ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

## حسن قوشچی<sup>1</sup>، محمدرضا انصاری<sup>2\*</sup>، رضا آزادی<sup>3</sup>

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی معماری کشتی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرکس ، تهران

3- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستى mra\_1330@modares.ac.ir، 143-14115

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 17 آبان 1395 پذیرش: 24 دی 1395 ادائه در سایت: 25 بعمن 1395	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
ارد اور شید او چهنان و دور کلید واژگان:	— جسم صلب با معادلات حاکم بر سیال کوپل شدهاند. با توجه به نتایج آزمایشگاهی موجود، شبیه سازی شناور تندروی هدف در محدوده سرعت
شناور تندرو	خطی 8.31 m/s انجام شده است. مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود، نشان میدهد که بیشینه خطای میانگین حاصل برای
جریان دوفازی	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
درجه أزادى	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
پله	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 شداند بتایج نشاند مدیر که با اعدال بایده قالتر تندیم مدیر نظر مرتبان تا 11% مقامت برند با کاهشد داد

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

## Hassan Ghoshchi<sup>1</sup>, Mohammad Reza Ansari<sup>2\*</sup>, Reza Azadi<sup>2</sup>

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	ABSTRACT
Original Research Paper Received 07 December 2016 Accepted 13 January 2016 Available Online 13 February 2017	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
<i>Keywords:</i> High speed hull two-phase flow degree of freedom step	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

شناور در راستای عمود بر بدنه ایجاد می شود، زاویه تریم و خود این حرکت به اصطلاح پیچ<sup>۲</sup> نامیده میشوند. مقدار جابهجایی عمودی مرکز گرانش شناور را سينكِيج مينامند. پورپويزينگ به صورت نوسان های ترکیبی یک قایق در پیچ و هیو، زمانی که قایق در حال

امروزه از شناورهای تندور برای اهداف مختلف نظامی، تفریحی و نقل و انتقال استفاده می شود، لذا تحلیل دقیق رفتار بدنه شناور در هنگام حرکت، نقش مهمی در بهینهسازی حرکت و بالا بردن اطمینان در عملکرد آنها در شرايط مختلف دارد. طراحی ساختار بدنه اين نوع شناورها به دليل تأثير مستقيم آنها بر وزن، هزينه و بار قابل جابهجايي بسيار حائز اهميت است. زاویه ایجاد شده بین افق و محور مرکزی قایق که در اثر حرکت زاویهای

<sup>1</sup> Trim <sup>2</sup> Pitch

- 3 Sinkage
- <sup>4</sup> Draft <sup>5</sup> Heave
- <sup>6</sup> Porpoising

#### Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پرواز ا روی سطح آب است، تعریف می شود. 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 می شود، 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 كلى شناورهاى تندرو داراى سه مُد حركتى هستند [1]: جابهجايى، گذار و یروازی. در مد جابهجایی، جهت رسیدن به سرعت بالاتر، قدرت موتور بیشتری نیاز است. در مد گذار، شناور از مد جابهجایی به پروازی گذر می کند و مقدار عدد فرود کمتر از 0.85 باقی می ماند. همانند مد جابه جایی، تریم شناور، سطح خیس و درگ، همگی در این مد افزایش می یابند. اما با گذر شناور به سمت مد پروازی، نیروهای هیدرودینامیکی تولید شده توسط

قسمت درون آب شناور، آن را به سمت سطح آب هدایت می کند و در نتیجه باعث حرکت سریعتر شناور می شود. در مد پروازی، نیروهای شناوری و لیفت هیدرودینامیکی به ترتیب در حدود 5٪ و 95٪ از وزن شناور را تحمل می کنند. در این مد حرکتی، جریان اطراف شناور دوفازی می شود 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 سيالات محاسباتي<sup>2</sup> 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<sup>7</sup> 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 مى كند. جريان اطراف شناور توسط المان هاى 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 می آید. از آنجایی که المان های 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 نمی تواند 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 (درجه آزادی صفر) برای این امر استفاده کردند. برای هر سرعت، سه زاویه تریم و سه سینکیج به کار رفت. برای ^مالتهای دیگر، نتایج برای یک نیروی لیفت مشخص و طول مرکز فشار معین، نسبت به حالت تعادل شناور، برازش شدهاند. تعادل زمانی بر قرار می شود که لیفت با وزن شناور برابر شود و مرکز فشار روی مرکز گرانش نیفتد. آن ها نتایج خود را با روابط آزمایشگاهی سویتسکی 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<sup>5</sup> برای کوپل سرعت و فشار استفاده کردند و هیدرودینامیک دو نوع متفاوت از شناور را شبیه سازی 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 نوملز-نومریک<sup>۷</sup> استفاده کردند که توسط سيف و همكاران [10] گسترش يافته و بهينه شده است. اين كد می تواند 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 اخيراً 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 شبیه سازی عددی شناور تندروی پروازی است.

سابرامانیان و همکارانش [12] از یک کد بر پایه روش حجم محدود^ برای شبیه سازی 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 می کند، که به دنبال آن تریم و سینکیج شناور تا رسیدن به یک حالت تعادلی تغییر می کند. این روند تا رسیدن به تعادل کامل ادامه می یابد. 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 می شود. اما در حالت پروازی اِعمال تونل موجب افزایش مقاومت روی شناور مىشود.

<sup>1</sup> Planing

Computational Fluid Dynamics <sup>3</sup> Regression

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> COMET

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> LCP 6 Partial step

NUMELS-NUMERIC

<sup>8</sup> 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 ییچیدگیهای آن به ندرت در کارهای پیشین انجام گرفته مشاهده شده است. همچنین برای اصلاح مشها در هر گام زمانی از روش قدرتمند هموارسازی ( 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 m 23 m طول دارد. با توجه به اینکه بیشینه سرعت مورد بررسی در شناور مدل حاضر برابر با 8.31 m/s است، با برابر قرار دادن عدد فرود<sup>۲</sup> برای مدل حاضر و شناور اصلی، بیشینه سرعت مربوط به مدل واقعی در حدود 55 knot به دست میآید.

## 2- شبيه سازي عددي

### 1-2- معادلات حاكم

در یژوهش 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 زير تعريف مي شوند [14].

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

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

که در آن ها  $\mu$  ، $\rho$ ،V به ترتیب بردار سرعت، چگالی و لزجت دینامیکی هستند. لازم به ذکر است که به دلیل بزرگ بودن عدد وبر کرر شبیهسازیها، از تأثیر نیروی کشش سطحی صرف نظر شده است.

برای به دست آوردن هندسه مرز مشترک بین دو فاز از مدل حجم سيال<sup>†</sup> استفاده شده است كه معادله مربوط به آن به شكل زير است [15].

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

در این رابطه،  $\alpha$  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 a تعریف میشوند [15]. . (4

$$\rho(\alpha) = \alpha \rho_a + (1 - \alpha) \rho_w \tag{4}$$
$$\mu(\alpha) = \alpha \mu_a + (1 - \alpha) \mu_w \tag{5}$$

با توجه به مقدار عدد رينولدز هوا و آب، الكوى جريان آشفته است، لذا بايد از یک مدل توربولانسی مناسب جهت اعمال تأثیر آشفتگی بر جریان استفاده کرد. در پژوهش حاضر مدل توربولانسی SST k-w استفاده شده است که روابط مربوط به آن در زير آمده است [16].

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

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

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

Froude Weber

pressure outlet

#### مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1396، دورہ 17، شمارہ 2

حسن قوش<del>چ</del>ی و همکا*ر*ان

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

$$F_{1} = \tanh\left\{\left\{\min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^{*}\omega y}, \frac{500\nu}{y^{2}\omega}\right), \frac{4\sigma_{\omega_{2}}k}{CD_{k\omega}y^{2}}\right]\right\}^{4}\right\}$$
(10)

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

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

که در آن ضرایب ثابت  $\sigma_k$ ،  $\sigma_\omega$ ،  $\sigma_k$  و  $\alpha$  حاصل ترکیب ضرایب ثابت دو مدل و  $k-\omega$  و  $k-\omega$  هستند و از رابطه (13) محاسبه می شوند.  $k-\epsilon$  $\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1)$ (13)

که ضرایب مربوطه در جدول 1 آمده اند.

معادله حاكم براى حركت جابهجايي مركز گرانش براى سيستم مختصات اينرسي يک جسم صلب از رابطه (14) حاصل مي شود.

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

که در آن  $\dot{V}_{G}$  شتاب جابه جایی مرکز گرانش، m جرم و  $F_{G}$  بردار نیروی ناشی از حرکت مرکز گرانش است. شتاب زاویهای جسم،  $\dot{w}_B$ ، با استفاده از مختصات جسم از رابطه (15) محاسبه می شود.

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

که در آن L، تانسور اینرسی،  $M_B$  بردار مومنتوم جسم و  $\omega_B$  بردار سرعت زاویهای جسم جامد است. پس از به دست آمدن شتابهای زاویهای و جابهجایی از روابط (14) و (15)، با انتگرال گیری عددی، سرعتهای زاویهای و جابهجایی در محاسبات مش دینامیکی استفاده می شوند تا موقعیت شناور به روز شود.

#### 2-2- هندسه مسأله، شرايط مرزى و اوليه، مشزني

در شكل 1 مشخصات اصلى هندسي 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 ویک شناور به مرز خروجی اطمينان حاصل شود. همچنين براي داشتن عمق كافي از آب، فاصله بين كف 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<sup>°</sup> ورودی<sup>۵</sup> در نظر گرفته شده است. خروجی میدان، جایی است که جریان از میدان خارج میشود و فشار خروجی<sup><sup>8</sup> انتخاب شده است. بدنه شناور صلب در</sup> 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.

ول 1 صرایب نابت در معادلات اسفیحی [10]		آشفتگی [16]	در معادلات	ثابت	1 ضرایب	دول
--	--	-------------	------------	------	---------	-----

Table 1 Constant coeffic	ients in turbulence equations [16]
$\sigma_{k1} = 0.85$	$\sigma_{k2} = 1.0$
$\sigma_{\omega 1} = 0.5$	$\sigma_{\omega 2} = 0.856$
$\beta_1 = 0.075$	$\beta_2 = 0.0828$
$\alpha_1 = 0.55$	$\alpha_2 = 0.44$
$a_1 = 0.31$	$eta^*=0.09$

pressure inlet

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> VOF (Volume Of Fluid)





rear view

**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 اينرسي	پهنای شناور	جرم	طول مرکز گرانش	طول شناور
$I_{vv}$	b	М	LCG	Lpp
[kgm <sup>2</sup> ]	[m]	[kg]	[m]	[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<sup>۱</sup> استفاده شود تا کیفیت مناسبی از امواج به دست آید.

2- حرکت شناور به دلیل داشتن درجه آزادی منجر به تغییر شکل مشرهای اطراف شناور می شود، لذا باید مش اطراف شناور از نوع غیر ساختاری مثلثی تتراهدرال<sup>۲</sup> انتخاب شود تا مش زنی مجدد به روش فنر-پایه<sup>۳</sup> قابل انجام باشد. 3- برای جلوگیری از به هم خوردن مش های اطراف شناور در اثر مش زنی مجدد و حرکت آن، محدوده اطراف شناور درون یک باکس با ابعاد مشخص

قرار می گیرد که همراه با حرکت شناور حرکت می کند. در این صورت حرکت شناور به مشهای دیگر بیرون از این باکس (محدوده) درونی انتقال پیدا می کند.

لذا با توجه به توضيحات بالا، همان طور كه در شكل 3 نمايش داده شده است، ميدان حل به 12 حجم تقسيم شده است.

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

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<sup>4</sup> 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 <sup>+0</sup>1)، نشان می دهد که شناور به حالت پایا رسیده است. همچنین گام زمانی برابر با s 10000 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 نمی شد، s 1000 به دست آمده است. لایه مرزی با 10 زیرلایه در اطراف شناور ایجاد شدهاند و مقدار <sup>+</sup> ر در محدوده کمتر از 60 نگه داشته می شود تا حل از دقت مناسبی برخوردار باشد.

#### 3- نتايج و بحث

#### 1-3- شناور بدون پله

جهت بررسی استقلال حل از مش، نتایج در چهار مش بندی 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 مش های مختلف در مقایسه با نتایج آزمایشگاههای کریزو<sup>6</sup> و هرمی<sup>7</sup> 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 زیر تخفیفی در ماتریس حرکتی جسم استفاده می شود که رابطهای تقریباً سهموی با اندازه مش دارد. به عبارتی با ریزتر کردن مش، در ابتدا تا حدی از پایداری حل کاسته می شود

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Hexahedral

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Tetrahedral

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Spring-based

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Ansys Fluent V.16

<sup>5</sup> KRISC

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> 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 r	nesh inde	ependency o	f solutions	
MS %	Tr %	R (kgF)		
-0.85	3.6	4.71	HRMI	کار آزمایشگاهی
-0.74	2.87	4.53	KRISO	[17]
MS %	Tr %	R (kgF)	تعداد مش (میلیون)	
-0.86	3.26	4.56	1.25	
-0.84	3.15	4.57	1.56	پژوهش حاضر
-0.84	3.12	4.54	3.98	
-0.82	3.10	4.53	5.38	

R: مقاومت بدنه، % Tr: درصد تريم، % MS: درصد سينكيج ميانگين

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.

#### 1-1-3 تأثير سرعت بر مقاومت ايجاد 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 پایین تر، تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده میشود، می



Fig. 5 Resistance vs. velocity diagram

شكل 5 نمودار تغييرات مقاومت شناور بر حسب سرعت

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

#### 2-1-3- تأثير سرعت بر درصد تريم ايجاد شده

یارامتر 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 می شود 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 تريم مستقل از سرعت شناور مىشود. لازم به توضيح است كه بين نتايج آزمایشگاهی کریزو و هرمی اختلاف زیادی وجود دارد و در سرعتهای بین m/s -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 كرده است. البته عواملي هم چون مقاومت ايجاد شده در تريم سنج، خطاي انسانی، تعداد مشها و شرایط آزمایشگاهی میتوانند تأثیر مستقیمی روی نتايج حاصله داشته باشند.

#### 3–1–3– تأثير سرعت بر درصد سينكيج ايجاد 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 می کند. 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 2m/s نیز، شناور مقدار بیشتری در آب نفوذ میکند. با میانیابی بین نتایج حاصل از شبیه سازی، مشاهده می شود که رابطه ای مرتبه دو بین تغییرات درصد سینکیج میانگین و سرعت وجود دارد.





**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

#### 4-1-3 پروفیل ویک پشت شناور

هندسه و طراحی شناورهای تندرو همواره به سمتی میرود که سرعتهای بالاتر حرکتی میسر شوند. این در حالی است که پایداری بیش تر نیز یکی از اصلی ترین چالش ها به هنگام رسیدن به سرعتهای بالاتر است. شناورهای تندرو به هنگام حرکت درون یک سیال نیوتنی چون آب، وِیکی در پشت خود ایجاد می کنند که دامنه آن با افزایش سرعت بیش تر میشود و بر حسب نوع بدنه انتخابی شناور، عمق آن متفاوت می باشد. نتایج شبیه سازی عددی برای شناور حاضر نشان می دهد که طول وِیک ایجاد شده پشت شناور با افزایش سرعت آن، کشیده می شود. 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 می یابد؛ به عبارتی آبی که در پشت شناور جت می شود، سرعت بیشتری به خود می گیرد و در یک راستا و در طول خط مرکزی شناور متمرکز می شود.

#### 5-1-3- 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 پایین تر پهن تر و کوتاه تر است و با بیش تر شدن سرعت باریک تر و طویل تر می شود. چرا که موجهای با طول موجهای بلندتر، دیر تر مستهلک می شوند.

#### 6-1-3- 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 کم تردر حالت پروازی است که نتیجه آن کاهش درگ و در نتیجه افزایش بازده شناور می باشد.

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 سینکیچ، 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 کوچک تری 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 می کنند، لذا حالتهای 1 و 3 را به دلیل پورپویزینگ نمی توان 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 می شود که مقاومت کل حاصل شده در حالت 1 (یک پله ۵.8m)



Fig. 10 Wet surface of the planning hull at different velocities شكل 10 سطح خيس كفِ شناور تندرو در سرعتهای مختلف

شناور	بدنه	به	شدہ	اعمال	پلەھاى	مشخصات	4	جدول
-------	------	----	-----	-------	--------	--------	---	------

V = 1.992 m/s

V = 2.876 m/s

V = 3.763 m/s

V = 4.531 m/s

V = 6.800 m/s

V = 8.310 m/s

Table 4 Characteristi	cs of applied ste	ps to the hull		
ت <b>ع</b> داد مش (در استقلال از مش)	ارتفاع پله (mm)	طول پله (m)	تعداد پله	حالت
6784521	20	0.5	یک	1
6893490	20	0.8	یک	2
7010457	40	0.225		2
/018457	20	0.675	دو	3
7024501	40	0.45		4
/234501	20	0.45	دو	4







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

بدون پله	با شناور	2 و 4	حالتهای	مقايسه	جدول 5

11	10-step hull	2 and 4 with n	arison of states 2	Table 5 Compa
حالت			<b>ح</b> الت 2	حالت 4
مقاومت (N)			123.74	109.83
زاويه تريم (درجه)			2.74	3.96
درفت (mm)			44.40	43.79
مکان LCP		x (mm) y (mm)	14.15 2.22	7.29 0.67
		مقاومت	7.1.95	'/11.24
تغيير نسبت به حالت	ت بدون پله	زاويه تريم	7. 126.45	'/. 227.27
		درفت	7. 11.45	7. 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 نشان دهنده پایداری آنها و عدم پورپویز است. در حالی که در حالتهای 1 و 3 نوسانهای این پارامترها بسیار فاحش و نشان دهنده 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 می شود در حالت دو پله، 11.24 ٪ کاهش درگ بت به حالت بدون پله وجود دارد. لذا در بین حالات مورد بررسی این حالت بهينهترين انتخاب مي تواند 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



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

بيشتر شده است، لذا اين حالت نمى تواند طراحى بهينهاى 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 می شود. لذا مى توان اين حالت را به عنوان بهينه ترين حالت در بين 4 حالت مورد بررسى انتخاب كرد.

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 می شود که در حالت 4، سطح خیس زیر شناور به طور چشم گیری کاهش پیدا کرده است. این مقادیر برای سه حالت مختلف در جدول 5 آمده است. مکش هوا در پله اول باعث می شود آب از این قسمت بیرون رانده شده و وارد پله دوم شود، اما همان طور که مشاهده می شود 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 می شود.

#### 4- نتيجه گيري

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 می تواند رفتار مقاومتی و جابه جایی شناور را پیش بینی کند. هم چنین جهت بررسی تأثیر اعمال پله بر کاهش مقاومت بدنه قایق، چند حالت مختلف

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.42.4

6- مراجع

- 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 فارسي)
- [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.

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)
$CD_{k\omega}$	$\omega$ قسمت مثبت پخش عرضی در معادله انتقال
F	بردار نیرو (N)
$F_1, F_2, F_3, F_4$	توابع کمکی در مدل توربولانسی
g	شتاب گرانشی (ms <sup>-2</sup> )
$I_{yy}$	ممان اینرسی در راستای y (kgm²)
k	انرژی سینتیک توربولانسی (m²s²²)
L	طول شناور (m)
т	جرم (kg)
р	فشار (Pa)
$P_k$	توليد انرژی سينتيک توربولانسی
t	زمان (s)
V	سرعت شناور ( <sup>-(</sup> ms)
Ŵ	شتاب جابهجایی مرکز گرانش جسم صلب (ms <sup>-2</sup> )
у	فاصله از دیواره (m)
علائم يونانى	
α	کسر حجمی

β ضريب مدل توربولانسى

β\* ضريب مدل توربولانسي

(Pas) لزجت دینامیکی ( $\mu$ 

ν لزجت سینماتیکی (m²S)

(kgm<sup>-3</sup>) چگالی (

ثابت توربولانسى  $\sigma_k$ 

- ثابت توربولانسى  $\sigma_{\omega}$
- س نرخ پخش ویژه (<sup>۱</sup>-s)، سرعت زاویهای (rads<sup>-1</sup>)
  - ن شتاب زاویهای جسم صلب (²-rads) 🔬

⊽ عملگر نابلا

هوا

#### زيرنويسها

a

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-01