مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1396، دوره 17، شماره 2، ص‌ص 231-239

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی عددی هیدرودینامیک حرکت یک شناور مدل تندرو با دو درجه آزادی

حسن قوشچی[1]، محمدرضا انصاری[2*]، رضا آزادی[3]

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی معماری کشتی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرّس ، تهران
3- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی 143-14115، mra_1330@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 17 آبان 1395
پذیرش: 24 دی 1395
ارائه در سایت: 25 بهمن 1395

کلید واژگان:
شناور تندرو
جریان دوفازی
درجه آزادی
پله

چکیده

در پژوهش حاضر رفتارهای هیدرودینامیکی و ایرودینامیکی یک شناور تندرو با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد مطالعه قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌ها به صورت کاملاً سه بعدی، با در نظر گرفتن جریان دوفازی و توربولانس انجام شده اند. جهت به دست آوردن مقدار سینکیج و تریم شناور، دو درجه آزادی برای آن فرض شده است. به کمک حلگر شش درجه آزادی و با استفاده از مش‌های دینامیکی، معادلات دینامیک جسم صلب با معادلات حاکم بر سیال کوپل شده‌اند. با توجه به نتایج آزمایشگاهی موجود، شبیه سازی شناور تندروی هدف در محدوده سرعت خطی 0.9-8.31 m/s انجام شده است. مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود، نشان می‌دهد که بیشینه خطای میانگین حاصل برای مقدار مقاومت، تریم و سینکیج در هر سرعت از 10٪ تجاوز نمی‌کند که نشان از دقت و کارایی مدل حاضر دارد. برای تمامی سرعت‌ها استقلال حل از مش بررسی شده است و نتایج برای مناسب‌ترین مش ارائه شده است. در ادامه، تأثیر اعمال پله بر روی شناور، جهت کاهش درگ و افزایش پایداری برای چند حالت مختلف یک و دو پله مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در نهایت بهینه‌ترین حالت معرفی و نتایج مربوط به آن ارائه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که با اعمال پله به قایق تندوری مورد نظر می‌توان تا 11% مقاومت بدنه را کاهش داد.

Numerical simulation of hydrodynamics of a model high-speed planning hull with two degrees of freedom

Hassan Ghoshchi[1], Mohammad Reza Ansari[2*], Reza Azadi [2]

1- Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B. 143-14115, Tehran, Iran, mra_1330@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 07 December 2016
Accepted 13 January 2016
Available Online 13 February 2017

Keywords:
High speed hull
two-phase flow
degree of freedom
step

ABSTRACT

In the present research, hydrodynamical and aerodynamical characteristics of a high-speed planning hull are studied using computational fluid dynamics. Simulations are three-dimensional, considering a two-phase turbulent flow. To obtain sinkage and trim of the hull, two degrees of freedom is assumed for it. Rigid body dynamic equations and governing equations of the fluid are coupled using 6DOF solver and dynamic mesh technique. Based on the available experimental results, simulations of the aimed high speed hull are performed in the linear velocity range of 0.9-8.31 m/s. Comparing the present numerical results with the experimental data shows that maximum average error for resistance, trim and sinkage in different velocities does not exceed 10%. This shows the accuracy and proficiency of the current model. Mesh independency of solutions is studied for all velocities and the results are reported based on the most suitable mesh. At the end, the effect of applying steps on reducing the drag and improving stability of the hull is investigated for several states in one and two steps. Finally, the most optimized state is introduced and related results are given. Results show that applying steps to the mentioned high speed hull reduces the overall resistance by 11%.

1- مقدمه

امروزه از شناورهای تندور برای اهداف مختلف نظامی، تفریحی و نقل و انتقال استفاده می‌شود، لذا تحلیل دقیق رفتار بدنه شناور در هنگام حرکت، نقش مهمی در بهینه‌سازی حرکت و بالا بردن اطمینان در عملکرد آن‌ها در شرایط مختلف دارد. طراحی ساختار بدنه این نوع شناورها به دلیل تأثیر مستقیم آن‌ها بر وزن، هزینه و بارِ قابل جابه‌جایی بسیار حائز اهمیت است. زاویه ایجاد شده بین افق و محور مرکزی قایق که در اثر حرکت زاویه‌ای شناور در راستای عمود بر بدنه ایجاد می‌شود، زاویه تریم[1] و خود این حرکت به اصطلاح پیچ[2] نامیده می‌شوند. مقدار جابه‌جایی عمودی مرکز گرانش شناور را سینکِیج[3] یا درفت[4] و نام این حرکت را هیو[5] می‌نامند. پورپویزینگ[6] به صورت نوسان‌های ترکیبی یک قایق در پیچ و هیو، زمانی که قایق در حال

[1] Trim
[2] Pitch
[3] Sinkage
[4] Draft
[5] Heave
[6] Porpoising

Please cite this article using:
H. Ghoshchi, M. R. Ansari, R. Azadi, Numerical simulation of hydrodynamics of a model high-speed planning hull with two degrees of freedom, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 231-239, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پرواز[1] روی سطح آب است، تعریف می‌شود. با حرکت روبه جلوی شناور تندرو، نیروهای هیدرودینامیکی بیش‌تر وزن آن را تحمل می‌کنند و لذا قسمت اعظمی از شناور بیرون از آب نگه داشته می‌شود، در این حالت هیدرودینامیک قسمت درون آب و اِیرودینامیک هوای بالای سطح آب، هر دو در حرکت شناور مؤثرند و در رفتار دینامیکی بدنه شناور مؤثرند. در حالت کلی شناورهای تندرو دارای سه مُد حرکتی هستند [1]: جابه‌جایی، گذار و پروازی. در مد جابه‌جایی، جهت رسیدن به سرعت بالاتر، قدرت موتور بیش‌تری نیاز است. در مد گذار، شناور از مد جابه‌جایی به پروازی گذر می‌کند و مقدار عدد فرود کم‌تر از 0.85 باقی می‌ماند. همانند مد جابه‌جایی، تریم شناور، سطح خیس و درگ، همگی در این مد افزایش می‌یابند. اما با گذر شناور به سمت مد پروازی، نیروهای هیدرودینامیکی تولید شده توسط قسمت درون آب شناور، آن را به سمت سطح آب هدایت می‌کند و در نتیجه باعث حرکت سریع‌تر شناور می‌شود. در مد پروازی، نیروهای شناوری و لیفت هیدرودینامیکی به ترتیب در حدود 5٪ و 95٪ از وزن شناور را تحمل می‌کنند. در این مد حرکتی، جریان اطراف شناور دوفازی می‌شود و حل معادلات حاکم با استفاده از روش‌های تحلیلی غیر ممکن می‌شود. اگرچه آزمایش‌های تجربی قابل اعتمادترین راه برای مدل کردن این جریان‌ها است، اما این روش‌ها بسیار پرهزینه هستند و داده‌ها فقط برای تعداد محدودی از شرایط قابل برداشت هستند. محدودیت‌های ذاتی تکنیک‌های تحلیلی و آزمایشگاهی، پژوهشگران را در سال‌های اخیر به سمت استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی[2] سوق داده است.

در سال 1964، سَویتسکی [2] مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را روی تعدادی از شناورهای قوه-شکل مختلف انجام داد و روابطی نیمه-تجربی برای محاسبه نیروهای لیفت و درگ ارائه داد. او معادلاتی بر اساس روش بسرفت[3] به دست آورد و روندی را جهت پیش‌بینی نیروی درگ در شناورهای تندور در مد پروازی پیشنهاد کرد.

داکتورز [3] شاید اولین پژوهشگری است که مطالعه جامع سه بعدی روی شناور پروازی و بدون محدودیت در عدد فرود، انجام داده است. او از یک معادله انتگرالی استفاده کرد که توزیع فشار را به پتانسیل سرعت مربوط می‌کند. جریان اطراف شناور توسط المان‌های محدود مدل شده است. فشار با موقعیت هر المان تغییر می‌کند و توزیع کلی آن پیوسته است. معادله انتگرال دوگانه به کمک یک تابع خاص، به انتگرال خطی تبدیل می‌شود. یکی از ایرادهای این کار، مجهول بودن سطح خیس است و به عنوان قسمتی از حل به دست می‌آید. از آن‌جایی که المان‌های فشار روی سطح آزاد یکنواخت نیستند، لذا توزیع فشار روی سطح آزاد به درستی مدل نشده است.

قاسمی و همکاران [4-6] کدی کامپیوتری بر اساس روش المان مرزی همراه با لایه مرزی گسترش دادند که توسط آن هیدرودینامیک شناورهای پروازی و غیر پروازی را تحلیل کردند. یکی از معایب کد آن‌ها به حساب نیاوردن جریان دوفازی در معادلات است. همچنین کد نمی‌تواند برای هندسه‌های پیچیده و اعداد فرود بالا استفاده شود. آن‌ها همچنین از این کد برای مطالعه الگوی موج و ضرایب فشار استفاده کردند. به علاوه، قاسمی و قیاسی [4] و قاسمی و یومین [5]، تکنیکی هیبریدی برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی برای جریان پایا اطراف یک شناور پروازی گسترش دادند. در تمام این مطالعات، هماهنگی خوبی بین نتایج روش المان مرزی و نتایج آزمایشگاهی گزارش شده است.

کاپونِتو [7] از یک مدل دوفازی بر اساس روش حجم محدود برای یافتن توزیع فشار روی شناور پروازی استفاده کرد. آن‌ها از مش یکنواخت در تحلیل بهره بردند و از نرم افزار کومِت[4] (درجه آزادی صفر) برای این امر استفاده کردند. برای هر سرعت، سه زاویه تریم و سه سینکیج به کار رفت. برای حالت‌های دیگر، نتایج برای یک نیروی لیفت مشخص و طول مرکز فشار[5] معین، نسبت به حالت تعادل شناور، برازش شده‌اند. تعادل زمانی بر قرار می‌شود که لیفت با وزن شناور برابر شود و مرکز فشار روی مرکز گرانش نیفتد. آن‌ها نتایج خود را با روابط آزمایشگاهی سَویتسکی مقایسه کردند. کاپونتو و همکارانش [8] بعدها این کار را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای حل مسأله سه بعدی و سرعت بالای شناور، بسط دادند. در تکنیک جدید، آن‌ها از یک مش متحرک با دو درجه آزادی در شبیه‌سازی استفاده کردند. دو درجه آزادی به ترتیب شامل تعادل ممان‌ها و نیروهای عمودی برای به دست آوردن تریم و سینکیج است.

پناهی و همکاران [9] از روش حجم محدود، حجم سیال و روش گام نسبی[6] برای کوپل سرعت و فشار استفاده کردند و هیدرودینامیک دو نوع متفاوت از شناور را شبیه‌سازی کردند. اولین شناور یک گوه دوبعدی با دو درجه آزادی بود. سپس آن‌ها حرکت یک شناور کاتارمن پروازی را تحلیل کردند. در این معادلات، آن‌ها منحنی‌های زاویه تریم و درگ را به دست آوردند و نتایج خود را با کارهای عددی دیگر مقایسه کردند که تطابق خوبی بین آن‌ها گزارش کرده‌اند. آن‌ها از کد نومِلز-نومِریک[7] استفاده کردند که توسط سیف و همکاران [10] گسترش یافته و بهینه شده است. این کد می‌تواند قابلیت مانور و هیدرودینامیک شناورهای تندرو را به خوبی مدل کند. یکی از محدودیت‌های این کد، واگرایی حل در اعداد فرود بالا است. این محققان اخیراً تعدادی پژوهش منتشر کرده‌اند که شامل شبیه‌سازی سه بعدی حرکت غیرخطی شناورهای تندرو، شبیه‌سازی حرکت یک شناور کاتارمن با استفاده از مش متحرک [11] و شبیه‌سازی عددی شناور تندروی پروازی است.

سابرامانیان و همکارانش [12] از یک کد بر پایه روش حجم محدود[8] برای شبیه‌سازی یک شناور از سری 60 استفاده کردند. از مدل حجم سیال برای دنبال کردن مرز مشترک استفاده شده و به کمک مش متحرک، موقعیت شناور با زمان تغییر می‌کند، که به دنبال آن تریم و سینکیج شناور تا رسیدن به یک حالت تعادلی تغییر می‌کند. این روند تا رسیدن به تعادل کامل ادامه می‌یابد. نتایج حاصل از کار این محققان هماهنگی بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. نمودار تریم و درگ شناور برای سرعت‌های مختلف و شکل‌های سطح آزاد در بین نتایج آن‌ها دیده می‌شود.

یوسفی و همکاران [13] تأثیر افزودن تونل بر نیروی درگ در شناور تندروی کوگار را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای به دست آوردن موقعیت تعادل شناور از میان‌یابی خطی استفاده کرده‌اند و هیچ درجه آزادی برای شناور قائل نشده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزودن تونل در سرعت‌های بالاتر (حالت پروازی) موجب کاهش درگ و کم‌تر شدن عمق شناور در آب می‌شود. اما در حالت پروازی اِعمال تونل موجب افزایش مقاومت روی شناور می‌شود.

[1] Planing
[2] Computational Fluid Dynamics
[3] Regression
[4] COMET
[5] LCP
[6] Partial step
[7] NUMELS-NUMERIC
[8] CFD-SHIP-IOWA

در پژوهش حاضر، رفتار هیدرودینامیکی و اِیرودینامیکی یک قایق تندرو با در نظر گرفتن دو درجه آزادی حرکتی به صورت سه بعدی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. اعمال درجه آزادی به قایق، منجر به کوپل معادلات دینامیک جسم صلب و معادلات مش‌زنی به میدان سیال می‌شود که به علت پیچیدگی‌های آن به ندرت در کارهای پیشین انجام گرفته مشاهده شده است. همچنین برای اصلاح مش‌ها در هر گام زمانی از روش قدرتمند هموارسازی[1] استفاده شده است. در ادامه نتایج حاصل از اِعمال پله بر کاهش مقاومت بدنه نیز مورد بررسی قرار گرفته و حالت‌های بهینه پیشنهاد شده‌اند. لازم به ذکر است که شناور حاضر در واقع مدل دو متری از شناور اصلی است که حدود 23 m طول دارد. با توجه به اینکه بیشینه سرعت مورد بررسی در شناورِ مدل حاضر برابر با 8.31 m/s است، با برابر قرار دادن عدد فرود[2] برای مدلِ حاضر و شناورِ اصلی، بیشینه سرعت مربوط به مدلِ واقعی در حدود 55 knot به دست می‌آید.

2- شبیه سازی عددی

2-1- معادلات حاکم

در پژوهش حاضر سیال‌های مورد استفاده آب و هوا هستند که نیوتنی و تراکم ناپذیر فرض شده‌اند، لذا معادلات پیوستگی و مومنتوم حاکم بر جریان به صورت زیر تعریف می شوند [14].

$$\nabla \cdot V = 0 \tag{1}$$

$$\rho\left(\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla \cdot VV\right) = \nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla V + (\nabla V)^T)] - gK \tag{2}$$

که در آن ها V، ρ، μ به ترتیب بردار سرعت، چگالی و لزجت دینامیکی هستند. لازم به ذکر است که به دلیل بزرگ بودن عدد وبر[3] در شبیه‌سازی‌ها، از تأثیر نیروی کشش سطحی صرف نظر شده است.

برای به دست آوردن هندسه مرز مشترک بین دو فاز از مدل حجم سیال[4] استفاده شده است که معادله مربوط به آن به شکل زیر است [15].

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (V\alpha) = 0 \tag{3}$$

در این رابطه، α مقدار کسر حجمی است که برای هوا برابر با یک، برای آب برابر با صفر و در مرز مشترک بین دوفاز مقداری بین صفر و یک دارد.

مشخصات ترموفیزیکی سیال‌ها بر اساس مقدار α تعریف می‌شوند [15].

$$\rho(\alpha) = \alpha\rho_a + (1-\alpha)\rho_w \tag{4}$$

$$\mu(\alpha) = \alpha\mu_a + (1-\alpha)\mu_w \tag{5}$$

با توجه به مقدار عدد رینولدز هوا و آب، الگوی جریان آشفته است، لذا باید از یک مدل توربولانسی مناسب جهت اِعمال تأثیر آشفتگی بر جریان استفاده کرد. در پژوهش حاضر مدل توربولانسی k-ω SST استفاده شده است که روابط مربوط به آن در زیر آمده است [16].

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (Vk) - \nabla \cdot [(\nu + \sigma_k \nu_T)\nabla k] = P_k - \beta^* k\omega \tag{6}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (V\omega) - \nabla \cdot [(\nu + \sigma_\omega \nu_T)\nabla \omega] = \gamma S^2 - \beta\omega^2 + 2(1-F_1)\sigma_{\omega_2}\frac{1}{\omega}\nabla k \cdot \nabla\omega \tag{7}$$

$$\nu_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1\omega, SF_2)} \tag{8}$$

$$P_k = \min(\tau \cdot \nabla V, 10\beta^* k\omega) \tag{9}$$

$$F_1 = \tanh\left\{\left\{\min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega}\right), \frac{4\sigma_{\omega_2} k}{CD_{k\omega} y^2}\right]\right\}^4\right\} \tag{10}$$

$$F_2 = \tanh\left\{\left[\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^*\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega}\right)\right]^2\right\} \tag{11}$$

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho\sigma_{\omega_2}\frac{1}{\omega}\nabla k \cdot \nabla\omega, 10^{-10}\right) \tag{12}$$

که در آن ضرایب ثابت σ_k، σ_ω، β و α حاصل ترکیب ضرایب ثابت دو مدل $k-\epsilon$ و $k-\omega$ هستند و از رابطه (13) محاسبه می شوند.

$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2(1-F_1) \tag{13}$$

که ضرایب مربوطه در جدول 1 آمده اند.

معادله حاکم برای حرکت جابه‌جایی مرکز گرانش برای سیستم مختصات اینرسی یک جسم صلب از رابطه (14) حاصل می‌شود.

$$\dot{V}_G = \frac{1}{m}\sum F_G \tag{14}$$

که در آن $\dot{V}_G$ شتاب جابه‌جایی مرکز گرانش، m جرم و F_G بردار نیروی ناشی از حرکت مرکز گرانش است. شتاب زاویه‌ای جسم، $\dot{\boldsymbol{\omega}}_B$، با استفاده از مختصات جسم از رابطه (15) محاسبه می‌شود.

$$\dot{\omega}_B = L^{-1}\left(\sum M_B - \omega_B \times L\omega_B\right) \tag{15}$$

که در آن L، تانسور اینرسی، M_B بردار مومنتوم جسم و $\boldsymbol{\omega}_B$ بردار سرعت زاویه‌ای جسم جامد است. پس از به دست آمدن شتاب‌های زاویه‌ای و جابه‌جایی از روابط (14) و (15)، با انتگرال‌گیری عددی، سرعت‌های زاویه‌ای و جابه‌جایی در محاسبات مش دینامیکی استفاده می‌شوند تا موقعیت شناور به روز شود.

2-2- هندسه مسأله، شرایط مرزی و اولیه، مش‌زنی

در شکل 1 مشخصات اصلی هندسی مدل شناور تندرو ارائه شده است [17]. ابعاد هندسی مهم شناور نیز در جدول 2 خلاصه شده اند.

ابعاد میدان حل انتخاب شده و موقعیت شناور مورد مطالعه در شکل 2 نمایش داده شده است. مرز خروجی میدان در فاصله دور از شناور انتخاب شده است تا از عدم رسیدن موج‌های ناشی از وِیک شناور به مرز خروجی اطمینان حاصل شود. همچنین برای داشتن عمق کافی از آب، فاصله بین کف شناور و میدان حل در حدود سه برابر طول شناور در نظر گرفته شده است.

شرط ورودی میدان حل به دلیل استفاده از مدل کانال باز، فشار ورودی[5] ورودی[5] در نظر گرفته شده است. خروجی میدان، جایی است که جریان از میدان خارج می‌شود و فشار خروجی[6] انتخاب شده است. بدنه شناور صلب در در نظر گرفته شده است و در نتیجه شرط مرزی دیواره روی آن اعمال شده است. بقیه شرایط مرزی به صورت متقارن در نظر گرفته شده اند.

جدول 1 ضرایب ثابت در معادلات آشفتگی [16]

Table 1 Constant coefficients in turbulence equations [16]

$\sigma_{k1} = 0.85$	$\sigma_{k2} = 1.0$
$\sigma_{\omega 1} = 0.5$	$\sigma_{\omega 2} = 0.856$
$\beta_1 = 0.075$	$\beta_2 = 0.0828$
$\alpha_1 = 0.55$	$\alpha_2 = 0.44$
$a_1 = 0.31$	$\beta^* = 0.09$

[1] Smoothing
[2] Froude
[3] Weber
[4] VOF (Volume Of Fluid)
[5] pressure inlet
[6] pressure outlet

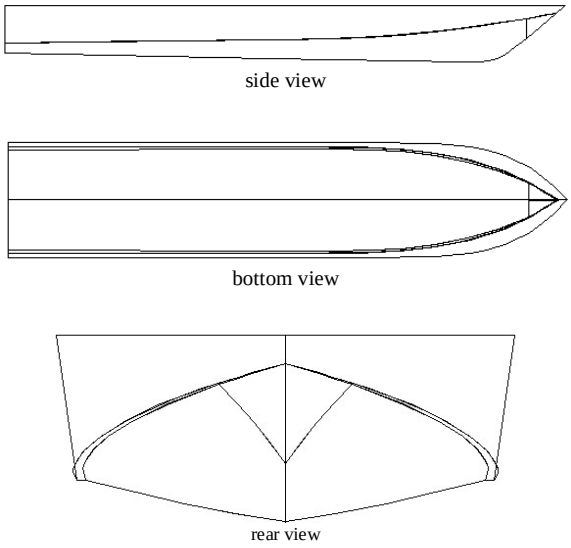

Fig. 1 The main geometry of the planning hull [17]

شکل 1 هندسه اصلی شناور تندرو [17]

جدول 2 ابعاد هندسی مهم شناور

Table 2 Main geometrical dimensions of the hull

ممان اینرسی	پهنای شناور	جرم	طول مرکز گرانش	طول شناور
I_{yy} [kgm^2]	b [m]	M [kg]	LCG [m]	Lpp [m]
8.20	0.4	28.44	0.88	2.15

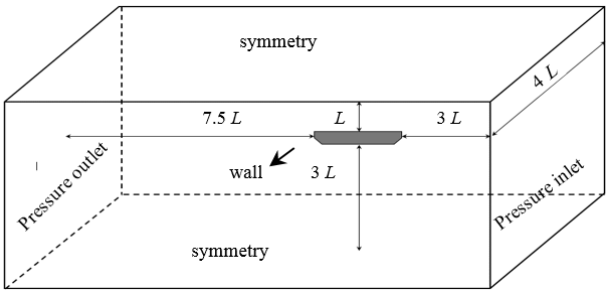

Fig. 2 Dimensions of computational domain and boundary conditions

شکل 2 ابعاد میدان حل و شرایط مرزی

با توجه به ماهیت مسأله حاضر، جهت مش‌زنی میدان حل باید چند نکته مهم را در نظر داشت:

1- به دلیل استفاده از مدل دوفازی و مهم بودن موج‌های ایجاد شده در وِیک شناور، باید مرز اولیه بین دوفاز به اندازه کافی ریز باشد تا مرزی صاف ایجاد شود؛ همچنین برای به دست آوردن شکل مناسبی از موج‌ها بهتر است که در عمق مناسبی در وِیک شناور، از مش‌های ساختاری هگزاهدرال[1] استفاده شود تا کیفیت مناسبی از امواج به دست آید.

2- حرکت شناور به دلیل داشتن درجه آزادی منجر به تغییر شکل مش‌های اطراف شناور می‌شود، لذا باید مش اطراف شناور از نوع غیرساختاری مثلثی تتراهدرال[2] انتخاب شود تا مش‌زنی مجدد به روش فنر-پایه[3] قابل انجام باشد.

3- برای جلوگیری از به هم خوردن مش‌های اطراف شناور در اثر مش زنی مجدد و حرکت آن، محدوده اطراف شناور درون یک باکس با ابعاد مشخص قرار می‌گیرد که همراه با حرکت شناور حرکت می‌کند. در این صورت حرکت شناور به مش‌های دیگر بیرون از این باکس (محدوده) درونی انتقال پیدا می‌کند.

لذا با توجه به توضیحات بالا، همان طور که در شکل 3 نمایش داده شده است، میدان حل به 12 حجم تقسیم شده است.

میدان اطراف شناور در هر دو باکس ایجاد شده، از نوع تتراهدرال غیرساختاری مش‌زنی شده است تا با توجه به چرخش و جابه‌جایی عمودی شناور امکان مش‌زنی مجدد در این ناحیه وجود داشته باشد. ناحیه مرز مشترک اولیه بین دوفاز در جلوی شناور به اندازه کافی با مش‌های ساختاری ریز می‌شود تا مرز اولیه صاف ایجاد شود. در ناحیه پشت شناور که موج در آن ایجاد می‌شود، مش‌های ساختاری با ضخامت کم ایجاد شده است. بقیه حجم‌ها نیز مربوط به نواحی دور دست میدان می‌باشند که از نوع ساختاری هگزاهدرال مش‌زنی شده‌اند. شکل 4 نمایی از مش ایجاد شده را نشان می‌دهد.

بعد از ساخت مدل شناور، نیاز است که مبدأ مختصات جهانی در شروع به مرکز جرم (گرانش) شناور انتقال پیدا کند، چرا که نرم افزار فلوئنت مرکز مختصات انتخابی در مدل را به عنوان مرکز جرم جسم در نظر می‌گیرد و جابه‌جایی‌های مکانی و زاویه‌ای مرکز گرانش را نسبت به این حالت اولیه گزارش می‌کند.

برای حل معادلات حاکم بر میدان حل، به دست آوردن نتایج، بررسی و نمایش آن‌ها از نرم افزار انسیس فلوئنت[4] نسخه 16 استفاده شده است. محاسبات به صورت موازی و در یک رایانه 7 هسته با رم 16 گیگابایت انجام شده‌اند. لازم به ذکر است که برای هر اجرا با مش‌های ریز (بالاتر از دو میلیون) تا رسیدن به حالت پایا زمانی بیش از چندین روز سپری شده است. معیار همگرایی سرعت میانگین بدنه شناور در نظر گرفته شده است که هنگام میل کردن به سمت عددی بسیار کروچک (در اینجا 10^{-4})، نشان می‌دهد که شناور به حالت پایا رسیده است. همچنین گام زمانی برابر با 0.0001 s انتخاب شده است که می‌توان بعد از رسیدن حل به حالت نیمه-پایا گام زمانی را با توجه به میدان حل بزرگ‌تر نیز کرد. در تحقیق حاضر، بزرگ‌ترین گام زمانی که موجب واگرا شدن حل نمی‌شد، 0.001 s به دست آمده است. لایه مرزی با 10 زیرلایه در اطراف شناور ایجاد شده‌اند و مقدار y^+ در محدوده کمتر از 60 نگه داشته می‌شود تا حل از دقت مناسبی برخوردار باشد.

3- نتایج و بحث

3-1- شناور بدون پله

جهت بررسی استقلال حل از مش، نتایج در چهار مش‌بندی از درشت تا ریز برای یک سرعت مشخص (4.531 m/s) به دست آمده‌اند. نمودار تغییرات مقدار مقاومت به دست آمده، درصد تریم و سینکیج میانگین در مش‌های مختلف در مقایسه با نتایج آزمایشگاه‌های کریزو[5] و هِرمی[6] مربوط به مرجع [17] و در سرعت 4.531 m/s در جدول 3 خلاصه شده‌اند.

به دلیل استفاده از مدل شش درجه آزادی در کوپل میدان حل سیال و حرکت جسم صلب، جهت پایدار کردن حل از ضرایب زیرتخفیفی در ماتریس حرکتی جسم استفاده می‌شود که رابطه‌ای تقریباً سهموی با اندازه مش دارد. به عبارتی با ریزتر کردن مش، در ابتدا تا حدی از پایداری حل کاسته می‌شود

[1] Hexahedral
[2] Tetrahedral
[3] Spring-based
[4] Ansys Fluent V.16
[5] KRISO
[6] HRMI

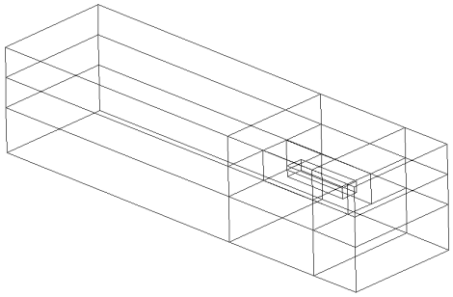

Fig. 3 Division of the computational domain

شکل 3 تقسیم بندی میدان حل

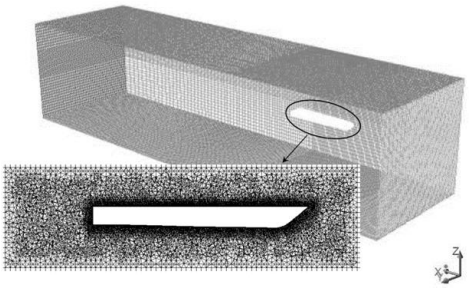

Fig. 4 A view of the domain mesh

شکل 4 نمایی از مش میدان حل

جدول 3 استقلال حل از مش

Table 3 mesh independency of solutions

MS %	*Tr* %	*R* (kgF)		
-0.85	3.6	4.71	HRMI	کار آزمایشگاهی [17]
-0.74	2.87	4.53	KRISO	
MS %	*Tr* %	*R* (kgF)	تعداد مش (میلیون)	
-0.86	3.26	4.56	1.25	پژوهش حاضر
-0.84	3.15	4.57	1.56	
-0.84	3.12	4.54	3.98	
-0.82	3.10	4.53	5.38	

R: مقاومت بدنه، % *Tr*: درصد تریم، % *MS*: درصد سینکیج میانگین

و از یک اندازه مش به بعد این پایداری افزایش می‌یابد. لذا برای داشتن دقت مناسبی از حل و همچنین رعایت هزینه‌های محاسباتی تعداد مش 3981776 (حالت 3) به عنوان تعداد مش مناسب برای انجام محاسبات شناور بدون پله انتخاب شده است.

3-1-1- تأثیر سرعت بر مقاومت ایجاد شده

همواره یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر افزایش سرعت شناورهای تندرو، ایجاد مقاومت در برابر حرکت شناور به خصوص در سرعت‌های بالا است که منجر به نیازمندی به قدرت بیشتر برای افزایش سرعت می‌شود. همچنین گاهی نیز ممکن است منجر به ایجاد پورپویزینگ در شناور و غرق شدن آن شود. لذا همواره نیاز است که رفتار هیدوردینامیکی هر سازه و هندسه خاصی از شناورهای تندرو با تغییر سرعت، مورد مطالعه قرار گیرد.

نمودار تغییرات مقاومت شناور مورد مطالعه در تحقیق حاضر بر حسب سرعت در شکل 5 و در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش سرعت شناور، مقاومت آن نیز به صورت خطی و با نسبت تقریباً یک به یک افزایش می‌یابد. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که بیشینه خطای بین نتایج در حدود 7 درصد و در سرعت‌های بالا است. در سرعت‌های پایین‌تر، تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

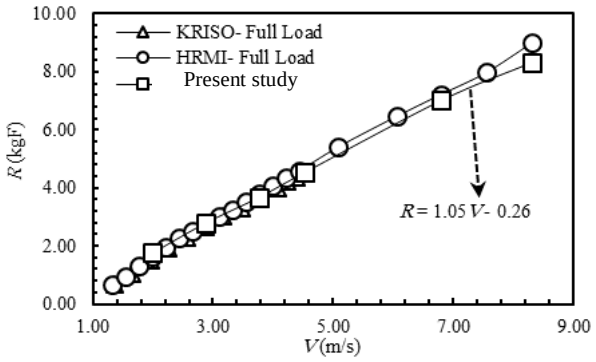

Fig. 5 Resistance vs. velocity diagram

شکل 5 نمودار تغییرات مقاومت شناور بر حسب سرعت

شبیه سازی حاصل به خوبی روند تغییر مقاومت با سرعت را پیش‌بینی کرده است.

3-1-2- تأثیر سرعت بر درصد تریم ایجاد شده

پارامتر مهم دیگر در مطالعه هیدرودینامیک شناورهای تندرو، زاویه تریم یا به تعبیر دیگر درصد تریم شناور است. با فرض حرکت شناور با دو درجه آزادی و استفاده از مش‌های دینامیکی، نتایج حاصل از حرکت شناور از حالت استاتیکی تا رسیدن به حالت پایا در سرعت‌های مختلف به دست آمده است و نمودار درصد تریم بر حسب سرعت در شکل 6 نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود برای سرعت‌های کمتر از حدود 3 m/s، تغییرات درصد تریم، با شیب تند و به صورت خطی است؛ این در حالی است که بعد از این سرعت، تغییرات با شیب بسیار کم‌تری تغییر می‌کند و عملاً مقدار درصد تریم مستقل از سرعت شناور می‌شود. لازم به توضیح است که بین نتایج آزمایشگاهی کریزو و هرمی اختلاف زیادی وجود دارد و در سرعت‌های بین 4-5 m/s، اختلافی در حدود 25 ٪ بین نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. همچنین نتایج کریزو برای سرعت‌های بیش از 4.531 m/s گزارش نشده است. مقادیر نتایج عددی حاصل در بین این دو گزارش آزمایشگاهی قرار گرفته است و روند تغییرات درصد تریم بر حسب سرعت را به خوبی پیش بینی کرده است. البته عواملی هم‌چون مقاومت ایجاد شده در تریم‌سنج، خطای انسانی، تعداد مش‌ها و شرایط آزمایشگاهی می‌توانند تأثیر مستقیمی روی نتایج حاصله داشته باشند.

3-1-3- تأثیر سرعت بر درصد سینکیج ایجاد شده

میزان عمق نفوذ شناورهای تندرو به هنگام رسیدن به حالت پروازی نیز، یکی دیگر از پارامترهای مهمی است که در مطالعه هیدرودینامیک شناورهای تندرو نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند. نمودار تغییرات درصد سینکیج میانگین بر حسب سرعت در شکل 7 آمده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت، مقدار درصد سینکج نیز کاهش می‌یابد.

با دقت به این نقطه که در مرجع [17] درفت روبه پایین شناور به صورت قراردادی مثبت فرض شده است، لذا درصد سینکیج میانگین منفی به معنی حرکت شناور به طرف بالا و به سمت سطح آزاد آب است. به عبارت دیگر، می‌توان دریافت با افزایش سرعت، قسمت بیشتری از شناور به نزدیکی سطح آب می‌رسد. در سرعت‌های کم‌تر از حدود 2 m/s نیز، شناور مقدار بیشتری در آب نفوذ می‌کند. با میان‌یابی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که رابطه‌ای مرتبه دو بین تغییرات درصد سینکیج میانگین و سرعت وجود دارد.

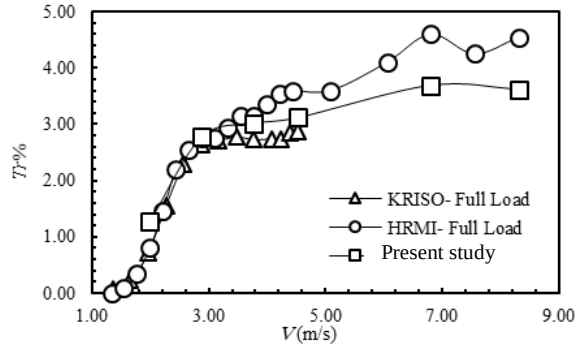

Fig. 6 Trim percent vs. velocity diagram

شکل 6 نمودار تغییرات درصد تریم بر حسب سرعت

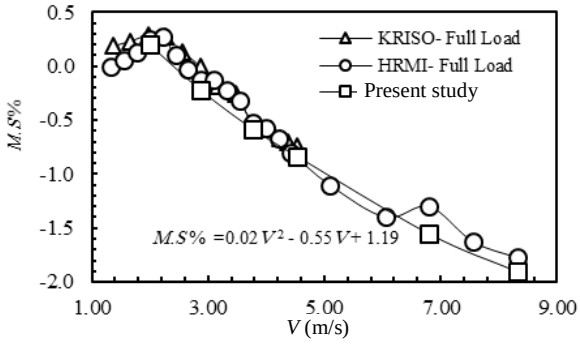

Fig. 7 Mean sinkage percent vs. velocity diagram

شکل 7 نمودار تغییرات درصد سینکیج میانگین بر حسب سرعت

3-1-4- پروفیل وِیک پشت شناور

هندسه و طراحی شناورهای تندرو همواره به سمتی می‌رود که سرعت‌های بالاتر حرکتی میسر شوند. این در حالی است که پایداری بیش‌تر نیز یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها به هنگام رسیدن به سرعت‌های بالاتر است. شناورهای تندرو به هنگام حرکت درون یک سیال نیوتنی چون آب، وِیکی در پشت خود ایجاد می‌کنند که دامنه آن با افزایش سرعت بیش‌تر می‌شود و بر حسب نوع بدنه انتخابی شناور، عمق آن متفاوت می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی عددی برای شناور حاضر نشان می‌دهد که طول وِیک ایجاد شده پشت شناور با افزایش سرعت آن، کشیده می‌شود. همان طور که در شکل 8 برای سرعت‌های مختلف نمایش داده شده است، با افزایش سرعت خطی شناور، ویک ایجاد شده در پشت آن کشیده شده ولی عرض آن کاهش می‌یابد؛ به عبارتی آبی که در پشت شناور جت می‌شود، سرعت بیشتری به خود می‌گیرد و در یک راستا و در طول خط مرکزی شناور متمرکز می‌شود.

3-1-5- الگوی موج‌های اطراف شناور

در شکل 9 الگوی کلی موج ایجاد شده در پشت شناور و درون آب بر اثر حرکت شناور تندرو نمایش داده شده است. مشاهده می شود که همانند آنچه قبلاً شرح داده شد، طول موج‌های ایجاد شده در پشت شناور با افزایش سرعت آن بیشتر می شوند و به بخش‌های دیگر نیز سرایت می کنند. موج به شکل حرف وی لاتین در پشت شناور ایجاد می شود در سرعت‌های پایین‌تر پهن‌تر و کوتاه‌تر است و با بیش‌تر شدن سرعت باریک‌تر و طویل‌تر می‌شود. چرا که موج‌های با طول موج‌های بلندتر، دیرتر مستهلک می‌شوند.

3-1-6- سطح خیس در کف شناور در سرعت‌های مختلف

در شکل 10 سطح خیس کف شناور در سرعت‌های مختلف نمایش داده شده

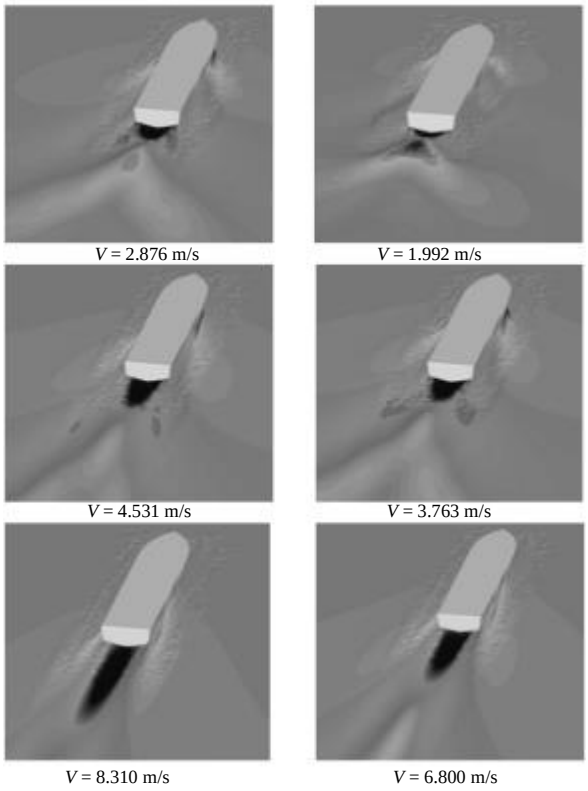

Fig. 8 Depth of created wake profile at the rear of the high speed hull in at different velocities

شکل 8 عمق پروفیل وِیک ایجاد شده پشت شناور تندرو در سرعت‌های مختلف

است. مشاهده می‌شود با افزایش سرعت، سطح خیس کف شناور به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که این امر منجر به کاهش چشمگیر نیروی درگ و در نتیجه افزایش سرعت شناور و رسیدن به حالت پروازی می‌شود. در این حالت قسمت اعظم شناور در بیرون از آب قرار می‌گیرد.

3-2- شناور دارای پله

در این قسمت به بررسی تأثیر اضافه کردن پله بر پایداری شناور و مشخصه‌های هیدرودینامیکی آن پرداخته می‌شود. هدف اصلی رسیدن به بدنه‌ای بدون پورپویز و سطح خیس کم‌تردر حالت پروازی است که نتیجه آن کاهش درگ و در نتیجه افزایش بازده شناور می‌باشد.

برای بررسی تأثیر پله بر شناور چند حالت مختلف از هندسه و تعداد پله‌ها با توجه به هندسه شناور در نظر گرفته شده است. جدول 4 مشخصات این حالت‌ها را نمایش می‌دهد. همچنین نمای از جانب این حالت‌ها هم در شکل 11 نمایش داده شده است.

لازم به ذکر است که جهت بررسی استقلال حل از مش برای هر حالت مورد بررسی، چهار اندازه مش از درشت تا ریز در سرعت 6.3 m/s بررسی شدند تا اندازه‌ای از مش به دست آید که مستقل از حل باشد.

جهت بررسی پایداری شناور بعد از اعمال پله، تغییرات درجات آزادی (هیو و تریم) و مقدار مقاومت بر حسب زمان معیارهای مناسبی خواهند بود. لذا نمودارهای تغییرات سینکیج، زاویه تریم و مقاومت حالت‌های مورد بررسی مختلف بعد از گذشت زمان مشخصی از حل (حدود یک ثانیه از زمان جریان) به ترتیب در شکل‌های 12 تا 14 آمده‌اند.

با مقایسه دامنه تغییرات هر حالت در محدوده کوچک‌تری از زمان نهایی، مشاهده می‌شود که نوسان‌های حالت 1 و حالت 3 نسبت به شناور بدون پله

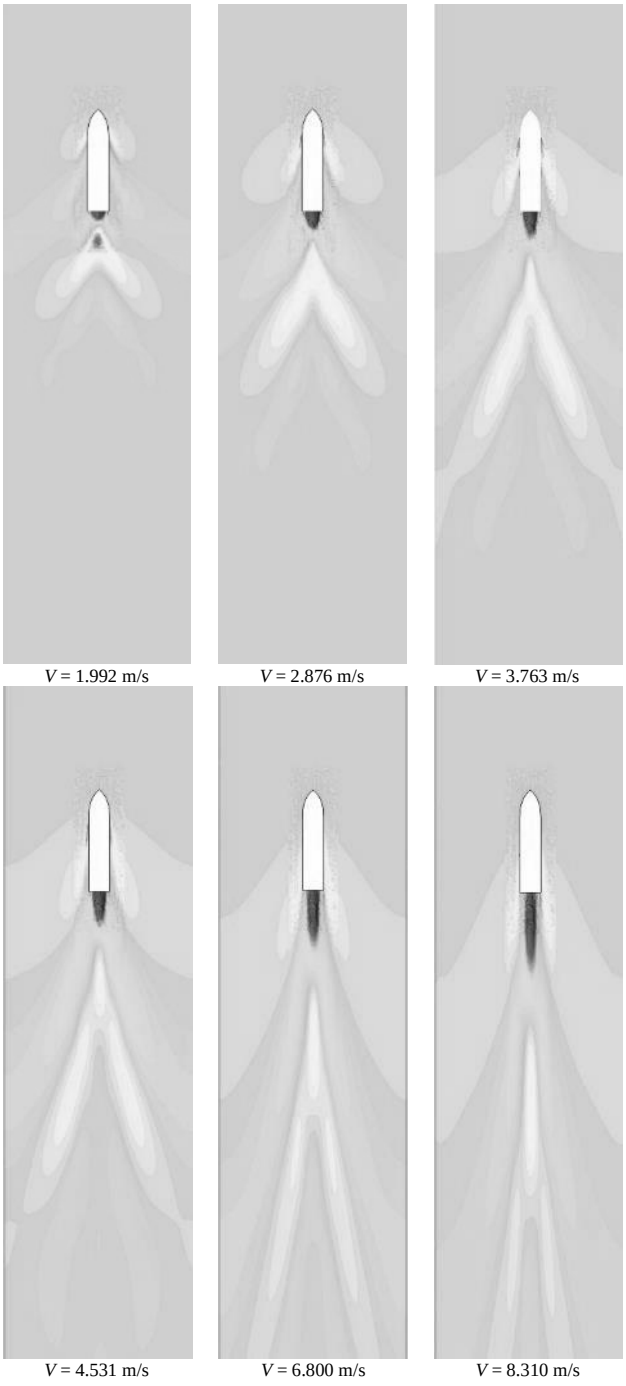

Fig. 9 Wake profile around the high speed hull at different velocities

شکل 9 پروفیل موج ایجاد شده اطراف شناور تندرو در سرعت‌های مختلف

بسیار زیاد است و این نشان دهنده عدم پایداری بدنه ایجاد شده و رخ دادن پدیده پورپویزینگ است. اما نوسان‌های حالت‌های 2 و 4 نسبت به وضعیت بدون پله در حد بسیار پایینی قرار دارد و عملاً در این بازه زمانی از حل، کاملاً همگرا شده و پایداری خود را کاملاً حفظ می‌کنند، لذا حالت‌های 1 و 3 را به دلیل پورپویزینگ نمی‌توان بیش از این بررسی کرد.

حالت‌های 2 و 4 یکی از اهداف اصلی را که عدم ایجاد پورپویز در اثر افزودن پله است را ارضا می‌کنند. اما هدف دیگر کاهش نیروی درگ (مقاومت کل) در اثر افزودن پله در سرعت‌های بالا است که با توجه به نمودار شکل 14 مشاهده می‌شود که مقاومت کل حاصل شده در حالت 1 (یک پله 0.8 m)

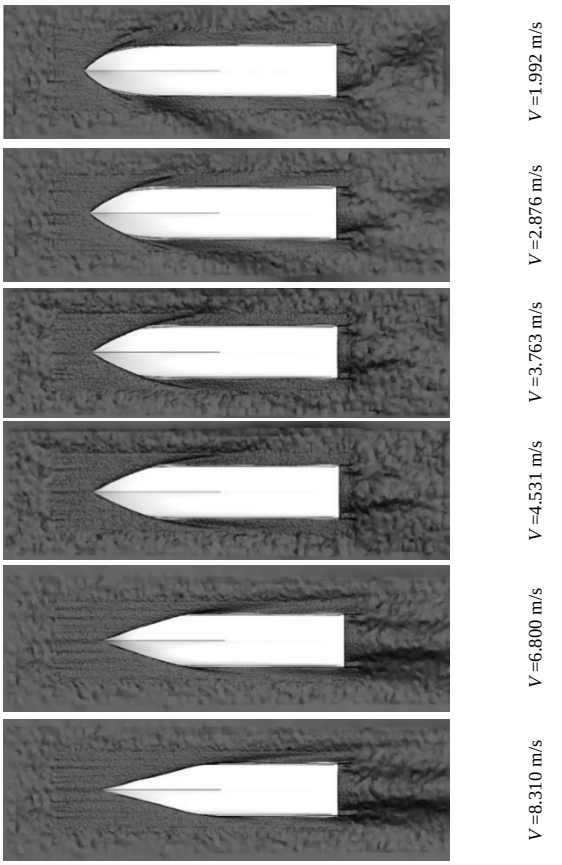

Fig. 10 Wet surface of the planning hull at different velocities

شکل 10 سطح خیس کفِ شناور تندرو در سرعت‌های مختلف

جدول 4 مشخصات پله‌های اعمال شده به بدنه شناور

Table 4 Characteristics of applied steps to the hull

حالت	تعداد پله	طول پله (m)	ارتفاع پله (mm)	تعداد مش (در استقلال از مش)
1	یک	0.5	20	6784521
2	یک	0.8	20	6893490
3	دو	0.225	40	7018457
		0.675	20	
4	دو	0.45	40	7234501
		0.45	20	

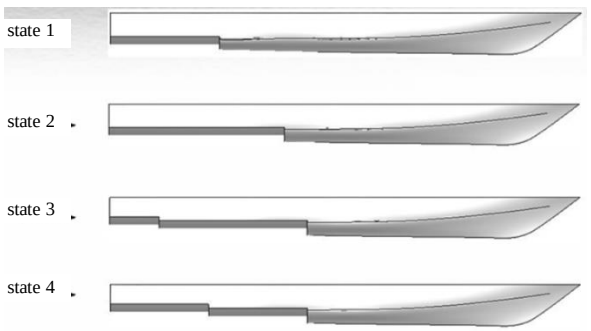

Fig. 11 Side view of planning hulls with steps

شکل 11 نمای از جانب شناورها با اعمال پله

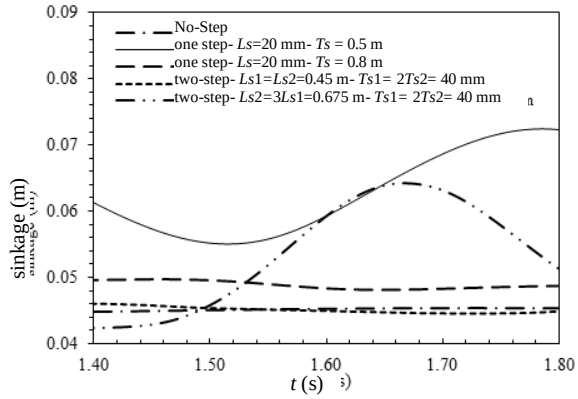

Fig. 12 Mean sinkage vs. time for different states in V = 8.310 m/s

شکل 12 نمودار تغییرات سینکیج بر حسب زمان برای حالت‌های مختلف در سرعت 8.310 m/s

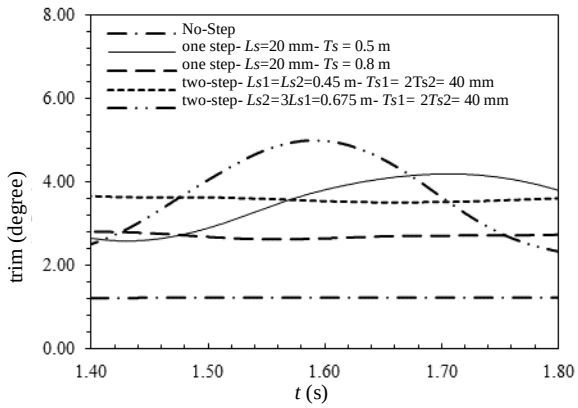

Fig. 13 Trim vs. time for different states in V = 8.310 m/s

شکل 13 نمودار تغییرات زاویه تریم بر حسب زمان برای حالت‌های مختلف در سرعت 8.310 m/s

بیشتر شده است، لذا این حالت نمی‌تواند طراحی بهینه‌ای باشد. اما حالت 4 همان طور که توضیح داده شد پورپویز ندارد و از طرفی هم طبق نمودار شکل 14 کاهش مشهودی در مقدار مقاومت تولید شده مشاهده می‌شود. لذا می‌توان این حالت را به عنوان بهینه‌ترین حالت در بین 4 حالت مورد بررسی انتخاب کرد.

شکل 15 سطح خیس ایجاد شده در زیر بدنه شناور را در حالت‌های 2 و 4 در مقایسه با حالت بدون پله و در سرعت رو به جلوی شناور 8.310 m/s نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که در حالت 4، سطح خیس زیر شناور به طور چشم‌گیری کاهش پیدا کرده است. این مقادیر برای سه حالت مختلف در جدول 5 آمده است. مکش هوا در پله اول باعث می‌شود آب از این قسمت بیرون رانده شده و وارد پله دوم شود، اما همان طور که مشاهده می‌شود فقط در دو گوشه کناری پله دوم آب سطح را خیس کرده است. سپس آب در قسمتی از باقی بدنه شناور که درون آب قرار دارد اثر می‌کند و قسمت عمده‌ای از بار شناور توسط این قسمت تحمل می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

در کار حاضر، رفتار هیدرودینامیکی و ایرودینامیکی یک شناور تندرو با در نظر گرفتن دو درجه آزادی حرکتی مورد مطالعه قرار گرفتند که مقایسه نتایج حاصل با کارهای آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل مورد استفاده به خوبی می‌تواند رفتار مقاومتی و جابه‌جایی شناور را پیش بینی کند. هم چنین جهت بررسی تأثیر اعمال پله بر کاهش مقاومت بدنه قایق، چند حالت مختلف

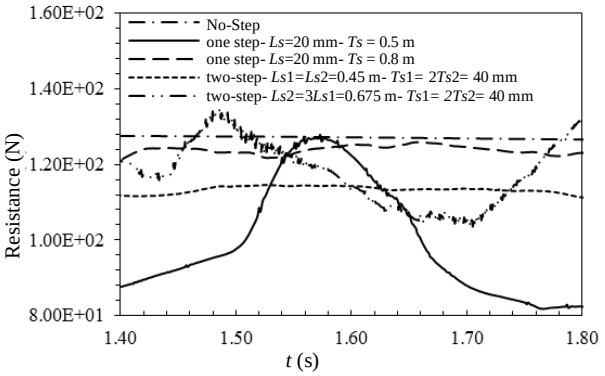

Fig. 14 Resistance vs. time for different states in V = 8.310 m/s

شکل 14 نمودار تغییرات مقاومت بر حسب زمان برای حالت‌های مختلف در سرعت 8.310 m/s

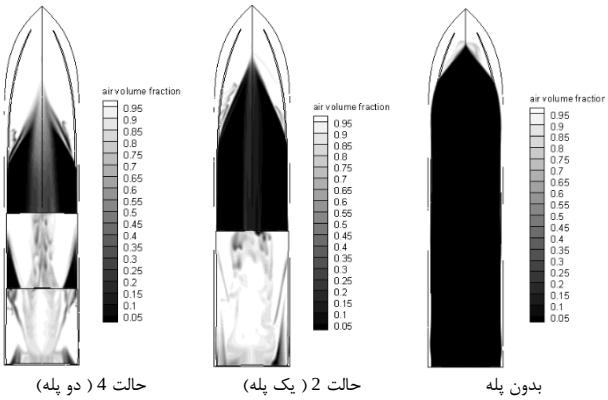

Fig. 15 Wet surface contours for different states in V = 8.310 m/s

شکل 15 کانتورهای سطح خیس برای حالت‌های مختلف در سرعت 8.310 m/s

جدول 5 مقایسه حالت‌های 2 و 4 با شناور بدون پله

Table 5 Comparison of states 2 and 4 with no-step hull

حالت		حالت 2	حالت 4
مقاومت (N)		123.74	109.83
زاویه تریم (درجه)		2.74	3.96
درفت (mm)		44.40	43.79
مکان LCP	x (mm)	14.15	7.29
	y (mm)	2.22	0.67
تغییر نسبت به حالت بدون پله	مقاومت	٪1.95	**٪−11.24**
	زاویه تریم	٪ 126.45	٪ 227.27
	درفت	٪ 11.45	٪ 9.88

انتخاب و شبیه سازی بر روی آن ها انجام گرفته است.

از میان حالت‌های مورد بررسی، تغییرات سینکیج، تریم و مقاومت حالات 2 و 4 نسبت به حالت بدون پله بسیار کم است که نشان‌دهنده پایداری آن‌ها و عدم پورپویز است. در حالی که در حالت‌های 1 و 3 نوسان‌های این پارامترها بسیار فاحش و نشان‌دهنده پورپویزینگ است. همچنین محل میانگین مرکز فشار در این دو حالت بسیار نزدیک به مرکز جرم است که این خود نیز دلیلی بر پایداری حل و عدم پورپویز است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت دو پله، 11.24 ٪ کاهش درگ نسبت به حالت بدون پله وجود دارد. لذا در بین حالات مورد بررسی این حالت بهینه‌ترین انتخاب می‌تواند باشد.

از مزایای استفاده از پله می‌توان به کاهش درگ، توانایی کنترل پیچ در حال حرکت شناور و مقاومت بهتر به پورپویزینگ اشاره کرد. اما استفاده از

پله روی بدنه یک شناور نیاز به بررسی زیاد جهت رسیدن به طراحی درست دارد و شناور با پله درگ بیشتری در سرعت‌های پایین (حالت جابه‌جایی) ایجاد می‌کند. در حالتی که شناور دارای پله است، نسبت ابعادی سطح خیس بیشتر می‌شود. به عبارتی نیروی لیفت را به ازای هر واحد سطح افزایش می‌دهد، لذا سطح خیس کم‌تری تولید می‌شود که نتیجه آن کاهش درگ است.

5- فهرست علائم

b	پهنای شناور (m)
$CD_{k\omega}$	قسمت مثبت پخش عرضی در معادله انتقال ω
F	بردار نیرو (N)
F_1, F_2, F_3, F_4	توابع کمکی در مدل توربولانسی
g	شتاب گرانشی (ms^{-2})
I_{yy}	ممان اینرسی در راستای y (kgm^2)
k	انرژی سینتیک توربولانسی (m^2s^{-2})
L	طول شناور (m)
m	جرم (kg)
p	فشار (Pa)
P_k	تولید انرژی سینتیک توربولانسی
t	زمان (s)
V	سرعت شناور (ms^{-1})
$\dot{V}$	شتاب جابه‌جایی مرکز گرانش جسم صلب (ms^{-2})
y	فاصله از دیواره (m)

علائم یونانی

α	کسر حجمی
β	ضریب مدل توربولانسی
β^*	ضریب مدل توربولانسی
μ	لزجت دینامیکی (Pas)
ν	لزجت سینماتیکی (m^2S)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ_k	ثابت توربولانسی
σ_ω	ثابت توربولانسی
ω	نرخ پخش ویژه (s^{-1})، سرعت زاویه‌ای ($rads^{-1}$)
$\dot{\omega}$	شتاب زاویه‌ای جسم صلب ($rads^{-2}$)
∇	عملگر نابلا

زیرنویس‌ها

a	هوا
G	مرکز گرانش جسم صلب
w	آب
B	مربوط به جسم صلب

6- مراجع

[1] R. Marshall, *All About Powerboats: Understanding Design and Performance*, pp. 47-68, United States of America: International Marine (McGraw-Hill), 2002..

[2] D. Savitsky, Hydrodynamic analysis of planing hulls, *MarineTechnology*, Vol. 1, No. 1, pp. 71–95, 1964.

[3] L. J. Doctors, Representation of three-dimensional planing surface by finite el- ements, in *First international conference on numerical ship hydrodynamics*, Gaithersburg, MD, USA, 1975.

[4] H. Ghassemi, M. Ghiasi, A combined method for the hydrodynamic characteristics of planing crafts, *Ocean Engineering*, Vol. 35, No. 3-4, pp. 310-322, 2008..

[5] G. Hassan, Y.-m. Su, Determining the hydrodynamic forces on a planing hull in steady motion, *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 7, No. 3, pp. 147-156, 2008.

[6] A. Reza Kohansal, H. Ghassemi, A numerical modeling of hydrodynamic characteristics of various planing hull forms, *Ocean Engineering*, Vol. 37, No. 5–6, pp. 498-510, 2010.

[7] M. Caponnetto, Practical CFD simulations for planing hulls, in *Process of Second International EuroConference on High Performance Marine Vehicles, HIPER'01*, Hamburg, Germany, pp. 128-138, 2001.

[8] M. Caponnetto, H. Söding, R. Azcueta, Motion Simulations for Planing Boats in Waves, *Ship Technology Research*, Vol. 50, No. 4, pp. 182-198, 2003.

[9] R. Panahi, E. Jahanbakhsh, M. S. Seif, Towards simulation of 3D nonlinear high-speed vessels motion, *Ocean Engineering*, Vol. 36, No. 3-4, pp. 256-265, 2009.

[10] M. S. Seif, E. Jahanbakhsh, R. Panahi, M. H. Karimi, A Unified Computational Method for Simulating Dynamic Behavior of Planing Vessels, pp. 1-3, *China Ocean Engineering*, 2009.

[11] E. Jahanbakhsh, R. Panahi, M. S. Seif, Catamaran Motion Simulation Based on Moving Grid Technique, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 128-136, 2009.

[12] V. A. Subramanian, P. V. V. Subramanyam, N. S. Ali, Pressure and drag influences due to tunnels in high-speed planing craft, *International Shipbuilding Progress*, Vol. 54, pp. 25-44, 2007.

[13] A.R. Yousefi, R. Shafaghat, M. Mohebbi, A. Ramiar, Drag reduction in a high-speed planing hull using tunnels, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 51-59, 2014 (in Persian فارسی)

[14] H. K. Versteeg, W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, pp. 273-304, England: Pearson Education Limited, 2007.

[15] C. E. Brennen, *Fundamentals of multiphase flow*, pp. 120-178, California: Cambridge University Press, 2003..

[16] F. R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry, Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model, in *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, USA, pp. 625-632, 2003.

[17] S.-I. Yang, M.-S. Shin, Y.-J. Park, K.-S. Min, J. S. Kim, H. Kim, S.-W. Hong, S.-H. Lee, Y.-G. Lee, J. H. Chung, H. H. Chun, The prediction of resistance of a 23m class planning hull, *Journal of Hydrospace Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 68-79, 1996.