



Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>
Original Article



Numerical Simulation of Resistance and Trim of a Planing Craft Using Computational Fluid Dynamics

Reza Shamsi*, Ali Ebrahimi

Naval Architecture and Marine Engineering, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran.

* Corresponding Author Email: shamsi@aut.ac.ir

Received: 12 February 2022

Revise Date: 8 December 2022

Accepted: 12 December 2022

DOI: 10.22113/jmst.2020.219383.2352

ABSTRACT

This study investigates the hydrodynamic performance of a high-speed planing craft from the Naples warped hard chine hull series using Computational Fluid Dynamics (CFD). Numerical simulations were performed by solving the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations coupled with the k- ϵ turbulence model. A three-dimensional, unsteady, two-phase (air-water) turbulent flow was modeled. The vessel was simulated with two degrees of freedom (heave and pitch) to calculate resistance and trim. Dynamic meshing and a six-degree-of-freedom (6-DOF) rigid body solver were employed to couple the fluid flow with the vessel motion. Simulations were conducted for a Reynolds number greater than 3.5×10^6 and a Froude number range of 0.52 to 1.65. The numerical results for resistance and trim were validated against existing experimental data, showing average errors of less than 3% and 9%, respectively. Additionally, the wave pattern and wake field behind the craft were analyzed at various speeds. The results confirm the high accuracy and capability of the RANS-based CFD method for hydrodynamic analysis of planing vessels.

Keywords: Planing Craft; CFD; RANS method; Resistance; Trim.

1. INTRODUCTION

Over the past century, significant increases in the speed of transportation vehicles have been observed, except for commercial ships, where hydrodynamic resistance remains the primary limiting factor. This limitation is particularly severe for high-speed vessels. Planing craft operate in three distinct regimes: displacement, transition (semi-planing), and planing. In the planing mode, a significant portion of the vessel's weight is supported by hydrodynamic lift rather than hydrostatic buoyancy, leading to reduced wetted surface area and higher achievable speeds. Due to the complex, two-phase turbulent flow around planing hulls at high speeds, analytical solutions are impractical, and experimental methods are costly and limited. Consequently, Computational Fluid Dynamics (CFD) has emerged as an efficient and powerful tool for such analyses. Previous studies have applied RANS-based simulations to various planing craft configurations, including stepped hulls and tunnels, demonstrating the capability to predict resistance and trim. However, accurate

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



simulation requires careful consideration of dynamic mesh motion and free-surface capturing. This study aims to numerically investigate the hydrodynamic performance of a Naples-series planing craft using a dynamic meshing approach and two-degree-of-freedom motion, validating resistance and trim predictions against experimental data and analyzing the resulting wake and wave patterns.

2. MATERIALS AND METHODS

The fluid was assumed incompressible. The governing equations were the unsteady RANS equations for mass and momentum conservation. The standard k- ϵ turbulence model was employed to model the Reynolds stress tensor. The volume of fluid (VOF) method was used to capture the air-water interface.

The studied vessel is a planing craft from the Naples systematic series. Key principal dimensions include: length of 2.611 m, beam of 0.86 m, draft of 0.163 m, mass of 92.25 kg, and longitudinal center of gravity at 1.036 m. The computational domain was sized to prevent wave reflection: the outlet was placed 7.5 ship lengths downstream, and the water depth was 2.5 times the vessel length. A velocity inlet was specified at the inlet, and a pressure outlet at the downstream boundary. The craft was modeled as a symmetric half-body to reduce computational cost, with a symmetry plane applied at the centerline. A critical aspect of the methodology was the mesh strategy. Dynamic meshing was utilized to allow the vessel to move with heave and pitch (2-DOF). An overset mesh (or dynamic mesh region) was created around the hull, which moved with the vessel, while a background mesh remained stationary. To ensure high resolution of the free surface and wake, three refinement blocks with varying thicknesses were defined near the water surface. Additionally, three triangular blocks were placed behind the hull to capture the evolving wake pattern at different speeds. The final mesh consisted of approximately 991,671 cells after a grid independence study. Boundary layer resolution was ensured with eight prism layers around the hull. A time step of 0.001 seconds was selected following a time-step independence study. Simulations were performed using STAR-CCM+ 13.04 on a 16-core parallel processor.

3. RESULTS

The numerical results for total resistance were compared against experimental data for Froude numbers between 0.52 and 1.65 (speeds from 2.5 to 7.5 m/s). The results showed very good agreement. The average error was less than 3%, with a maximum error of 4.1% at the highest speed. The numerical simulation accurately captured the increasing trend of resistance with speed. The dynamic trim angle (the angle between the horizontal and the keel) was calculated at 11 different speeds. The results showed that trim increases with speed in the displacement and transition regimes, reaching a maximum at a Froude number of approximately 1.2. Beyond this point, in the full planing regime, the trim angle begins to decrease. Comparison with experimental data yielded an average error of 8.9%, confirming the capability of the dynamic mesh and 2-DOF approach to predict running attitude. Analysis of the wake field at speeds of 2.5, 4.5, and 7.5 m/s revealed that as speed increases, the wake becomes longer and narrower. The transverse wave length behind the hull increases while the width of the V-shaped wave pattern decreases. This is attributed to the increased velocity of the water jet exiting from under the transom, which concentrates the wake along the centerline. Visualization of the hull bottom at different speeds demonstrated a progressive reduction in the wetted surface area as speed increased. At the lowest speed (displacement mode), the wetted area was maximal. At the highest speed (planing mode), the wetted area was minimal, indicating that the hull is primarily supported by hydrodynamic lift, which reduces frictional resistance.

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

This study successfully demonstrated the application of RANS-based CFD with dynamic meshing to predict the hydrodynamic performance of a Naples-series planing craft. The key conclusions are as follows:

1. The RANS numerical method coupled with the VOF multiphase model exhibits high capability in simulating the complex, two-phase turbulent flow around high-speed planing hulls.
2. Validation results confirmed that the average error for resistance prediction is below 3%, and for trim prediction is below 9%, indicating good engineering accuracy for practical applications.

3. The use of dynamic meshing and a two-degree-of-freedom (heave and pitch) motion is essential for accurately predicting the dynamic trim and equilibrium position of the vessel.
4. The simulation results effectively captured the physical trends of increased wake length and decreased wake width with increasing speed. The reduction in wetted surface area at higher speeds was also clearly visualized, explaining the reduction in resistance growth rate in the planing regime.
5. Future research should focus on extending this methodology to six-degree-of-freedom motions in irregular waves and investigating the effects of design modifications such as steps and spray rails.



مقاله پژوهشی

Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>



شبیه سازی عددی مقاومت و تریم یک شناور بدنه پروازی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

رضا شمسی*، علی ابراهیمی

گروه مهندسی دریا، کشتی سازی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: shamsi@aut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22113/jmst.2020.219383.2352

چکیده

در دهه اخیر استفاده از شناورهای بدنه پروازی بعلاوه عملکرد مناسب در سرعت های بالا در بخش های تجاری و نظامی بسیار گسترده شده است. به دلیل پیچیده بودن رفتار شناورهای بدنه پروازی، تحلیل عملکرد هیدرودینامیکی آنها از اهمیت خاصی برخوردار است. دینامیک سیالات محاسباتی ابزاری موثر و کارآمد برای تحلیل های عددی هیدرودینامیک شناورهای تندرو محسوب می گردد. در این تحقیق عملکرد هیدرودینامیکی یک شناور تندرو از سری فرم بدنه ناپل با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و حل عددی معادلات متوسط گیری شده ناور-استوکس (RANS) مورد بررسی قرار گرفته است. این شبیه سازی به صورت سه بعدی، با در نظر گرفتن جریان دو فاز و توربولانسی انجام شده است. برای محاسبه مقدار مقاومت و تریم، شناور در حالت دو درجه ای آزادی در نظر گرفته شده است. همچنین با استفاده از حلگر شش درجه آزادی و با استفاده از مش های دینامیکی، معادلات دینامیک جسم صلب با معادلات حاکم بر سیال کوپل شده است. شبیه سازی های عددی برای محاسبه مقاومت این شناور در محدوده اعداد رینولدز بزرگتر از $10^6 \times 3/5$ و در محدوده اعداد فرود 0.52 تا $1/65$ صورت پذیرفته و با نتایج آزمایشگاهی موجود اعتبارسنجی گردیده است. مقایسه نتایج عددی و تجربی نشان می دهد که مقدار خطای متوسط برای مقاومت و تریم شناور به ترتیب کمتر از ۳ درصد و ۹ درصد است که دقت روش RANS را تایید می نماید. همچنین الگوی موج و میدان ویک در پشت شناور مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

واژگان کلیدی: شناور بدنه پروازی، دینامیک سیالات محاسباتی، روش RANS، مقاومت، تریم.

Copyrights:

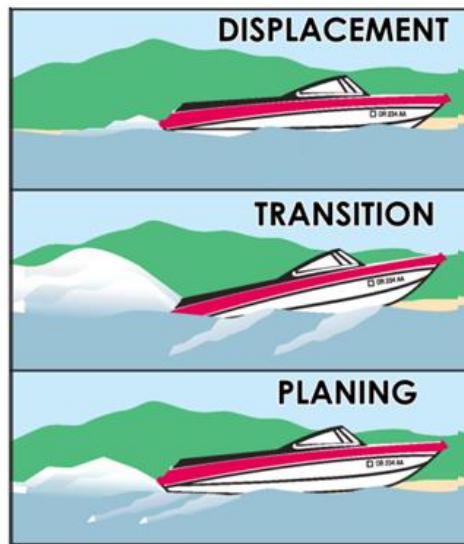
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



۱. مقدمه

سه وضعیت عملیاتی یا حرکتی جابه جایی، گذار و پروازی هستند. در وضعیت جابه جایی همانند شناورهای معمول جابه جایی، در سرعت های پایین حرکت می کنند و وزن شناور با نیروی بویانسی در تعادل است. در وضعیت دوم یا حالت گذار شناور، سینه کشتی به مقدار زیادی از آب خارج شده و پاشنه کشتی در آب فرو می رود. در حقیقت تریم شناور افزایش زیادی یافته و شناور میدان ویک زیادی را در پاشنه کشتی تولید می نماید. در این حالت تماس بدنه با آب کمتر از حالت جابجایی است. این کار به کمک نیروهای برآ هیدرودینامیکی صورت می گیرد. وضعیت سوم یا حالت پروازی که در سرعت های بالا رخ می دهد، مقدار تریم کشتی و میدان ویک در پاشنه کمتر شده و شناور تا حد بسیار قابل توجهی از آب جدا می شود. در حالت پروازی درصد زیادی از نیروی وزن شناور توسط نیروی برآ هیدرودینامیکی خنثی می شود و بقیه آن به وسیله نیروی هیدرواستاتیکی تحمل می گردد (Moghaddas Ahangari, Alavijam, 2021).

در یک قرن اخیر سرعت وسایل نقلیه افزایش چشمگیری داشته است به طوری که سرعت هواپیماها حدود ده برابر و سرعت اتومبیل ها حدود سه برابر شده است. در این میان سرعت کشتی های تجاری تقریباً دو برابر شده است. مقاومت هیدرودینامیکی دلیل اصلی محدودیت در افزایش سرعت شناورها است؛ که این مقاومت به خصوص در سرعت های بالا منجر به نیازمندی به قدرت بیشتری برای افزایش سرعت است. امروزه احساس نیاز به سرعت های بالاتر در صنایع دریایی به غیر از امور نظامی، حتی در زمینه هایی چون امداد و نجات، مسابقات ورزشی و تفریحی نیز مورد تقاضا است. با نگرش به اینکه صرفاً شناورهای کوچک، تندرو محسوب نمی شوند، رسیدن به سرعت های بالا در اندازه های بزرگتر نیز می تواند مورد نیاز باشد. این نیاز در دنیا به صورت مداوم در حال گسترش است، به طوری که دائماً در حال مشاهده تغییر و تحول در زمینه ی شناورهای تندرو در دنیا هستیم. شناورهای بدنه پروازی مطابق شکل (۱) دارای



شکل ۱- وضعیت های عملیاتی شناورهای بدنه پروازی

Fig. 1- Operation modes of planing vessel

شده است. یک مدل صحت سنجی شده اغتشاش می تواند اطلاعاتی دقیق را در شرایط تعریف شده بدون محدودیت های تجهیزات آزمایشگاهی و خطاهای اندازه گیری فراهم کند (Hajivand, and Daraee, 2022).

نخستین بار Savitsky (1964) آزمایش هایی را بر روی تعدادی از شناورهای تندرو انجام داد و روابط نیمه تجربی برای محاسبه نیروی مقاومت و برآ ارائه کرد. او معادلاتی را بر اساس

در حالت پروازی جریان اطراف شناور دو فازی می شود که در این حالت، حل معادلات حاکم با استفاده از روش های تحلیلی امکان پذیر نیست. اگر چه بهترین راه برای حل معادلات حاکم بر مسئله استفاده از روش های آزمایشگاهی است؛ اما این روش ها بسیار پر هزینه است و برای تعداد محدودی از حالت های موجود قابل استفاده هستند. این دلایل باعث شده است که امروزه پژوهشگران به سمت استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای حل مسائل موجود بروند. طی دهه های اخیر، شبیه سازی های دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان راهی ارزان و کارا، باعث سهولت انجام تحقیقات

روش آماری به دست آورد و روندی را برای محاسبه نیروی مقاومت و برآ در شناورهای تندرو پیشنهاد نمود.

De Marco et al. (2017) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مقدار مقاومت و تریم را برای یک شناور پروازی پله دار در دو شبیه سازی مختلف، یکی با استفاده از مش های دینامیکی و دیگری بدون استفاده از مش های دینامیکی، محاسبه کرده اند. آنها پس از مقایسه نتایج عددی با داده های آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که استفاده از مش های دینامیکی نتایج دقیق تری حاصل می شود.

Nourghassemi et al. (2018) جریان در اطراف یک مدل کاملاً سه بعدی از یک شناور تندرو را به روش RANS شبیه سازی نمودند و برای مدل سازی معشوش اطراف شناور، از مدل اغتشاشی k-ε استفاده کردند.

Yousefi et al. (2014) تاثیر افزودن تونل بر نیروی مقاومت را در شناور تندرو پروازی بررسی نموده اند و برای به دست آوردن موقعیت تعادل شناور از میان یابی خطی استفاده کرده اند. نتایج نشان می دهد که اضافه کردن تونل باعث کاهش مقاومت و کم تر شدن عمق شناور در آب می شود اما در سرعت های پایین موجب افزایش مقاومت می گردد.

همچنین Ghoshchi et al. (2017) در شبیه سازی کاملاً سه بعدی با در نظر گرفتن جریان دو فاز و توربولانسی تاثیر تغییر ارتفاع پله را بر مقدار مقاومت و تریم و سینکج شناور تندرو را در دو درجه آزادی بررسی کرده اند که نتایج حاصله نشان از کاهش

مقاومت در شناور دارای پله است. Bakhtiari et al. (2016) در یک شبیه سازی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مقدار مقاومت، تریم و سینکج را برای یک شناور تندرو دارای دو پله با در ارتفاع های مختلف حساب نموده اند؛ که در آن معادله ناویر-استوکس با مدل توربولانسی k-ε کوپل شده است و از مدل حجم سیال برای دنبال کردن مرز مشترک استفاده شده است. نتایج حاصل نشان از کاهش مقاومت شناور دارای پله نسبت به شناور فاقد پله دارد.

در این مطالعه سعی شده است، عملکرد هیدرودینامیکی یک شناور تندرو به به کمک روش حل عددی معادلات متوسط گیری شده ناویر-استوکس مورد بررسی قرار گیرد. این شبیه سازی به صورت سه بعدی، با در نظر گرفتن جریان دو فاز و توربولانسی در دو درجه آزادی انجام شده است. همچنین در فرآیند مش بندی از مش های دینامیکی برای افزایش دقت محاسبات استفاده شده است. در ادامه نتایج به دست آمده از محاسبه مقاومت و تریم با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می شود.

۲. مواد و روش ها

در این مطالعه سیال، غیر قابل تراکم فرض شده است. معادلات حاکم بر جریان بقای جرم و مومنتم است. با استفاده از روش معادلات متوسط گیری شده ناویر-استوکس یا RANS، معادلات حاکم را می توان به صورت روابط (۱) و (۲) بیان کرد؛ که در آن u سرعت متوسط و $-\rho u_i' u_j'$ تانسور تنش رینولدز است.

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho u_i' u_j')$$

رابطه (۱)

رابطه (۲)

فرم تانسوری، به صورت روابط (۴) و (۵) مدل می شود؛ که در این روابط، k عبارت است از تولید آشفتگی و ε استهلاک آن است و U_i عبارت است از سرعت متوسط در راستای \hat{i} و x_i نیز در راستای طولی است. همچنین μ_t ویسکوزیته آشفته است.

در ضمن نرخ استهلاک k و ε با رابطه (۶) در فرم تانسوری بیان می شود؛ که در آن متغیرهای $C_2, C_1, C_{\mu}, C_k, C_\epsilon$ مقادیر ثابتی هستند و در جدول (۱) مقدار این ضرایب موجود است.

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

رابطه (۳)

مدلسازی تانسور تنش، نسبتاً مشکل است، زیرا برای تعیین آن نیاز به اطلاعات دقیقی در خصوص ساختار پدیده آشفتگی در سیال داریم که غالباً در دسترس نیستند. لذا برای تعیین اندازه تنش های رینولدز باید از یکی از مدل های آشفتگی موجود استفاده کرد. در این مطالعه از مدل آشفتگی k-ε استفاده شده است. این مدل استاندارد دو معادله مدل دارد، یکی برای k و دیگری برای ε، که برای درک بهتری از فرآیندهای مناسبی که سبب تغییرات این متغیرهای می شوند، بنا شده است. این مدل دو معادله ای حالت آشفته را به صورت رابطه (۳) مدل می کند و بخش مربوط به معادلات k در

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + p_k - \varepsilon \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$p_k = v_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{k} p_k + c_2 \left(\frac{\varepsilon^2}{k} \right) \quad \text{رابطه (۶)}$$

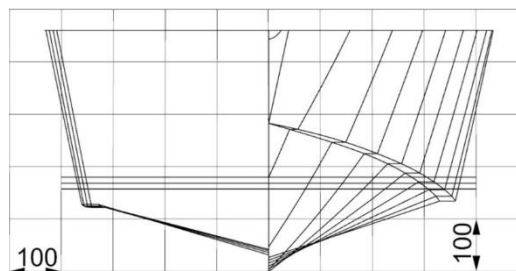
جدول ۱- ضرایب ثابت مدل توربولانسی k-ε

Table 1- k-ε turbulence model constants

C_1	C_2	C_μ	σ_k	σ_ε
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

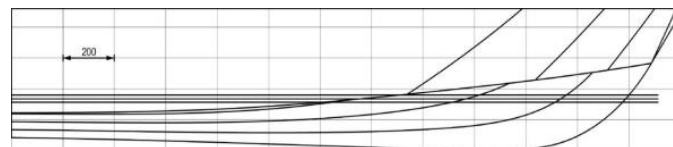
شناور تندرو نشان داده شده است (De Luca and Pensa, 2017). همچنین ابعاد هندسی مهم شناور در جدول (۲) ارائه شده است.

همان طور که قبلا اشاره شد، شناور مورد مطالعه در این پژوهش، یک شناور تندرو پروازی از سری ناپل است که در شکل‌های (۲) و (۳) نماهای مختلفی از مقاطع عرضی و طولی این



شکل ۲- نمای مقاطع عرضی شناور

Fig. 2- Transverse sections view



شکل ۳- نمای مقاطع طولی شناور

Fig. 3- Longitudinal sections view

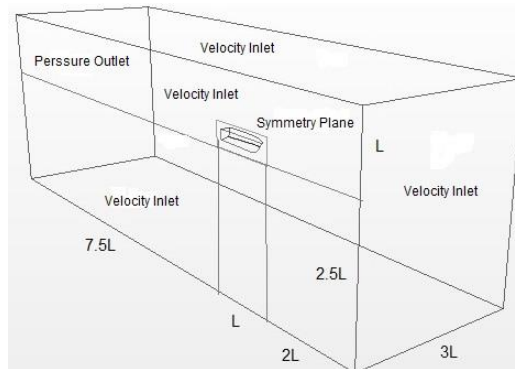
جدول ۲- ابعاد اصلی مدل شناور

Table 2- Main dimensions of ship model

Parameter	Values
Length	2.611 m
Breadth (Width)	0.86 m
Draft	0.163 m
Mass	92.25 kg
Longitudinal Center of Gravity	1.036 m
Wetted Surface Area	1.53 m ²

شرایط ورودی میدان حل به دلیل استفاده از مدل کانال باز سرعت ورودی در نظر گرفته شده است. خروجی میدان جایی است که جریان خارج می شود و شرایط مرزی آن فشار خروجی انتخاب می شود. همچنین برای کاهش حجم محاسبات شناور به صورت متقارن در نظر گرفته می شود و از آن جا که بدنه شناور جسم صلب فرض گردیده، شرایط مرزی دیواره برای آن اعمال می گردد. دیگر شرایط مرزی اعمال شده روی قسمت های دیگر فضای محاسباتی در شکل (۴) نشان داده شده است.

مرز خروجی جریان در فاصله $7/5L$ برابری طول شناور انتخاب شده تا از عدم رسیدن موج های ناشی از ویک به مرز خروجی و به وجود آمدن جریان بازگشتی جلوگیری شود. همچنین برای داشتن عمق کافی و برقراری شرایط آب عمق فضای محاسباتی حدود $2/5$ برابر طول شناور در نظر گرفته شده است. ابعاد در نظر گرفته شده برای فضای محاسباتی در شکل (۴) نشان داده شده است.

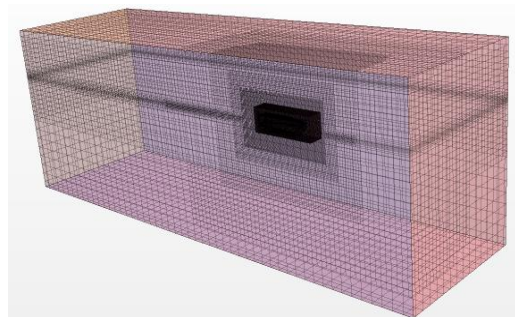


شکل ۴- ابعاد فضای محاسباتی و شرایط مرزی

Fig. 4- Computational domain and boundary conditions

موج های ایجاد شده در ویک شناور، باید مرز اولیه بین دو فاز به اندازه ی کافی ریز باشد تا مرزی صاف ایجاد شود و همچنین شکل مناسبی از موج های ایجاد شده بدست آید. از این رو در این شبیه سازی ۳ بلوک با ضخامت های مختلف ایجاد شده است. همچنین برای به دست آوردن شکل ویک ایجاد شده در پشت شناور که در سرعت های مختلف تغییر می کند سه بلوک مثلی شکل در ضخامت های مختلف تعریف شده است. شکل (۵) نمایی از مش بندی ایجاد شده را نشان می دهد.

با توجه به اهمیت مساله حاضر و افزایش دقت خروجی مساله باید فضای محاسباتی به چندین قسمت تقسیم شده است که توضیح آن به این صورت است: برای جلوگیری از به هم خوردن مش های اطراف شناور در اثر مش زنی مجدد و حرکت آن، محدوده اطراف شناور دورن یک بلوک قرار می گیرد و به صورت دینامیکی مش بندی می شود که همراه با حرکت شناور حرکت می کند. همچنین برای حفظ یک پارچگی مش بندی در فضای بین مش بندی دینامیکی و فضای محاسباتی، یک بلوک دیگر ایجاد شده است. علاوه بر این به دلیل استفاده از مدل دو فازی و مهم بودن



شکل ۵- نمایی از مش بندی بلوک ها

Fig. 5- Mesh Block view

نتایج مربوط به مقاومت و تریم آن در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به نمودار، ریز کردن مش‌ها در ابتدا تا حدی از پایداری حل مسئله می‌کاهد اما از یک تعداد به بعد دیگر افزایش تعداد مش تاثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد و پایداری حل افزایش می‌یابد. در نتیجه برای داشتن دقت کافی در حل مسئله و کاهش زمان محاسبات تعداد مش ۹۹۱۶۷۱ (حالت ۳) به عنوان تعداد مش مناسب برای حل مساله انتخاب می‌شود. سپس برای تعداد مش انتخابی استقلال حل از گام زمانی نیز در سه گام زمانی مختلف بررسی شده است که نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به نتایج با افزایش و کاهش گام زمانی نتایج تغییر نمی‌کند و همچنان پایدار است لذا برای افزایش دقت کافی در حل مسئله و همچنین کاهش زمان محاسبات گام زمانی برابر ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است.

برای حل معادلات حاکم بر میدان حل، به دست آوردن نتایج، بررسی و نمایش آنها از نرم افزار STAR-CCM+ 13.04 استفاده شده است. همچنین محاسبات به صورت پردازش موازی و با استفاده از یک رایانه با ۱۶ هسته انجام شده است که برای کدام از سرعت‌ها محاسبات بیش از هشت ثانیه انجام شده است. همچنین لایه مرزی با هشت زیر لایه در اطراف شناور ایجاد شده است.

۳. نتایج

برای بررسی استقلال حل از مش و رسیدن به یک حالت پایدار در نتایج حاصل، نتایج در چهار حالت مش‌بندی از نظر تعداد مش‌ها در سرعت بیشینه (۷/۵ متر بر ثانیه) مورد بررسی قرار گرفته‌اند که

جدول 3- نتایج استقلال حل از مش

Table 3- Mesh convergence study results

Results	Number of Meshes	Drag Resistance (N)	Floating Trim (degrees)
Experimental	-	183.2853	3.63
	227874	158.7893	3.030
Numerical	469577	177.9245	3.320
	991671	178.0456	3.317
	2263135	178.211	3.322

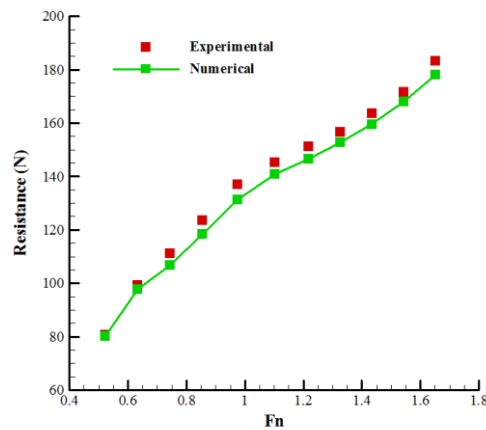
جدول ۴- نتایج استقلال حل از گام زمانی

Table 4- Time step independence study results

Results	Time Step (s)	Drag Resistance (N)	Floating Trim (degrees)
Experimental	-	183.2853	3.630
	0.0007	177.8672	3.299
Numerical	0.0010	178.0456	3.3172
	0.0014	176.6525	3.332

می‌شود که حداکثر خطای محاسبات برابر ۴/۱ درصد می‌باشد. در سرعت‌های پایین‌تر، نتایج به دست آمده خطای بسیار کمی دارند. موارد ذکر شده نشان می‌دهد که شبیه‌سازی انجام شده روند تغییر مقاومت با سرعت را به خوبی پیش‌بینی می‌کند و دقت مناسبی را دارد.

نمودار تغییرات مقدار مقاومت شناور مورد مطالعه در این تحقیق بر حسب عدد فرود در شکل (۶) در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل به خوبی افزایش مقاومت شناور را همراه با افزایش سرعت نشان می‌دهد. همچنین با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده

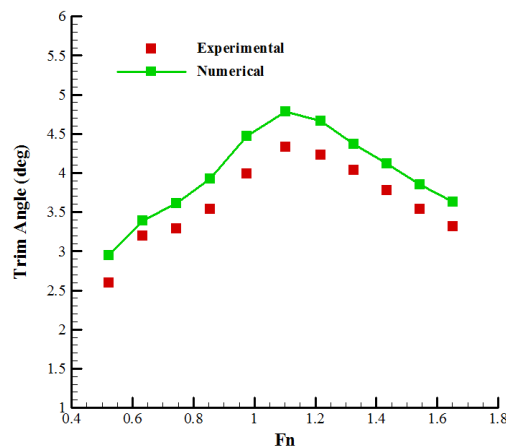


شکل ۶- نمودار تغییرات مقاومت با افزایش سرعت شناور

Fig. 6- Variation of resistance with increasing ship speed

۱/۲ طی می‌کند؛ که در واقع در این محدوده، شناور در حالت جابه‌جایی و در حالت گذار است. پس از عبور شناور از دو حالت فوق و رسیدن به وضعیت پروازی، که بعد از عدد فرود ۱/۲ اتفاق می‌افتد، تریم شناور روندی نزولی به خود می‌گیرد. همچنین با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که محاسبات انجام شده جهت به دست آوردن تریم شناور، خطای میانگینی برابر با ۸/۹ درصد دارد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که شبیه سازی انجام شده روند تغییر مقاومت با سرعت را به خوبی پیش‌بینی می‌کند و دقت مناسبی را دارد.

یکی از پارامترهای مهم در بررسی هیدرودینامیک شناورهای تندرو، زاویه تریم یا به تعبیری زاویه ایجاد شده بین راستای افقی اولیه و ثانویه شناور می‌باشد. در مطالعه حاضر تریم شناور با در نظر گرفتن دو درجه آزادی و با استفاده از مش‌های دینامیکی در ۱۱ سرعت مختلف از ۲/۵ متر بر ثانیه تا ۷/۵ متر بر ثانیه مورد محاسبه و بررسی قرار گرفته است. نمودار تغییرات تریم شناور مورد مطالعه در این تحقیق بر حسب عدد فرود در شکل (۷) در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود تریم شناور از عدد فرود ۰/۵، روندی صعودی را تا رسیدن به عدد فرود



شکل ۷- نمودار تغییرات تریم با افزایش سرعت شناور

Fig. 7- Variation of trim with increasing ship speed

به هنگام حرکت ویکی در پشت خود ایجاد می‌کنند که دامنه آن با افزایش سرعت بیشتر می‌شود و عمق آن متفاوت است. نتایج حاصل برای شبیه سازی حاضر نشان می‌کند که با افزایش سرعت شناور،

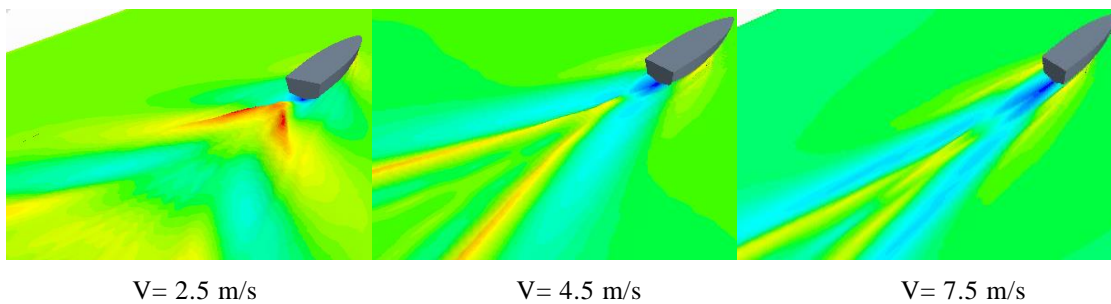
روند طراحی شناور تندرو همیشه به سمتی می‌رود که منجر به افزایش سرعت شناور شود. در حالی که پایداری یکی از مهم‌ترین عوامل به هنگام رسیدن به سرعت‌های بالا است. شناورهای تندرو

ایجاد شده در پشت شناور به صورت حرف V لاتین است که با افزایش سرعت از پهنای آن کاسته می‌شود و بر طول آن افزوده می‌شود.

در شکل (۱۰) سطح خیس شده‌ی کف شناور در سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت سطح خیس کف شناور کاهش می‌یابد؛ یا به عبارتی سطح خیس کف شناور از آب خارج می‌شود که این امر موجب تبدیل شدن مقاومت آب به مقاومت هوا می‌شود و کاهش نیروی مقاومت شناور را در پی دارد. در حالت حرکت جابه‌جایی بیشترین سطح خیس و در حالت حرکت پروازی شناور کمترین سطح خیس را دارد.

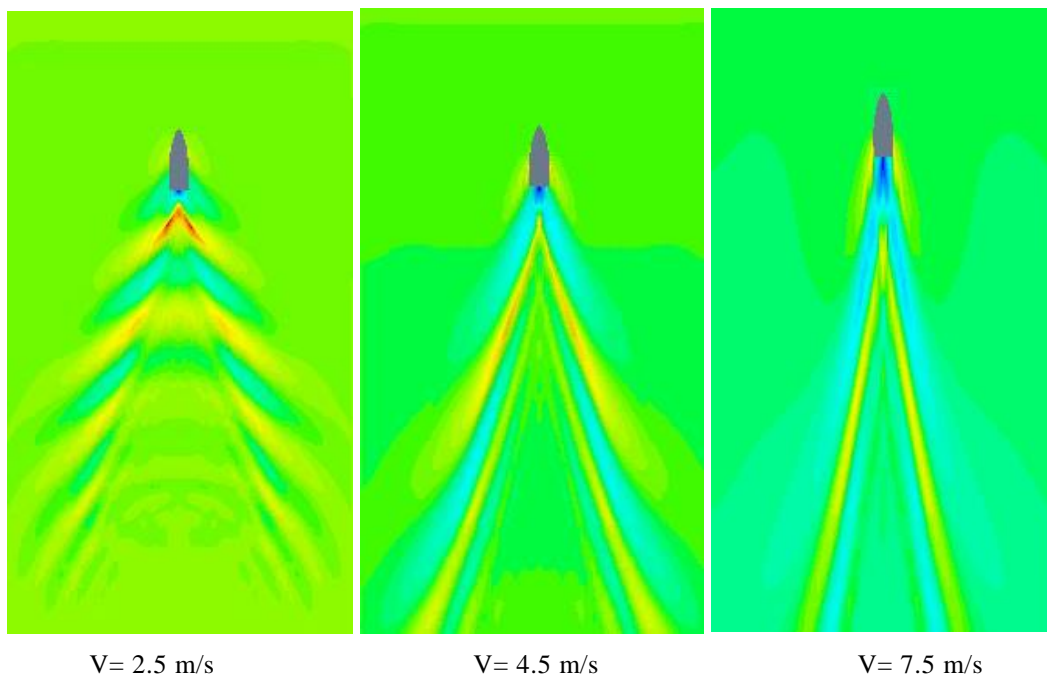
ویک ایجاد در پشت آن کشیده‌تر می‌شود، ولی عرض آن کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع افزایش سرعت آبی است که در پشت شناور جت می‌شود و موجب متمرکز شدن ویک ایجاد شده در یک راستا و در طول خط مرکزی شناور می‌شود. ویک ایجاد شده برای سرعت‌های مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است.

طول موج‌های ایجاد شده اطراف شناور و همچنین شکل و الگوی آنها با افزایش سرعت تغییر می‌کند. الگوی موج ایجاد شده در این شبهه سازی در شکل (۹) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که طول موج ایجاد شده در پشت شناور با افزایش سرعت افزایش می‌یابد و از میزان عرض آن کاسته می‌شود. شکل موج



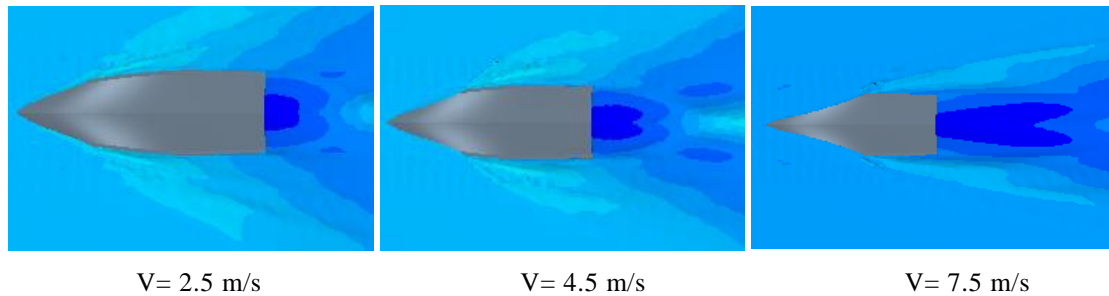
شکل ۸ - پرفیل ویک پشت شناور در سرعت‌های مختلف

Fig. 8- Wake around the around the planing hull at different speeds



شکل ۹ - الگوی موج اطراف شناور در سرعت‌های مختلف

Fig. 9- Wave pattern around the around the planing hull at different speeds



شکل ۱۰- سطح خیس شده کف شناور در سرعت‌های مختلف شناور

Fig. 10- Wetted area of planing vessel at different speeds

- نتایج صحت سنجی نشان می‌دهد که در تحلیل هیدرودینامیکی شناور تندرو و محاسبه مقاومت شناور دقت نسبتاً خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی برقرار است.
- با استفاده از مش‌های دینامیکی و فرض دو درجه آزادی در شبیه‌سازی عددی شناور می‌توان رفتار و مقدار تریم شناور را به خوبی پیش‌بینی نماید.
- نتایج حاصل برای شبیه‌سازی حاضر نشان می‌کند که با افزایش سرعت شناور، ویک ایجاد شده در پشت آن کشیده‌تر می‌شود ولی عرض آن کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش سرعت آبی است که در پشت شناور جت می‌شود و موجب متمرکز شدن ویک ایجاد شده در یک راستا و در طول خط مرکزی شناور می‌شود.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

- در این مطالعه سعی گردید ضمن مروری بر کارهای تجربی و عددی در زمینه تحلیل هیدرودینامیکی شناورهای بدنه پروازی، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مقاومت و رفتار دینامیکی یک شناور تندرو از سری ناپل شبیه‌سازی عددی گردد. در این راستا نخست مقادیر مقاومت و تریم شناور در سرعت‌های مختلف با فرض شبیه‌سازی دو درجه آزادی شناور پیش‌بینی گردید و نتایج حاصله با نتایج تجربی موجود مقایسه و اعتبارسنجی شد. در ادامه این تحقیق الگوی موج و میدان ویک در پشت شناور مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. با توجه نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که:
- روش عددی بر مبنای حل معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس دارای توانایی بالایی در تحلیل‌های هیدرودینامیکی جریان حول بدنه یک شناورهای تندرو است.

References:

- Bakhtiari, M., Veysi, S. and Ghassemi, H., 2016. Numerical modeling of the stepped planing hull in calm water. *International Journal of Engineering-Transactions B: Applications*, 29(2), pp. 236-245. DOI: 10.5829/idosi.ije.2016.29.02b.13
- De Luca, F. and Pensa, C., 2017. The Naples warped hard chine hulls systematic series. *Ocean Engineering*, 139, pp.205-236. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.038
- De Marco, A., Mancini, S., Miranda, S., Scognamiglio, R. and Vitiello, L., 2017. Experimental and numerical hydrodynamic analysis of a stepped planing hull. *Applied Ocean Research*, 64, pp.135-154. DOI: 10.1016/j.apor.2017.02.004
- Ghoshchi H., Ansari, M.R. and Azadi R., 2017. Numerical simulation of hydrodynamics of a model high-speed planing hull with two degrees of freedom. *Modares Mechanical Engineering*, 17(2), pp. 231-239. (in Persian)
- Hajivand, A. and Daraie A., 2022. A Hybrid Method for the Hydrodynamic Analysis of SWATH Vessel. *Journal of Marine Science and Technology*, 21(1), pp. 39-52. DOI: 10.22113/jmst.2019.152341.2213
- Moghaddas Ahangari, A.A. and Alavijam, S.M., 2021. The study of the effect of Variable Deadrise Angle on Hydrodynamic parameter of planing boat in calm water. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(3), pp.143-156. DOI: 10.22113/jmst.2019.176525.2273

Nourghassemi, H., Ghassemi, H. and Taghva, H., 2018. Numerical hydrodynamic results of the two stepped planing hull. *American Journal of Mechanical Engineering*, 6(3), pp.93-97. DOI:10.12691/ajme-6-3-2

Savitsky, D., 1964. Hydrodynamic design of planing hulls, marine technology. *Society of*

Naval Architects and Marine Engineers, New York.

Yousefi, A.R., Shafaghat, R., Mohebbi, M. and Ramiar, A., 2014. Drag reduction in a high-speed planing hull using tunnels. *Modares Mechanical Engineering*, 14(3), pp.51-59.