Fig. 14. Dynamical Trim of center of gravity at different step angles for FnL=1.89 and 3.34

شکل ۱۵: بالا آمدن مرکز جرم دینامیکی در زوایای مختلف پله برای اعداد فرود ۱/۸۹ و ۳/۳۴

شکل ۱۴: تریم دینامیکی در زوایای مختلف پله برای اعداد فرود ۱/۸۹ و ۳/۳۴

به طور کلی تغییرات در نیروی پسا، بستگی به تغییرات میزان سطح خیس بدنه دارد. از طرفی، مقدار تریم دینامیکی و بالا آمدگی مرکز ثقل تعیین کننده میزان سطح تماس بدنه با آب و در نتیجه مقدار نیروی پسای وارد بر بدنه است. در اینجا تغییرات نیروی پسا بر حسب زاویه استپ، با تغییرات تریم دینامیکی و بالا آمدن مرکز جرم محاسبه شده، که در بخش قبلی ارائه شد، همخوانی خوبی دارد.

دینامیکی نسبت به زاویه پله صفر درجه کمتر از ۰/۵ درجه است. مقدار بالا آمدن مرکز جرم دینامیکی برای عدد فرود ۱/۸۹ روند افزایشی دارد. برای عدد فرود ۳/۳۴، مقدار بالا آمدن مرکز جرم دینامیکی در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این تغییرات می‌تواند ناشی از تغییر مقدار نیروی لیفت وارد شده به بدنه در زوایای مختلف استپ باشد. در اینجا نیز تغییرات بالا آمدن مرکز جرم نسبت به تغییر زاویه پله بسیار ناچیز است به طوری که حداکثر تغییر نسبت به زاویه پله صفر درجه کمتر از ۳ درصد آبخور می‌باشد.

۵-۳- سطح خیس بدنه

میزان سطح خیس بدنه در زوایای مختلف پله برای سرعت ۱۰/۱۳ متر بر ثانیه در شکل ۱۷ نشان داده شده است. این شکل توزیع کمیت نسبت حجمی آب به هوا (حجم سیال) را روی سطح بدنه شناور نشان می‌دهد، که مشخص کننده میزان تماس سطح بدنه با آب و در نتیجه میزان نیروی پسای وارده از آب به بدنه است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه پله تا ۶ درجه، میزان سطح خیس شناور کاهش یافته و پس از آن رو به افزایش است. بنابراین با توجه به اینکه نیروی پسای شناور مستقیماً به میزان سطح تماس شناور با آب بستگی دارد، رخ دادن کمترین نیروی پسا در این زاویه

۵-۲- نیروی پسا

تغییرات نیروی پسا بر اثر تغییر در زاویه پله برای اعداد فرود ۱/۸۹ و ۳/۳۴ به ترتیب در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای عدد فرود ۱/۸۹ (معادل سرعت ۶/۲۵ متر بر ثانیه)، حداکثر کاهش در نیروی پسا نسبت به زاویه پله صفر درجه، در زاویه پله ۱۰ درجه رخ می‌دهد که برابر با ۳/۵ درصد است. برای عدد فرود ۳/۳۴ (معادل سرعت ۱۰/۱۳ متر بر ثانیه) نیز حداکثر کاهش در نیروی پسا نسبت به زاویه پله صفر درجه، در زاویه پله ۶ درجه اتفاق می‌افتد که حدود ۹/۵ درصد می‌باشد.

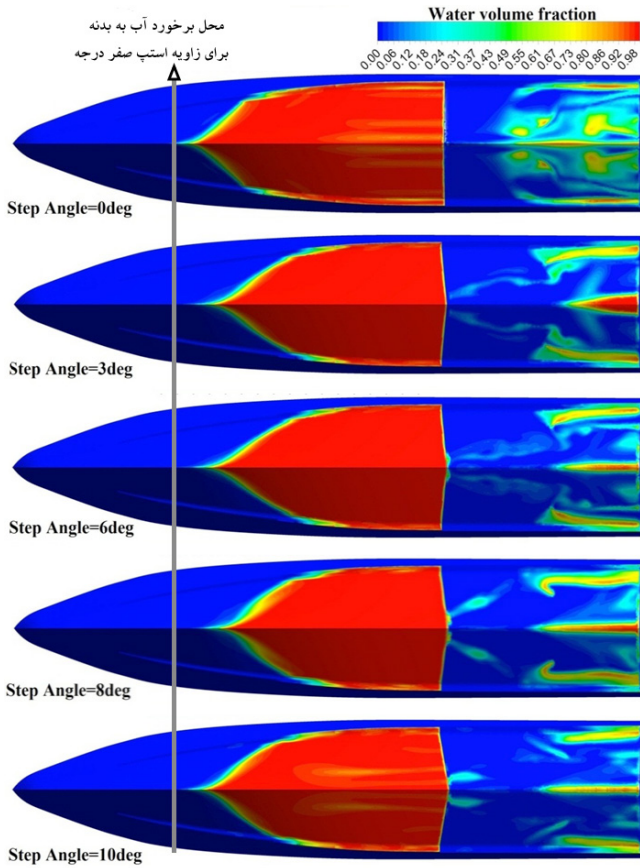


Fig. 17. Wetted surface for different angles at Speed=10.13 m/s
 شکل ۱۷: سطح خیس بدنه برای زوایای مختلف پله در سرعت ۱۰/۱۳m/s

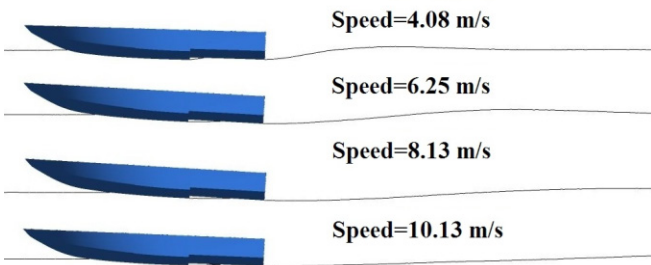
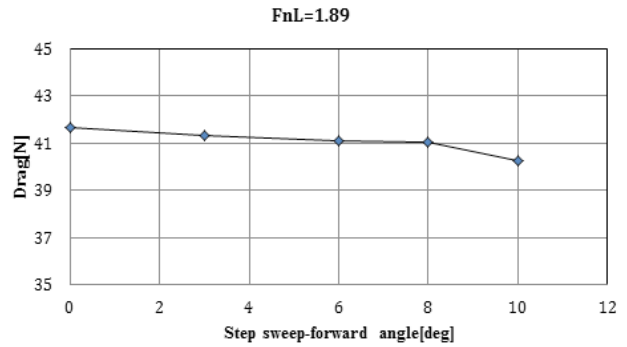


Fig. 18. Position of the stability and stern free surface profile at various speeds

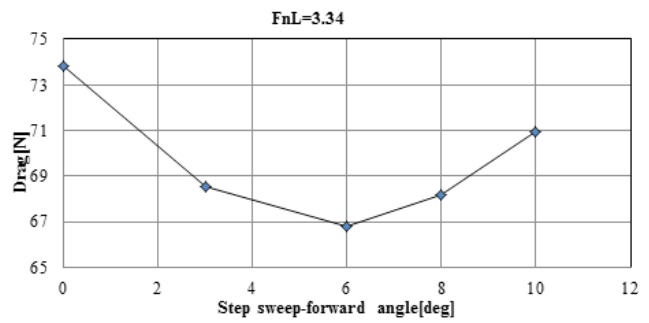
شکل ۱۸: موقعیت پایداری شناور همراه با پروفیل دنباله پاشنه در سرعت‌های مختلف

محل قرارگیری محور مختصات و پارامتر H برای محاسبه ارتفاع دنباله در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

مقایسه‌ای بین پروفیل دنباله پاشنه محاسبه شده به صورت عددی و پروفیل دنباله محاسبه شده از رابطه تجربی ارائه شده توسط سویتسکی در خط مرکزی شناور (معادله (۱۳)) برای اعداد فرود مختلف در شکل ۲۰ ارائه شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود تطابق بین نتایج عددی و روابط تجربی سویتسکی افزایش می‌یابد. بر اساس روابط



(الف)



(ب)

Fig. 16. drag force at different step angles for Froude numbers 1.89 and 3.34

شکل ۱۶: نیروی پسا در زوایای مختلف پله برای اعداد فرود ۱/۸۹ و ۳/۳۴

(یعنی ۶ درجه) طبق نمودار ۱۲ قابل توجیه است.

۵-۴- پروفیل دنباله در پاشنه

موقعیت پایداری شناور همراه با پروفیل دنباله پاشنه محاسبه شده در خط مرکزی در شکل ۱۸ نشانه داده شده است.

در سال ۲۰۰۹ سویتسکی و مورابیتو [۱۳] آزمایش‌هایی را بر روی بدنه‌های منشوری پله‌دار به منظور یافتن دنباله ایجاد شده در پاشنه انجام دادند. برای اندازه‌گیری ارتفاع سطح دنباله پشت بدنه در خط مرکزی و یک چهارم عرض تست‌های مختلفی در زوایای ددرایز مختلف و زوایای تریم مختلف برای چندین بدنه انجام گرفت. پس از استخراج نتایج و تحلیل آن‌ها به کمک نرم‌افزارهای آماری، نتایجی به صورت روابط نیمه تجربی ارائه شد. در نهایت ارتفاع دنباله پاشنه برای زوایای ددرایز ۲۰ درجه از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$H = 0.17 [1.5 + 0.03 L_k \tau^{1.5}] \sin \left[\frac{\pi}{C_v} \left(\frac{X}{3} \right)^{1.5} \right], \quad \text{for centerline} \quad (13)$$

$$H = 0.17 [0.75 + 0.03 L_k \tau^{1.5}] \sin \left[\frac{\pi}{C_v} \left(\frac{X}{3} \right)^{1.5} \right], \quad \text{for 1/4 beam buttock} \quad (14)$$

گرفت. برای این منظور جریان سطح آزاد آشفته گذرا در اطراف بدنه شناور با استفاده از معادلات رنس همراه با مدل آشفتگی استاندارد کی- ϵ اسپیلون کوپل شده با معادلات روش حجم سیال به کمک نرم افزار انسیس سی اف ایکس شبیه سازی شد. برای پیش بینی حرکات شناور در دو درجه آزادی هیو و پیچ، معادلات حرکت جسم صلب به صورت کوپل شده با معادلات حاکم بر جریان سیال حل شد. به منظور اعتبارسنجی مدل عددی حاضر، ابتدا نتایج عددی محاسبه شده برای زاویه پله صفر درجه در سرعت های مختلف با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شد. سپس نتایج عددی به دست آمده برای پارامترهای هیدرودینامیکی اصلی شناور در ۴ زاویه مختلف رو به جلوی پله ارائه و تغییرات ایجاد شده در این پارامترها بر اثر تغییر در زاویه پله مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. با توجه به نتایج محاسبات می توان موارد زیر را نتیجه گیری کرد:

- با توجه به مطابقت خوب بین نتایج عددی و آزمایشگاهی می توان نتیجه گرفت که مدل عددی ارائه شده در این مطالعه را می توان با دقت خوبی برای پیش بینی عملکرد هیدرودینامیکی شناورهای سرشی به کار گرفت.

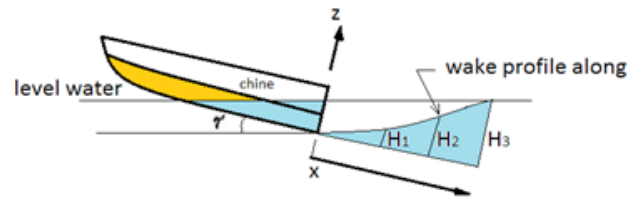


Fig. 19. Coordinate system for the stern free surface profile

شکل ۱۹: محور مختصات پروفیل دنباله برای محاسبه ارتفاع دنباله

تجربی سویستیکی، مقدار ارتفاع پروفیل دنباله پاشنه تابعی از تریم دینامیکی و طول کیل خیس شده بدنه عقب شناور استپ دار است. بنابراین این اختلاف در نتایج در اعداد فرود پایین تر می تواند ناشی از خطای عددی در پیش بینی دو کمیت اشاره شده باشد که در بخش ۴ ارائه شد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، اثرات زاویه پله رو به جلو بر روی عملکرد هیدرودینامیکی یک شناور سرشی چاین دار به روش عددی حجم محدود مورد بررسی قرار

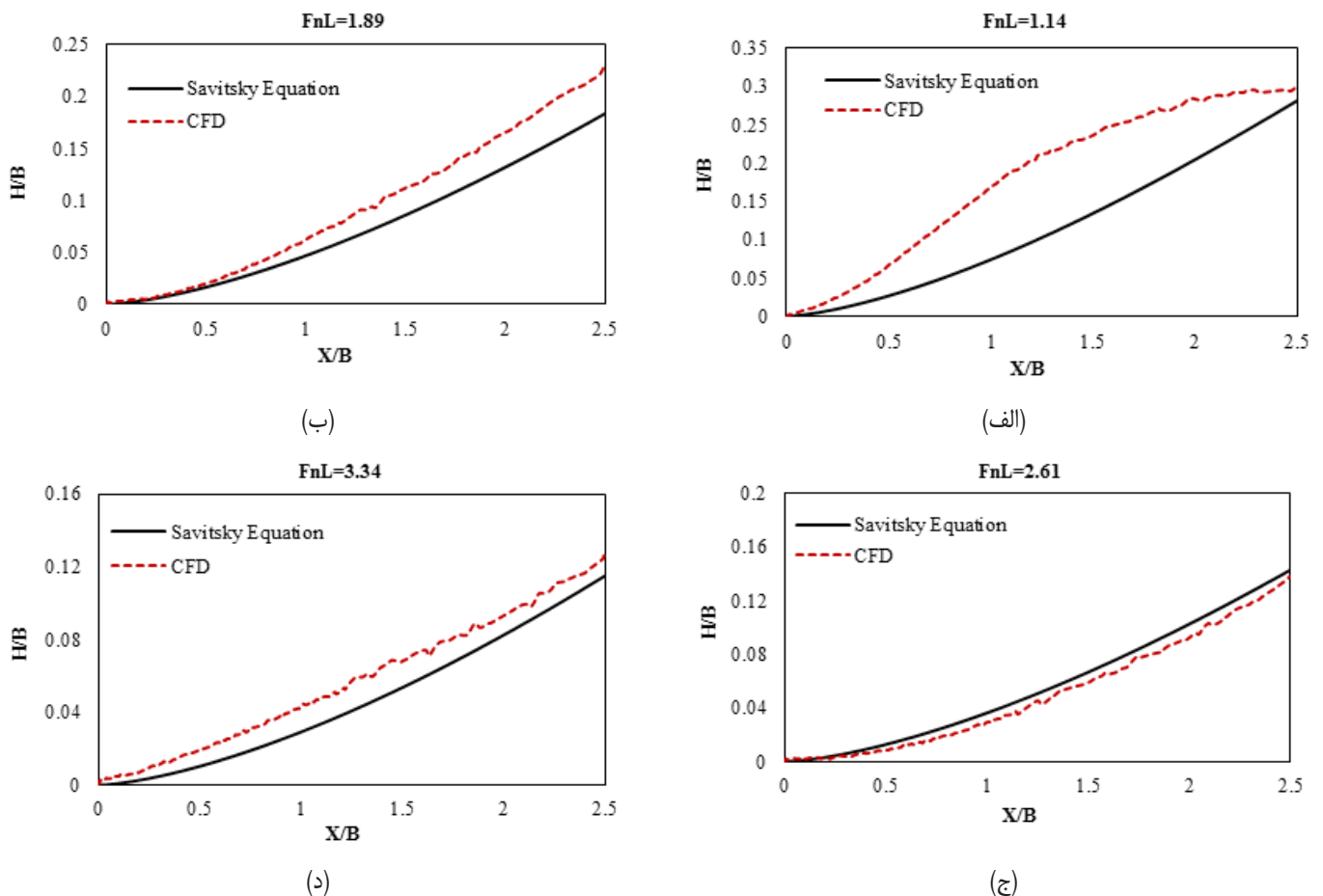


Fig. 20. Comparison of the numerical results and Savitsky formulas for stern free surface at different Froude numbers

شکل ۲۰: مقایسه بین نتایج عددی و روابط تجربی سویستیکی برای پروفیل دنباله پاشنه در خط مرکزی شناور برای اعداد فرود مختلف ($FnL=1/14, 1/89, 2/61, 3/34$)

forms. *Ocean Eng* 37(5–6):498–510

[9] I. Akkerman, J. Dunaway, J. Kvandal, J. Spinks, Y. Bazilevs, 2012. Toward free-surface modeling of planing vessels: simulation of the Fridsma hull using ALE-VMS. *Comput Mech* 50(6):719–727

[10] S. Yumin, C. Qington, S. Hailong, L. Wei, 2012. Numerical simulation of a planing vessel at high speed. *J Mar SciAppl* 11(2):178–183

[11] M. Ghassabzadeh, H. Ghassemi, 2014. Determining of the hydrodynamic forces on the multi-hull tunnel vessel in steady motion. *Brazilian Soc Mech Sci Eng* 36(4):1–12

[12] D. Svahn, 2009. Performance prediction of hulls with transverse step. Master thesis, Marina System Center for Naval Architecture, KTH, Stockholm Taunton et al.

[13] D. Savitsky, M. Morabito, 2010. Surface wave contours associated with the forebody wake of stepped planing hulls. *Mar Technol* 47(1):1–16

[14] D. Taunton, D. Hudson, R. Sheno, 2010. Characteristics of a series of high speed hard chine planing hulls—Part 1: performance in calm water. *Int J Small Craft Technol* 152:55–75

[15] WR. Garland, KJA. Maki, 2012. Numerical study of a two-dimensional stepped planing surface. *J Ship Prod Des* 28(2):60–72

[16] S.T.G. Veysi, M. Bakhtiari, H. Ghassemi, Ghiasi M., 2014. Toward numerical modeling of the stepped and non stepped planing hull, *Brazilian Soc Mech Sci Eng*, 36:697–708.

[17] M. Bakhtiari, S.T.G. Veysi, H. Ghassemi, 2016. Numerical modeling of the stepped planning hull in calm water. *International Journal of Engineering; Transactions B: Applications* Vol. 29, No. 2, 236-245.

- زاویه پله رو به جلو تا ۱۰ درجه تأثیر ناچیزی روی تریم و بالا آمدن مرکز جرم دینامیکی شناور و نیز پایداری دینامیکی شناور دارد.
- اثرات تغییر زاویه پله بر روی کاهش پسا بدنه قابل تأمل است و زاویه متناظر با حداکثر کاهش و مقدار این کاهش بستگی به عدد فرود شناور دارد.

منابع

[1] Stepped Hull vs. V-Hull, <https://www.boatingmag.com/stepped-hull-vs-v-hull-0>

[2] D. Savitsky, 1964. Hydrodynamic design of planing hulls, *Marine Technology* 1(1), 71–95.

[3] D. Savitsky, MF. Delorme, R. Datla, 2007. Inclusion of whisker spray drag in performance prediction method for high-speed planing hulls, *Maine Technology*, 44(1), 35-56.

[4] S. Brizzolara, F. Serra, 2007. Accuracy of CFD codes in the prediction of planing surfaces hydrodynamic characteristics. In: 2nd international conference on marine research and transportation, Naples

[5] H. Ghassemi, M. Ghiasi, 2007. A combined method for the hydrodynamic characteristics of planing crafts. *Ocean Eng* 35(3–4):310–322

[6] H. Ghassemi, S. Yumin, 2008. Determining the hydrodynamic forces on a planing hull in steady motion. *J Mar SciAppl* 7:147–156

[7] AR. Kohansal, H. Ghassemi, M. Ghiasi, 2010. Hydrodynamic characteristics of high speed planing hulls, including trim effects, *Turkish. J Eng Environ Sci* 34:1–16

[8] AR. Kohansal, H. Ghassemi, 2010. A numerical modeling of hydrodynamic characteristics of various planing hull

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

H.Nourghasemi, H. Ghassemi, M. Bakhtiari, M. Sayehbani, Investigation of Step Sweep-Forward Angle Effects on the Hydrodynamic Performance of a Planning hull, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(4) (2018) 903-912.
DOI: 10.22060/mej.2016.788

