



# مدل سازی عددی مانور دایروی شناور تندرو تونل دار به منظور بررسی تاثیرات سرعت و زاویه سکان بر روی پارامترهای مانور

آرمین نجاریان<sup>1</sup>، روزبه شافقت<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه کشتی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل  
 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل  
 \*rshafaghat@nit.ac.ir 47148-71167 صندوق پستی

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 05 دی 1395  
 پذیرش: 20 دی 1395  
 ارائه در سایت: 10 بهمن 1395  
 کلید واژگان:

## چکیده

تقاضا برای شناورهای تندرو با توجه به کاربردهای مختلف، افزایش یافته است. کاهش نیروی مقاومت برای دستیابی به سرعت‌های بالا، از اهداف مهم در راستای طراحی شناورهای تندرو است. ایجاد تونل‌های جانبی طولی در بدنه باعث کاهش نیروی درگ می‌شود؛ اما طراحی شناور تنها با هدف کاهش مقاومت درست نبوده، بررسی پایداری و مانور نیز از فاکتورهای مهم است. در مقاله حاضر، با شبیه‌سازی عددی مانور دایروی به عنوان یک مانور استاندارد، کارایی شناور تونل‌دار مورد بررسی قرار گرفته است. دلیل به‌کارگیری روش عددی، دقت بالا و قابل قبول در مقایسه با مدل‌های ریاضی و هزینه کم‌تر نسبت به آزمون‌های تجربی است. از بین تکنیک‌های مختلف، در این کار با در نظر گرفتن حرکت مش به همراه شناور و ترکیب تکنیک مش لغزشی و حرکت انتقالی ناحیه به عنوان روشی کارا به مدل‌سازی مانور شناور پرداخته شد. از مزایای این تکنیک، کاهش زمان محاسبات و افزایش دقت حل است. گسسته‌سازی معادلات از نوع حجم محدود بوده، در شبیه‌سازی آشفستگی از مدل  $k-\omega$  استفاده می‌شود. در مدل‌سازی سطح آزاد نیز مدل مختلط به روش سطح آزاد ترجیح داده شد. روش حل با نتایج تجربی یک شناور تک‌بدنه اعتبارسنجی شد. در بخش نتایج با ارائه‌ی مسیر حرکت شناور در آزمون‌های مختلف، تاثیر زاویه سکان، نیروی تراست و مود حرکتی شناور بر پارامترهای مانورپذیری شناور تونل‌دار بررسی می‌شود. نتایج نشان از بهبود مانورپذیری شناور تندروی تونل‌دار با نزدیک شدن به مود پروازی دارد؛ به طوری که با افزایش سرعت و در نزدیکی مود پروازی، قطر تاکتیکی تا 7.5 درصد نسبت به مود جابه‌جایی کاهش می‌یابد.

شناور تندرو تونل‌دار  
 دینامیک سیالات محاسباتی  
 مانور دایروی  
 مش لغزشی  
 قطر تاکتیکی

## Numerical Modeling of High-Speed Tunneled Hull Turning Circle Maneuver for Investigating the Speed and Rudder Angle Effects on Maneuver Parameters

Armin Najarian, Rouzbeh Shafaghat\*

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran  
 \* P.O.B. 47148-71167, Babol, Iran, rshafaghat@nit.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 25 December 2016  
 Accepted 09 January 2017  
 Available Online 29 January 2017

**Keywords:**  
 High Speed Tunneled Hull  
 Computational Fluid Dynamics  
 Turning Circle Maneuver  
 Sliding Mesh  
 Tactical Diameter

### ABSTRACT

Demands for high speed vessels are increasing due to various usages. Reducing the resistance to achieve high speeds is an important objective in design of high speed crafts. Creating longitudinal side tunnels in the hull causes resistance reduction. Designing the boat is not right only for reducing drag force; stability and maneuverability are also important factors. In this paper, high speed tunneled hull performance is evaluated considering numerical simulation of turning circle maneuver as a standard maneuver. The numerical approach is implemented due to high and acceptable accuracy compared with mathematical models and lower cost compared to experimental tests. Among the various techniques, modeling of maneuver of the boat was performed by considering mesh movement with boat and combination of sliding mesh and movement of domain as an effective method. Reducing computation time and increasing the accuracy of solution are two of its advantages. Finite volume method and  $k-\omega$  model are used respectively for discretization equations and simulation of turbulence. In free surface modeling, mixture model was preferred instead of free surface model. Solution methodology was validated using experimental results of a single-hull boat. Path of the boat in various tests was presented in the result section, considering the effect of angle of rudder, thrust and movement mode of the boat on the maneuver parameters. The results show enhancing maneuverability of the boat by approaching the planing mode so by increasing the speed and approaching the planing mode, tactical diameter is reduced up to 7.5% compared to the displacement mode.

### 1- مقدمه

دستیابی به سرعت‌های بالا و افزایش قدرت مانور در این نوع شناورها با توجه به نوع کاربرد، از اهمیت ویژه و خاصی برخوردار است [1]. مانورپذیری در یک شناور، به توانایی آن در حفظ وضعیت حرکتی یا تغییر مسیر

در سال‌های اخیر تعداد شناورهای تندرو به دلیل کاربردی بودن آن‌ها در زمینه‌های نظامی، مسابقه‌ای و تفریحی افزایش چشم‌گیری پیدا کرده است.

### Please cite this article using:

A. Najarian, R. Shafaghat, Numerical Modeling of High-Speed Tunneled Hull Turning Circle Maneuver for Investigating the Speed and Rudder Angle Effects on Maneuver Parameters, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 85-92, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه انجام شده از سه پیکربندی مختلف استفاده شده است و نتایج مربوط به شعاع چرخش و حرکات هیل و یاو و تریم در هر پیکربندی در شش درجه آزادی ارائه شده است [8]. وانگ و همکاران در سال 2012 دریامانی و مانورپذیری شناور تندروی پروازی تک بدنه را در امواج منظم بررسی نمودند. عبور دادن موج‌هایی با ویژگی‌های متفاوت از جهات مختلف و بررسی حرکات شناور از اهداف مطالعه انجام شده است. در این مطالعه حل عددی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است و بررسی و تحلیل عددی با استفاده از مش متحرک صورت گرفته است. تعداد درجه آزادی شناور 6 بوده، سطح آزاد نیز به کمک مدل VOF شبیه‌سازی شده است [9]. عبدالرضا یوسفی و همکاران در سال 1393 مطالعات عددی در زمینه بررسی اثر افزودن تونل بر نیروی درگ در شناور تندرو با استفاده از نرم افزار انسیس انجام دادند [1]. کاظمی مقدم و همکاران در سال 2015 تاثیر دهانه تونل را بر روی کاهش درگ شناور تندروی تونل‌دار به کمک نرم‌افزار انسیس فلوئنت<sup>4</sup> در یک درجه آزادی مدل کردند [10]. کاظمی مقدم و شفقت در سال 2016 تاثیر ارتفاع تونل بر روی مقاومت شناور تریماران را به صورت عددی مورد تحلیل قرار دادند. در این مطالعه از مدل توربولانسی  $k - \epsilon$  استفاده شده و سطح آزاد به کمک مدل نسبت حجمی سیال<sup>5</sup> شبیه‌سازی شده است [11].

با توجه به این که مطالعات گذشته بیشتر به موضوع کاهش درگ نظر داشته، مباحث مانورپذیری چندان مورد توجه قرار نگرفته‌اند. این درحالی است که در مسیر طراحی شناورهای تندرو، لازم است تا مفاهیم طراحی پیرامون دو تابع هدف توسعه یابند؛ به طوری که با اعمال تغییراتی جهت کاهش درگ، پایداری و مانورپذیری شناور دچار خدشه نشود. لذا با توجه به لزوم بررسی مانورپذیری در شناورها و نیز نبود منابع کافی در این زمینه برای شناورهای تندرو تونل‌دار، در این مطالعه به بررسی عددی مانور دایروی شناور تونل‌دار در 6 درجه آزادی و تحلیل پارامترهای مهم در این نوع مانور از جمله قطر تاکتیکی، شعاع چرخش و همچنین جابه‌جایی و پیشروی شناور در زوایای سکان و نیروهای تراست مختلف به کمک دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته شده است. پس از به‌دست آوردن پارامترهای مهم در مانور دایروی، مقایسه مانور شناور در شرایط مختلف انجام شده است. در شبکه‌بندی نیز از روش مش متصل به بدنه برای مدل‌سازی حرکات شناور استفاده شده است که ضمن صرفه‌جویی در هزینه‌های محاسباتی، توانایی بالایی برای تحلیل حرکات مانور شناور را دارا است.

## 2- معادلات حاکم

جهت تحلیل واقعی و دقیق یک جریان، با توجه به آشفتگی بودن جریان‌های موجود در طبیعت، در نظر گرفتن اثرات آشفتگی در معادلات حاکم بسیار ضروری است.

### 2-1- معادله پیوستگی برای جریان آشفتگی

معادله بقای جرم در حالت کلی به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (1)$$

پارامتر  $U$  بردار سرعت و  $\rho$  چگالی سیال می‌باشد. با فرض ثابت بودن چگالی، چنانچه از معادله‌ی فوق متوسط‌گیری زمانی شود و نیز با استفاده از قوانین متوسط‌گیری رینولدز می‌توان گفت:

کنترل شده اطلاق می‌شود. مانورپذیری در شناور به طور مستقیم به امنیت و مسائل مالی مرتبط می‌شود. برای شناوری که در وضعیت‌های مختلف در حال مانور است، امکان بروز حادثه در صورت ضعف شناور در مانورپذیری دور از ذهن نیست. برای شناخت مانورپذیری شناورها، مجموعه آزمون‌های استاندارد تعریف شده است که هریک از این آزمون‌ها قادر به بررسی برخی از ویژگی‌های حرکتی شناور می‌باشند. پارامترهای مهم در بررسی مانور دایروی شامل میزان پیشروی، جابه‌جایی، قطر تاکتیکی و شعاع چرخش پایا می‌باشند. روش‌های مختلفی از جمله روش آزمایشگاهی، روش نیمه‌تحلیلی و شبیه‌سازی عددی برای بررسی مانور شناور تندرو مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های آزمایشگاهی نزدیک‌ترین روش به واقعیت (به جز اثر مقیاس) است. آزمون به روش‌های بازوی چرخان، کشش مورب (سیستم‌های کشش ثقلی، کابل و پولی و سیستم کشش کالسکه)، حرکت در صفحه و همچنین آزمون به روش خودران از جمله روش‌های آزمایشگاهی می‌باشند. مجهر بودن شناور به پروانه، سکان، موتور الکتریکی، فرستنده و گیرنده رادیویی از ویژگی‌های تست خودران است [2]. از طرفی روش نیمه تحلیلی نیز روشی ساده بوده و سریع به جواب می‌رسد؛ اما تنها برای ابعاد اصلی شناور به کار می‌رود و دقت بالایی ندارد. در روش نیمه تحلیلی ابتدا به کمک بانک اطلاعاتی، فرمول تجربی مناسب استخراج شده و به کمک آزمون مدل، ضرایب هیدرودینامیکی استخراج می‌شوند. ساده‌ترین مدل ریاضی توسط نوموتو [3] ارائه شد. محاسبه عددی هیدرودینامیک شناورها بر اساس حل معادلات رنژ<sup>1</sup> در دهه‌ی 1980 آغاز گردید. اخیراً نیز بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی بررسی نیروهای هیدرودینامیکی پیچیده در مسائل مانور با دقت مناسب انجام شده است. در این روش با اعمال کدهای دینامیک سیالات محاسباتی<sup>2</sup> بر پایه‌ی رنژ در زمینه مانورهای استاتیکی، دینامیکی و شبیه‌سازی 6 درجه آزادی مانور، پیشرفت‌های بزرگی حاصل شده است. عبدالرضا یوسفی و همکاران در سال 2013 به بررسی تکنیک‌های تجزیه و تحلیل هیدرودینامیکی موجود برای شناورهای تندرو پرداختند و سپس کاربردها و محدودیت‌های هر روش را بیان و آن‌ها را طبقه‌بندی کردند [4].

روستیدو و همکاران در سال 2006 به بررسی تجربی مانورهای مختلفی از جمله مانور دایروی بر روی مدل شناور تندروی هوشمند پرداختند. در این بررسی، حداکثر زاویه چرخش 30 درجه بوده، تغییر زاویه هم در سمت راست و هم در سمت چپ شناور ایجاد شده است. کنترل هوشمند شناور نیز به کمک سیستم شبکه‌ای بدون کابل انجام شده است [5]. داوود پورشمس و همکاران در سال 1389 آنالیز مانور شناور تندرو تریماران را به روش تجربی انجام دادند. در این آنالیز تست قابلیت تغییر مسیر، تست مانور دایروی، تست حلزونی، تست شتاب‌گیری شناور، تست زیگزاگ و تست ترمز نرمال بررسی شده است [6]. هنریار و همکاران در سال 2014، تحلیل عددی و تجربی را بر روی یک شناور کاتامارن انجام دادند. در حل عددی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی و نرم افزار انسیس سی‌اف‌ایکس<sup>3</sup> با استفاده از عبور دادن جریان از شناور به صورت یک مسیر دایروی، مانور دورزدن بررسی شد. مدل سازی عددی به صورت شش درجه آزادی بوده، در بررسی تجربی نیز آزمایش‌ها در آب آرام و در سرعت‌های مختلف انجام شده است [7].

محمدرضا جوانمردی و همکاران در سال 1388 تاثیر موقعیت بدنه‌های جانبی شناور تریماران بر روی قابلیت مانورپذیری آن را بر اساس روش عددی

<sup>1</sup> RANS

<sup>2</sup> Computational Fluid Dynamics

<sup>3</sup> ANSYS-CFX

<sup>4</sup> ANSYS-FLUENT

<sup>5</sup> Volume of Fluid

نتیجه آن برای کل میدان نوشت:

$$\varphi = \varphi_1 \alpha + \varphi_2 (1 - \alpha) \quad (7)$$

### 2-5- معادلات حرکت جسم صلب

با در نظر گرفتن شش درجه آزادی برای شناور و نوشتن معادلات بر اساس مرکز جرم و همچنین با محاسبه نیروها و ممان‌های وارد بر شناور ناشی از توزیع سرعت و فشار اطراف آن، جابه‌جایی شناور در هر گام زمانی با حل معادلات (8) و (9) به دست می‌آید.

$$\sum \vec{F} = M \times \vec{a} \quad (8)$$

$$\sum \vec{M}_G = I_G \vec{\alpha} + \vec{\omega} \times I_G \vec{\omega} \quad (9)$$

در رابطه (10)،  $\vec{\omega}$  سرعت زاویه‌ای جسم صلب است.

### 3- مشخصات شناور، ابعاد دامنه حل و شبکه بندی

مشخصات شناور تونل‌دار در ابعاد اصلی و مدل در جدول 2 ارائه شده است. همچنین هندسه دو شناور مدل و اصلی به طور کامل مشابه بوده و در شکل 1 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بدنه این شناور از تونل‌های جانبی طولی استفاده شده است.

برای شبکه‌بندی، از نرم‌افزار انسیس استفاده شده است. افزایش زمان محاسباتی در صورت استفاده از المان‌های ریز و همچنین بروز خطای محاسباتی در صورت استفاده از المان‌های بزرگ، دستیابی به سائز بهینه المان‌ها را ضروری می‌کند. در صورت ریز نبودن سطح آزاد به اندازه کافی، موج بر روی سطح آزاد در ابتدای مدل‌سازی مشاهده شده که سبب تغییر در ماهیت مسئله و نتایج حاصل می‌گردد.

جدول 2 ابعاد اصلی و مدل شناور

Table 2 Main and Model Dimensions of the Boat

عنوان	واحد	ابعاد اصلی	ابعاد مدل
طول کلی شناور	متر	12.958	2.7275
عرض کلی	متر	4.288	0.9
ارتفاع کلی	متر	1.170	0.2463
وزن شناور در حالت بار کامل	کیلوگرم	11500	107.3
آبخور سطحی اولیه	متر	0.85	0.179
طول مرکز جرم از پاشنه	متر	3.387	0.713
طول مرکز جرم از کف	متر	0.85	0.179

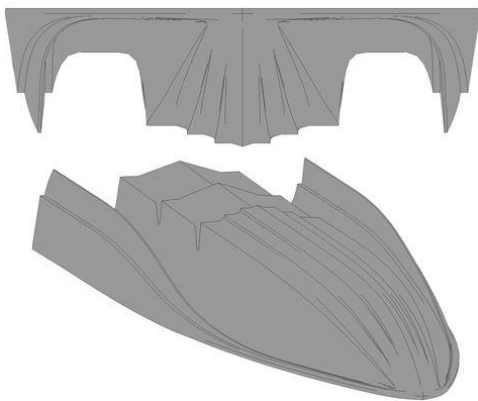


Fig. 1 Geometric of the Boat

شکل 1 هندسه شناور

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$\bar{u}$  بیانگر سرعت متوسط است.

### 2-2- معادله بقای اندازه حرکت سیال برای جریان آشفته

مشخصه‌ی اصلی جریان آشفته، میدان جریان نوسانی می‌باشد. با توجه به روش متوسط‌گیری رینولدز و تبدیل متغیرهای لحظه‌ای جریان به دو قسمت متوسط و نوسانی، معادله اندازه حرکت برای جریان آشفته حاصل می‌گردد.

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \bar{B}_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \overline{\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho u'_i u'_j} \right) \quad (3)$$

در رابطه 3،  $\bar{u}$  سرعت متوسط،  $u'$  سرعت نوسانی و  $\bar{P}$  و  $\bar{B}$  نیز به ترتیب بیانگر فشار استاتیکی متوسط وارد بر سیال و نیروی متوسط ناشی از چشمه است. تفاوت معادلات اندازه حرکت جریان آرام با آشفته حضور ترم  $\rho u'_i u'_j$  می‌باشد که اصطلاحاً تنش آشفستگی یا تنش رینولدز نام دارد.

### 2-3- آشفستگی

در این مطالعه از مدل  $K - \omega SST^1$  به منظور مدل‌سازی آشفستگی و محاسبه تنش رینولدز استفاده شده است. دلیل استفاده از این مدل، توانایی تحلیل جریان در نزدیک و فواصل دور از دیواره به صورت هم‌زمان می‌باشد. در روابط نیمه تجربی 4 و 5،  $U$  بردار سرعت،  $\rho$  چگالی و  $P_k$  نرخ تولید آشفستگی است. ثوابت موجود در معادلات نیز در جدول 1 ارائه شده که این مقادیر با استفاده از روش تجربی بدست می‌آیند [12].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b} \quad (5)$$

### 2-4- مدل‌سازی سطح آزاد

یکی از روش‌های تعیین سطح آزاد، روش کسر حجمی سیال است. در این روش با در نظر گرفتن حجم هر سلول در اطراف سطح آزاد و تعیین نسبت حجم هر کدام از سیال‌ها به حجم کل سلول، می‌توان سطح آزاد را تعیین کرد. معادله (6) نشان‌دهنده معادله کسر حجمی سیال است.

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \alpha_q = 0 \quad (6)$$

در معادله (6)،  $\alpha_q$  نسبت حجم سیال  $q$  به حجم کل سلول است. با توجه به وجود دوفاز در شبیه‌سازی انجام شده، اگر  $\varphi$  به عنوان یک خاصیت فیزیکی سیال تعریف شود، می‌توان رابطه (7) را برای تعیین سطح آزاد و در

جدول 1 ثابت‌های مورد استفاده در مدل آشفستگی

Table 1 Constants used in Turbulence Model

ثوابت	مقادیر (بدون بعد)
$\sigma_\omega$	2
$\sigma_k$	2
$\alpha$	5.9
$\beta$	0.075
$\beta'$	0.09

<sup>1</sup> Shear Stress Transport

#### 4- مدل‌سازی مانور شناور

در شکل 4 پارامترهای مربوط به مانور دایروی شناور تندرو نشان داده شده است.

برای مدل‌سازی مانور شناور، دامنه حل به دو زیردامنه مکعبی و کروی تقسیم شده است. دلیل این نوع تقسیم‌بندی، مدل‌سازی مانور شناور بدون نیاز به حذف و بازتولید شبکه می‌باشد که موجب افزایش دقت و سرعت محاسبات می‌گردد. زیردامنه کروی دارای شش درجه آزادی و زیردامنه مکعبی دارای سه درجه آزادی (فقط دارای حرکات انتقالی) است که باعث تحت کنترل بودن حرکت مش و جلوگیری از تداخل مش‌ها هنگام مانور شناور می‌شود. زیردامنه مکعبی از سه بخش مکعبی تشکیل شده است. این کار برای ریزتر کردن مش در سطح آزاد و درشت‌تر کردن مش در مناطق با حساسیت کم‌تر انجام شده است. در این مقاله از تکنیک مش لغزشی و حرکت انتقالی ناحیه استفاده می‌شود. نکته مهم در این قسمت تداخل دو صفحه مربوط در زیردامنه‌های کروی و مکعبی است. با استفاده از جداسازی فصل مشترک دو زیردامنه، می‌توان صفحات کره و مکعب را به صورت مجزا از هم ایجاد کرد. با این تکنیک، از کشیده شدن مش موجود در فصل مشترک بین کره و مکعب جلوگیری کرده، هرکدام از آن‌ها دارای مش جداگانه و مستقل خواهند بود. در جدول 5 تنظیمات حل در نرم‌افزار استفاده شده بیان شده است.

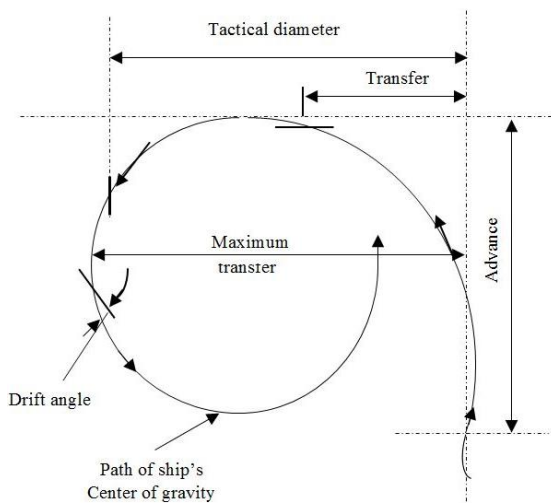


Fig. 4 Parameters of Turning Circle Maneuver

شکل 4 پارامترهای مانور دایروی

#### جدول 5 تنظیمات حل در نرم‌افزار آنسیس CFX

Table 5 Solution Setting in ANSYS-CFX Software

عنوان	روش انتخابی
حلقه	Transient
مدل توربولانسی	k-w SST
گام زمانی	0.0005 sec
مدل چندفازی	Homogeneous Model
مدل رابطه بین زیر دامنه	GGI
طرح گذرا	Second Order Backward Euler
تعداد حلقه در هر گام زمانی	10
نوع همگرایی	RMS
خطای همگرایی	0.0001

در جدول 3، برای مش روی بدنه و مش روی سطح آزاد، چهار اندازه المان مختلف در نظر گرفته شده است که بر اساس نتایج خروجی مربوط به سرعت شناور در نیروی تراست 130 نیوتن، جواب در دو مش شماره 3 و 4 تغییر چندانی نداشته، لذا در تحلیل‌های پیش رو از مش 1 میلیمتری بر روی بدنه و 10 میلیمتری بر روی سطح آزاد استفاده شده است. ابعاد و مشخصات دامنه در جدول 4، شبکه‌بندی دامنه حل در شکل 2 و شبکه‌بندی بر روی شناور تونل‌دار نیز در شکل 3 نمایش داده شده است. تعداد کل المان‌ها نیز برابر با 3750000 است.

#### جدول 3 استقلال از شبکه بندی

Table 3 Independence of the mesh

عنوان	مش شماره 1	مش شماره 2	مش شماره 3	مش شماره 4
سایز مش بدنه (میلیمتر)	4	2	1	0.8
سایز مش سطح آزاد (میلیمتر)	20	15	10	10
تعداد کل مش	2400000	3100000	3750000	4200000
سرعت در نیروی تراست 130N (متر بر ثانیه)	3.4	3.29	3.24	3.22
میزان خطا (درصد)	-	3.18	1.25	0.44

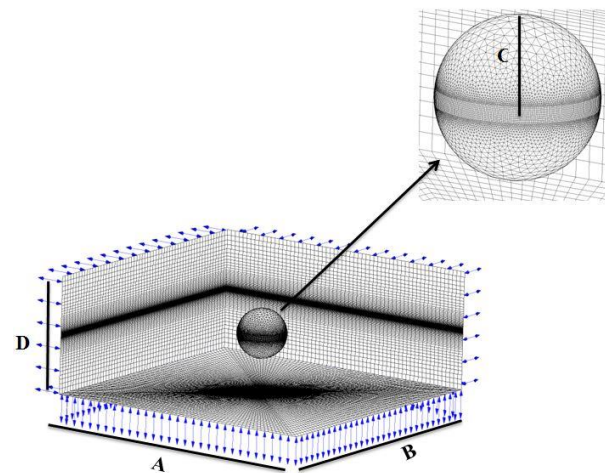


Fig. 2 Computational Domain and Meshing

شکل 2 دامنه محاسباتی و شبکه‌بندی

#### جدول 4 ابعاد دامنه محاسباتی

Table 4 Dimensions of Computational Domain

عنوان	پارامتر	مقدار	واحد
طول	A	24	متر
عرض	B	24	متر
شعاع	C	2.25	متر
ارتفاع	C	10	متر

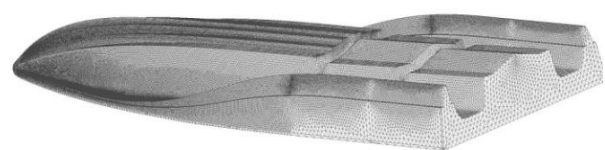


Fig. 3 Meshing on the Body of Tunneled Hull

شکل 3 شبکه‌بندی بر روی بدنه تونل‌دار

## 5- نتایج

## 1-5- اعتبارسنجی

با توجه به عدم دسترسی به نتایج تجربی مناسب برای شناور تونل دار، برای بررسی صحت کار و روش حل مورد استفاده در این مقاله از نتایج مانور یک شناور تک بدنه کمک گرفته شده است که نتایج تجربی آن در مراجع موجود می باشد [13]. فرم بدنه شناور نمونه در شکل 5 و مشخصات آن در جدول 6 نشان داده شده است.

به منظور اعتبارسنجی، شناور نمونه با سرعت 2.1 متر بر ثانیه مدلسازی شده و مانور دایروی با زاویه سکان 15 درجه بررسی می گردد. نتایج به دست آمده و مقایسه آن با تست تجربی (شکل 6) نشان از تطابق خوب بین مدل سازی حاضر و نتایج تجربی انجام شده برای این شناور دارد. میزان خطای موجود در شعاع چرخش شناور حداکثر 7.4 درصد است که نشان از خطای قابل قبول در مطالعه حاضر می باشد. در بررسی خطای ایجاد شده می توان به اثرات سکان و پروانه اشاره کرد که نقش مهمی در به وجود آوردن این خطا ایفا می کنند. از مقایسه شکل 6 و شکل 1 می توان پارامترهای مانور دایروی شناور تک بدنه مورد بررسی را مشاهده نمود. در شکل 6 محور عمودی نشان دهنده نسبت جابه جایی شناور در راستای محور  $x(x_0)$  به طول شناور ( $L$ ) و محور افقی نشانگر نسبت جابه جایی شناور در راستای محور  $Z(Z_0)$  به طول شناور ( $L$ ) است.

## 2-5- ارائه نتایج مدلسازی مانور دایروی

در تحقیق حاضر مقدار تریم، پیشروی، جابه جایی، قطر تاکتیکی و شعاع چرخش پایا در نیروهای تراست و زوایای سکان مختلف با استفاده از روش عددی محاسبه شده است. به طور معمول در انجام مانور دایروی بیشینه زاویه سکان 35 درجه در نظر گرفته می شود [14]. بنابراین به منظور بررسی تاثیر زاویه سکان و نیروی تراست بر مانور دایروی و همچنین ایجاد شرایط مقایسه بین مولفه های مانور، زوایای سکان 15، 25 و 35 درجه در نیروهای تراست 130 نیوتن (مود جابه جایی) و 180 نیوتن (مود پروازی) جهت مدلسازی مانور دایروی استفاده شده اند.

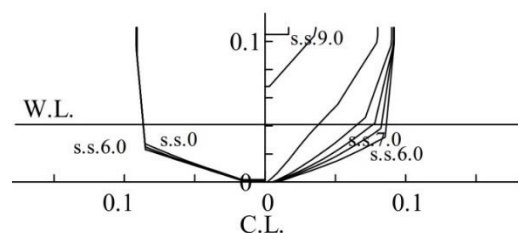


Fig. 5 Body Plan of the Sample Vessel

شکل 5 فرم بدنه شناور نمونه

جدول 6 مشخصات شناور تندرو مدل

Table 6 Specifications of Model of High Speed Vessel

عنوان	مقدار	واحد
طول	0.93	متر
عرض	0.18	متر
آبخور	0.03	متر
موقعیت طولی مرکز جرم از پاشنه	0.33	متر
ددرایز	10	درجه
جرم	3.08	کیلوگرم

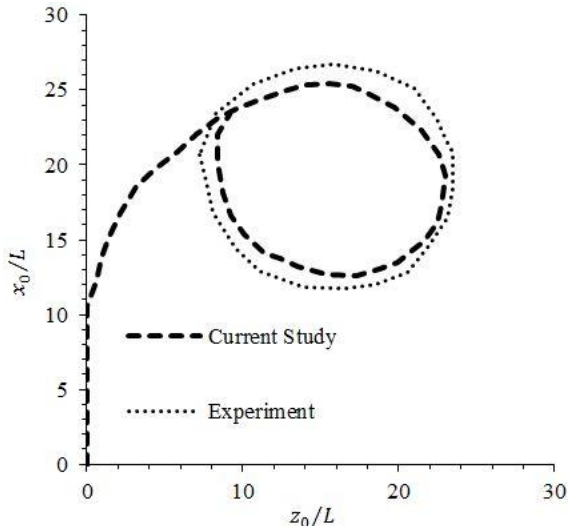


Fig. 6 Comparison of Experimental and Numerical Results

شکل 6 مقایسه نتایج تجربی و عددی

در مدلسازی مانور دایروی، ابتدا شناور با یک نیروی تراست ثابت شروع به حرکت کرده و پس از رسیدن به سرعت ثابت با تغییر زاویه سکان، مسیر دایروی را طی می نماید. با افزایش نیروی تراست، به واسطه عبور هوای فشرده از تونل، یک نیروی لیفت ایجاد می شود که منجر به بالا آمدن شناور از سطح آب و بیشتر شدن سرعت شناور خواهد شد. شکل 7 موقعیت شناور نسبت به سطح آب را به ترتیب در تراست های 130 نیوتن و 180 نیوتن نمایش می دهد. با افزایش نیروی تراست شناور، تریم به میزان 2.29 درجه و موقعیت مرکز ثقل شناور نسبت به سطح آزاد به میزان 22 سانتی متر افزایش می یابد که این افزایش نشان دهنده تبدیل مود حرکتی شناور از مود جابه جایی به پروازی است.

با افزایش نیروی تراست، فشار وارده بر شناور به خصوص در بخش انتهایی افزایش قابل توجهی پیدا می کند (شکل 8) که این افزایش فشار، سبب تغییر مود حرکتی شناور از حالت جابه جایی به پروازی می شود. در واقع با تغییر در مود حرکتی، فشار وارده به شناور به تدریج به انتهای شناور انتقال یافته، باعث بالا آمدن شناور از سطح آب می شود. همان طور که در شکل 8 مشاهده می شود توزیع فشار به ترتیب در نیروهای تراست 130 نیوتن و 180 نیوتن نشان داده شده که به صورت متقارن بوده، بیانگر حرکت شناور در مسیر مستقیم است.

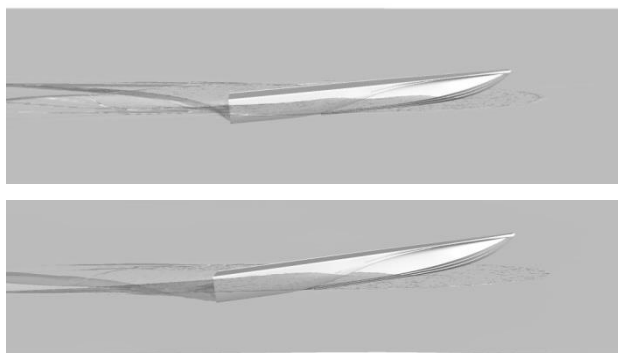


Fig. 7 Position of the Boat Relative to Water Level in the Various Thrusts

شکل 7 موقعیت شناور نسبت به سطح آب در نیروهای تراست مختلف



شناور به خارج از دایره‌ی دوران می‌شود. جدول 7 زاویه هیل شناور در زوایای سکان و نیروی تراست مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود زاویه رول شناور با زاویه سکان و نیروی تراست رابطه مستقیم دارد. با مقایسه تغییرات زاویه رول در نیروهای تراست و زوایای سکان مختلف می‌توان گفت با افزایش زاویه سکان و نیروی تراست، زاویه رول شناور افزایش یافته که نشان از وجود رابطه مستقیم بین زاویه سکان و نیروی تراست با زاویه رول شناور است.

شکل 10 کانتور فشار در کف شناور را در لحظه طی کردن ربع اول مسیر دایروی در نیروی تراست 130 نیوتن نشان می‌دهد. عدم توزیع متقارن فشار در بدنه شناور، ناشی از هیل شدن شناور در هنگام چرخش و مانور است که منجر به افزایش فشار در یک طرف شناور می‌شود. همان‌طور که گفته شد، با رسیدن سرعت شناور به یک مقدار ثابت و سپس تغییر در اندازه زاویه سکان به یک مقدار ثابت، شناور از مسیر مستقیم خود منحرف شده و مسیر دایروی را طی می‌کند. در جدول 8 نتایج حاصل از مانور دایروی شناور تونل‌دار تحت بررسی ارائه شده است.

در شکل‌های 11 و 12 مسیر حرکت شناور در زوایای سکان مختلف و نیروی تراست ثابت با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان پیشروی، جابه‌جایی، قطر تاکتیکی و شعاع چرخش پایا با افزایش زاویه سکان کاهش می‌یابد. در واقع زاویه سکان با پارامترهای اشاره شده در مانور دایروی رابطه عکس دارد. با توجه به شکل‌های 11 و 12 مشاهده می‌شود که اختلاف پارامترهای مانور در زاویه سکان 15 درجه با زوایای سکان 25 و 35 درجه بسیار زیاد است. کاهش شعاع چرخش در زاویه سکان 15 درجه نسبت به 25 درجه در موده‌های حرکتی مختلف در حدود 41 درصد

جدول 7 زاویه رول شناور در شرایط مختلف

عنوان	زاویه رول (درجه)
تراست 130N-زاویه سکان 15 درجه	7.22
تراست 130N-زاویه سکان 25 درجه	9.6
تراست 130N-زاویه سکان 35 درجه	11.2
تراست 180N-زاویه سکان 15 درجه	8.38
تراست 180N-زاویه سکان 25 درجه	10.4
تراست 180N-زاویه سکان 35 درجه	12

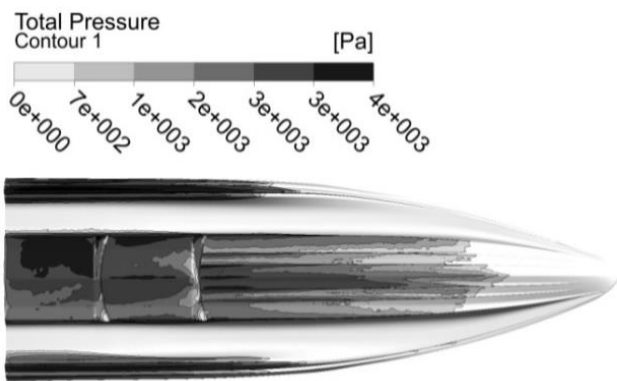


Fig. 10 Pressure Contour at the Bottom of boat in Circle Course (thrust 130N)

شکل 10 کانتور فشار بر روی کف شناور در مسیر دایروی (تراست 130 نیوتن)

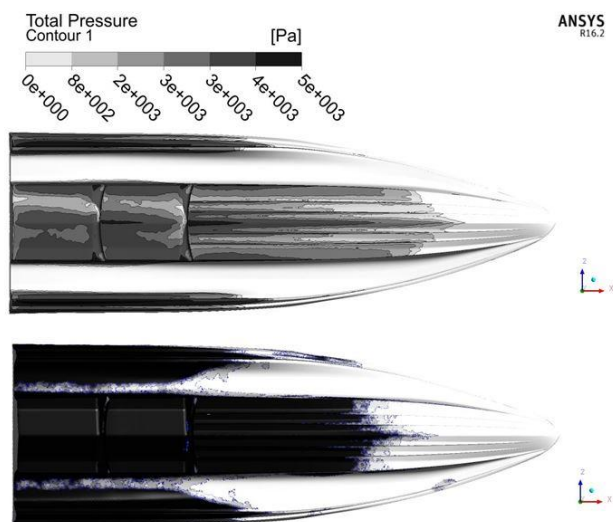


Fig. 8 Pressure Contour at the Bottom of Boat in the Straight Course

شکل 8 کانتور فشار در کف شناور در مسیر مستقیم

کانتورهای فاز بر روی بدنه‌ی شناور به خوبی وضعیت بالا رفتن آب بر روی بدنه‌ی شناور را نمایش می‌دهند. این اتفاق در سرعت‌های پایین‌تر، کمی متمایل به روی بدنه و در کناره‌ها اتفاق می‌افتد؛ اما در تراست بالاتر، با افزایش تریم و بالا آمدن شناور از سطح آب اغتشاش جریان روی سطح زیرین بدنه زیاد شده، جدایش جریان از بدنه‌ی زیرین حس می‌شود. به‌طوری‌که تنها بخشی از بدنه‌ی شناور در ناحیه‌ی ترانزوم تحت تأثیر جریان آب قرار گرفته، سایر نواحی از جمله جلوی شناور خشک می‌ماند. این همان نقش ناحیه‌ی پرفشار را نشان می‌دهد که در سرعت بالا باعث کاهش سطح تماس شناور با آب شده، ضریب درگ را کاهش می‌دهد. در شکل 9 کانتور فاز در کف شناور قبل از اعمال زاویه سکان به ترتیب در تراست‌های 130 نیوتن و 180 نیوتن مشاهده می‌شود.

در شرایط مختلف، وقتی شناور به طور پایا دور می‌زند، مولفه‌های شعاعی نیروهای اعمالی بر بدنه و سکان، گشتاوری را ایجاد کرده که باعث هیل شدن شناور می‌شوند. هیل شدن شناور در ابتدای حرکت به سمت داخل مسیر دایروی بوده و پس از رسیدن به حالت پایا، ممان ایجاد شده سبب هیل شدن

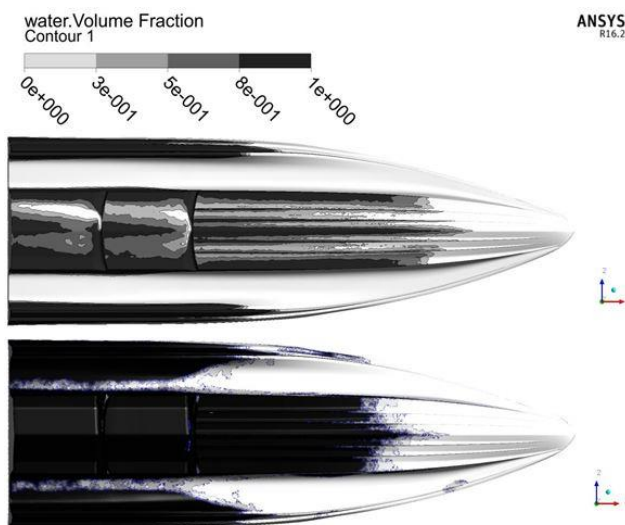


Fig. 9 Phase Contour at the Bottom of Boat in the Straight Course

شکل 9 کانتور فاز در کف شناور در مسیر مستقیم

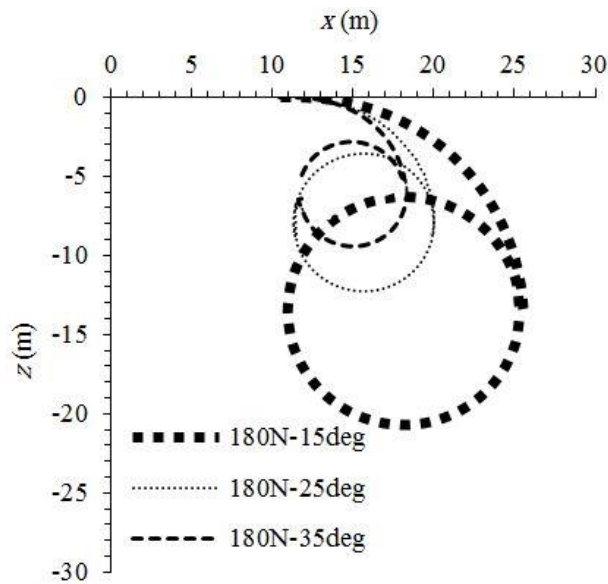


Fig. 12 Path of the Boat at Thrust 180N

شکل 12 مسیر حرکت شناور در نیروی تراست 180 نیوتن

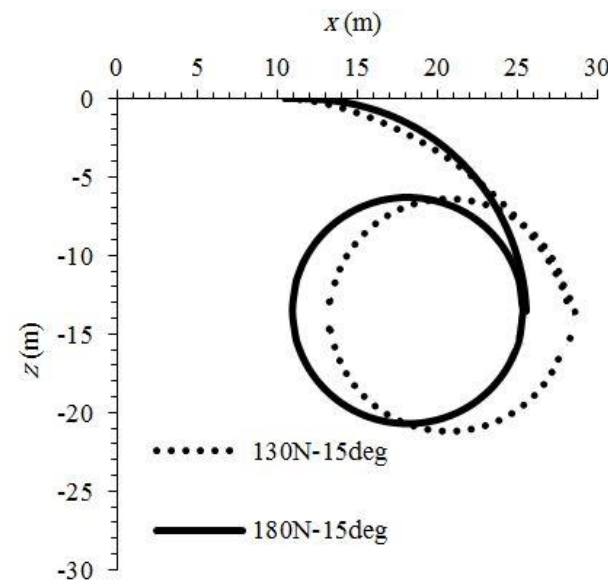


Fig. 13 Path of the Boat at a Constant Rudder Angle

شکل 13 مسیر حرکت شناور در زاویه سکان ثابت

نتیجه‌ی آن سرعت شناور، شعاع چرخش و قطر تاکتیکی افزایش می‌یابد. البته انتظار می‌رفت که به علت افزایش سرعت در شناور شعاع چرخش و قطر تاکتیکی با افزایش چشم‌گیری همراه باشد؛ اما این افزایش بسیار کم بوده و در حدود 2.7 درصد است. این تفاوت کم، ناشی از قدرت مانور بهتر شناورهای تونل‌دار با نزدیک شدن به مود پروازی است.

#### 6- جمع بندی

در این مطالعه به مدلسازی مانور دایروی شناور تندرو تونل‌دار به صورت شش درجه آزادی در زاویه سکان و تراست‌های مختلف پرداخته شد. اعتبارسنجی به کمک شناور تک بدنه انجام شده است که نتایج آن به صورت تجربی در مرجع آورده شده است. در این کار شعاع چرخش پایا، قطر تاکتیکی و پیشروی در مانور دایروی ارائه شد. مهم‌ترین نتایج و دستاوردهای

جدول 8 پارامترهای اصلی مانور دایروی

Table 8 Main Parameters of Turning Circle Maneuver

نیروی تراست و زاویه سکان	پیشروی (متر)	جابه‌جایی (متر)	قطر تاکتیکی (متر)	شعاع چرخش پایا (متر)	تریم (درجه)
130 نیوتن و 15 درجه	17.6	13.3	17.1	7.2	5.15
130 نیوتن و 25 درجه	9.84	7.91	11	4.2	5.15
130 نیوتن و 35 درجه	7.3	6.15	7.8	3.1	5.15
180 نیوتن و 15 درجه	15.6	13.1	16.7	7.4	7.44
180 نیوتن و 15 درجه	9.5	7.8	10.2	4.35	7.44
180 نیوتن و 15 درجه	7.3	6.11	7.2	3.25	7.44

است که این کاهش شعاع چرخش از زاویه سکان 25 درجه به 35 درجه در هر دو مود حرکتی، حداکثر برابر 26.2 درصد است. این اختلاف را می‌توان بدین صورت بیان نمود که پارامترهای مانور به صورت خطی با تغییر زاویه کاهش پیدا نکرده، هر چه زاویه سکان بیشتر می‌شود، این پارامترها از جمله قطر تاکتیکی و شعاع چرخش پایا به میزان مینیموم خود نزدیک‌تر می‌شوند. در شکل 13 می‌توان مانور شناور را در زاویه سکان ثابت و نیروهای تراست مختلف مورد ارزیابی قرار داد. میزان پیشروی در نیروی تراست 130 نیوتن کمی بیشتر از حالت دیگر است. این افزایش پیشروی را می‌توان به این صورت بیان نمود که با افزایش نیروی تراست، تریم شناور افزایش یافته، به حالت پروازی نزدیک‌تر می‌شود؛ بنابراین با نزدیک شدن شناور به حالت پروازی قدرت مانورپذیری آن نیز افزایش می‌یابد که این مساله به صورت کاهش مولفه‌های پیشروی و جابه‌جایی قابل مشاهده است. با مراجعه به داده‌های موجود در جدول 8 مشخص است که با افزایش نیروی تراست و در

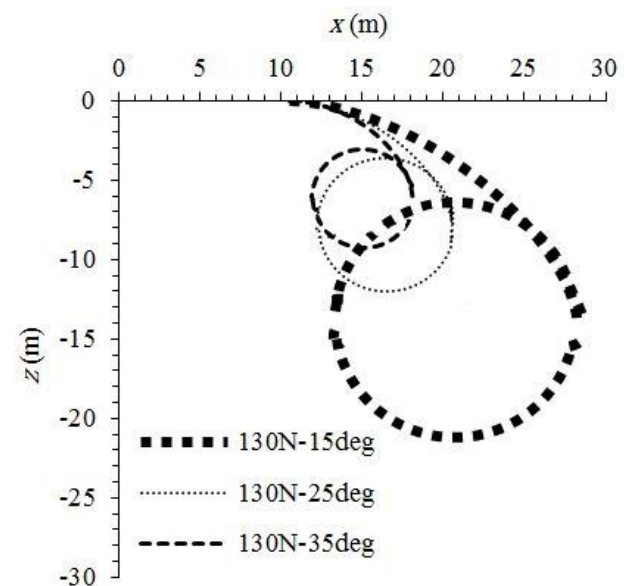


Fig. 11 Path of the Boat at Thrust 130

شکل 11 مسیر حرکت شناور در نیروی تراست 130 نیوتن

- in a high-speed planning hull using tunnels, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 51-59, 2014. (in Persian فارسی)
- [2] A. Najarian, R. Shafaghat, H. Kazemi Moghadam, Numerical modeling of turning circle maneuver of high-speed cougar boat using Ansys-CFX, *17th Conference on Marine Industries*, Kish, Iran, 2015. (in Persian فارسی)
- [3] K. Nomoto, K. Taguchi, K. Honda, S. Hirano, On the steering quality of ships, *International Shipbuilding Progress*, Vol. 4, pp. 354-370, 1957.
- [4] R. Yousefi, R. Shafaghat, M. Shakeri, Hydrodynamic analysis techniques for high-speed planing hulls, *Applied Ocean Research*, Vol. 42, pp. 105-113, 2013.
- [5] E. Revestdio, F. J. Velasco, T. M. Rueda, E. Moyano, E. Lopez, L.A Esquibel, Turning circles of an autonomous high speed craft model, *Proceedings of the 5th WSEAS international conference on System Science and Simulation in Engineering*, Tenerife, canary Islands, Spain, pp. 89-94, 2006.
- [6] D. Pourshams, H. zeraatgar, H. ghasemi, H. javadi, A. Dehghanian, Design, manufacturing and installation of registration system of the maneuver of the high speed vessels, *12th Conference on Marine Industries*, Zibakenar, Iran, 2010. (in Persian فارسی)
- [7] A. Honaryar, S. H. Mousavizadegan, H. Ghassemi, Simulation of turning circle maneuver of a catamaran planing boat with a combined experimental and numerical method, *10th symposium on high speed vehicle*, Naples, Italy, 16-17 October, 2014.
- [8] M. R. Javanmardi, M. S. Seif, H. Sayadi, Simulation maneuver of the boat, *11th Conference on Marine Industries*, Kish Island, Iran, 2009. (in Persian فارسی)
- [9] Sh. Wang, Yumin. S, Xi. Zhang, J. Yang, RANSE simulation of high-speed planing craft in regular waves, *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 11, Issue 4, pp. 447-452, 2012.
- [10] H. Kazemi Moghadam, R. Shafaghat, R. Yousefi, Numerical investigation of the tunnel aperture on drag reduction in a high-speed tunneled planing hull, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 37, Issue 6, pp. 1719-1730, 2015.
- [11] H. Kazemi Moghadam, R. Shafaghat, Numerical investigation on the effect of tunnel height on drag reduction in a high speed trimaran, *International Journal of Maritime Technology*, Vol. 5, pp. 55-62, 2016.
- [12] F.R. Menter, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605, 1994.
- [13] T. Katayama, T. Taniguchi, H. Fujii, Y. Ikeda, Development of maneuvering simulation method for high speed craft using hydrodynamic forces obtained from model tests, *10th International Conference on Fast Sea Transportation*, Athens, Greece, pp. 477-489, October 2009.
- [14] S. Hajizadeh, M.S. Seif, H. Mehdigholi, Evaluation of planing craft maneuverability using numerical modeling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 15, pp. 89-96, 2015. (in Persian فارسی)

این مقاله به شرح زیر ارائه می‌شود:

- 1- مدل‌سازی حرکت جسم به کمک شبکه متصل به بدنه صورت گرفت. مهم ترین مزیت این روش در مقایسه با روش بازتولید شبکه، افزایش دقت و سرعت محاسبات است.
- 2- با افزایش نیروی تراست در مسیر مستقیم، شاهد افزایش تریم و موقعیت مرکز ثقل نسبت به سطح آب به ترتیب برابر با 2.29 درجه و 22 سانتی‌متر بوده که نشان‌دهنده تغییر مود حرکتی شناور از جابه‌جایی به پروازی در اثر افزایش نیروی تراست است.
- 3- با توجه به نتایج به دست آمده، با افزایش زاویه سکان، شعاع چرخش پایا و قطر تاکتیکی، کاهش می‌یابد که به معنای افزایش قدرت مانور شناور است. در واقع نسبت قطر تاکتیکی به طول شناور با افزایش زاویه سکان رابطه عکس دارد و هر چه این نسبت کمتر باشد قدرت مانورپذیری شناور افزایش می‌یابد. با مقایسه مسیر حرکتی شناور در نیروهای تراست مختلف، قدرت مانور بهتر شناورهای تونل‌دار با نزدیک شدن به مود پروازی قابل رویت است.
- 4- با توجه به نتایج به دست آمده، با افزایش نیروی تراست در زاویه سکان 15 درجه شاهد افزایش 13.8 درصدی زاویه رول بوده و این درصد افزایش در زاویه سکان‌های 25 درجه و 35 درجه مقدار 7.69 و 6.66 درصد است که نشان‌دهنده نزدیک شدن زاویه رول به میزان ماکزیمم خود در مانور دایره ای است. همچنین نتایج حاکی از تاثیرگذاری بیشتر زاویه سکان نسبت به نیروی تراست بر روی زاویه رول است.
- 5- شعاع چرخش در تغییر زاویه سکان از 15 درجه به 25 درجه با کاهش تقریبی 41 درصدی و تغییر آن از 25 درجه به 35 درجه با کاهش تقریبی 26 درصدی همراه بوده است. بنابراین هرچه شناور به میزان ماکزیمم زاویه سکان نزدیک شود، تغییرات شعاع چرخش و در نتیجه آن قطر تاکتیکی به میزان کمتری تغییر می‌کند.

#### 7- تقدیر و تشکر

بدینوسیله از گروه انرژی‌های دریایپاوه دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل که با در اختیار گذاشتن امکانات و تجهیزات، ما را در انجام این تحقیق پشتیبانی نمودند، صمیمانه تشکر می‌شود.

#### 8- مراجع

- [1] A. Yousefi, R. Shafaghat, M. Mohebbi, A. Ramiar, Drag reduction