# بررسی محاسبه مقاومت بدنه زیردریایی در مقیاسهای مختلف به روش عددی

سجاد اردشیری (\* ، مجتبی دهقان منشادی ۲ ، علی جبار رشیدی ۳

<sup>۱</sup> دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مکانیک ،<u>sajjad\_ardeshiri@yahoo.com</u> ۲ عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر، <u>dehghanmanshadi@gmail.com</u> ۳ عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر، <u>aiorashid@yahoo.com</u>

طلاعات مقاله	چکیدہ
<i>تاریخچه مقاله:</i> تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۰۹ ۱۴۰۳/۰۵/۰۹	یکی از موضوعات مهم در طراحی یک زیردریایی محاسبات مقاومت و توان آن میباشد. در استخراج ضرایب مقاومت یک زیردریایی، هنوز محاسبه و تعمیم نتایج از یک مدل مقیاس شده به شناور اصلی به صورت یک چالش علمی مطرح میباشد. در این مطالعه، تاثیر مقیاس در روش عددی بر روی ضرایب مقاومت یک زیردریایی شامل ضرایب بقایر ترکل ام ماکاک و فشام به بش شرایای مددم برد و بر مقال گفته است میچناند.
کریخ اندسار مقاند ۲۰ (۵۰ ۲۰۱۹ ک <i>لمات کلیدی:</i> مقیاس ضرایب هیدرودینامیکی	مفاومت کن، اصطحاحی و قساری به روش سبیهشاری عددی مورد بررشی قرار کرفته است. همچنین دفت کنایج روابط تجربی موجود جهت محاسبه ضرایب مقاومت زیردریایی ارزیابی شده است. مدل زیردریایی سابوف برای انجام مطالعات استفاده گردید. نتایج نشان میدهد که روابط تجربی موجود، محاسبه ضریب اصطکاکی را با خطای کمتر از ۱۰ درصد، ضریب فشاری را با خطای کمتر از ۳۰ درصد، و ضریب درگ کل را با خطای کمتر از ۸/۵ درصد ممکن میسازد.
سابور ریزمنت کی سابوف بررسی عددی	

## Investigating the changes of the submarine bare-hull resistance in different scales by CFD method Sajjad Ardeshiri<sup>1\*</sup>, Mojtaba Dehghan Manshadi<sup>2</sup>, Ali Jabar Rashidi <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology; sajjad\_ardeshiri@yahoo.com
 <sup>2</sup> Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology; dehghanmanshadi@gmail.com
 <sup>3</sup> Faculty of Electrical Engineering, Malek Ashtar University of Technology; aiorashid@yahoo.com

## **ARTICLE INFO**

Article History: Received: 11 May 2024 Accepted: 30 Jul 2024 Available online: 30 Jul 2024

Keywords: Scale Hydrodynamic Coefficient Under water vehicle SUBOFF Numerical Investigation

## ABSTRACT

One of the most important issues in designing a submarine is calculating its resistance and power. It is still a scientific challenge to calculate and generalize the results from a scaled model to the main vessel. In this study, the effect of the scale in a numerical method on the resistance coefficients of a submarine, including the total, friction and pressure resistance coefficients, has been investigated by numerical simulation method. Also, the accuracy of the results of the existing empirical relationships for calculating submarine resistance coefficients has been evaluated. The SUBOFF submarine model was used to conduct studies. The results show that the existing empirical relationships enable the calculation of the friction coefficient with an error of less than 10%, the pressure coefficient with an error of less than 30%, and the total drag coefficient with an error of less than 8.5%.

حوضچه کشش میتواند بر روی یک مدل کوچک از شناور انجام شود و سپس نتایج حاصل از ابعاد مدل به ابعاد اصلی شناور برونیابی میشود [2]. برای این امر نیاز به روش برونیابی مناسبی مانند رویهها و توصیههای کنفرانس بین المللی حوضچه کشش میباشد [3]. همچنان برونیابی نتایج شناور مدل به ابعاد اصلی یک چالش علمی میباشد، زیار که جریان اطراف بدنه و ۱- مقدمه

پیش بینی مقدار مقاومت شناورهای سطحی و زیرسطحی یکی از مهمترین مراحل در حلزون طراحی میباشد. بطور کلی این پیشبینی میتواند از سه طریق روش های نیمه تجربی، شبیه سازی های عددی و تست آزمایشگاهی در حوضچه کشش انجام پذیرد [1]. شبیه سازی های عددی و تست آزمایشگاهی

پروانه دارای خواص متفاوتی در ابعاد مدل و اصلی میباشند. چالش اصلی و شناخته شده، جهت تعمیم نتایج بین مدل و ابعاد اصلی، الزامات تئوری تشابه دینامیکی (رینولدز و فرود) است، زیرا که قابلیت اجرا بطور همزمان در حوضچه کشش را ندارند. در نتیجه محققین دریایی در تلاش برای بهبود اثر مقیاس هستند [4] [5].

امروزه، روشهای سیستماتیک آزمایشهای حوضچه کشش و روشهای تجربی برای محاسبه و پیش بینی مقدار مقاومت و توان لازم سیستم رانش در مراحل طراحی استفاده میشود. همچنین، روشهای دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۲</sup> به خوبی گسترش یافته اند و در فرآیند طراحی قابل استفاده میباشند [6]. با افزایش دقت روشهای عددی و بهبود اعتبار سنجی آنها در ابعاد مدل، این قابلیت بوجود آمده است تا این روشها برای شناور در ابعاد عملیاتی واقعی نیز استفاده شوند و اثر مقیاس، شناسایی و حذف شود. با این حال، اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی عددی شناور در ابعاد اصلی به دلیل عدم دستر سی به داده های آزمایش دریا<sup>۲</sup>.

در آزمایشات دریایی، چه در حوضچه کشش و چه در تونل آب، باید ابعاد اصلی شناور مدل شده و در مقیاس کوچکتری مورد مطالعه قرار بگیرد. برای مطالعه مدل نیاز به تعمیم سرعت شناور می باشد. در این خصوص نیاز به یافتن روشی برای اطمینان از صحت نتايج بدست آمده از مدل و تعميم آن به ابعاد شناور اصلى می باشد. مطالعه رفتار و پارامترهای مدل به دو صورت آزمایشگاهی و عددی انجام می شود که در هر دو صورت نیاز به استفاده از روابطی برای تعمیم میباشد [8]. مبنای تشابه در زيرسطح آب عدد رينولدز مي باشد كه دست يابي آن براي شناورهای بزرگ در بسیاری از موارد غیر ممکن میباشد. برای مقایسه قابلیتهای شبیهسازی عددی شناور در ابعاد اصلی در قیاس با آزمایش دریا، کنفرانسی توسط موسسه رده بندی لویدز با همکاری موسسات صنعتی و تحقیقاتی به همراه مراکز دانشگاهی مختلف برگزار شد [9]. مونسان و همکاران مطالعات جامعی روی طراحی شکل بدنه زیردریایی انجام دادند [25-10] که بخشی از آنها بر اساس مدلسازی عددی [10-13] بود. همچنین اثرات عمق بر مقاومت هیدرودینامیکی بدنه زیردریایی توسط آنها انجام شده [14-19] و تخمين مقاومت انواع مختلفي از غوطهور شوندهها بر اساس شكل أنها تحليل شده است [25-20]. برخى مطالعات أنها نیز بر اساس تستهای تجربی در حوضچه کشش بوده است [19,20,23]. با این حال پژوهشهای اندکی در رابطه با بررسی اثر مقياس انجام شده است و بطور عمده دادهها از شناور در ابعاد مدل برونیابی و استفاده میشود. در این مطالعه اثر ابعاد بر روی نتایج مقاومت بدنه زیردریایی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت

اعتبارسنجی و اطمینان از صحت دادهها، ابتدا شبیهسازی عددی برای مدل شناور زیر سطحی سابوف با ابعاد اصلی، که مقادیر آزمایشگاهی آن موجود میباشد، انجام شده است. سپس با تغییر ابعاد مدل در مقیاسهای مختلف، نتایج حاصل از تغییر ابعادی بدست آمده است. با بررسی نتایج مقاومت و ضرایب مقاومت بدست آمده است. با بررسی نتایج مقاومت و ضرایب مقاومت مقاومت در سرعتهای پیشروی متفاوت بررسی و مقایسه شده است.

۲- معادلات حاکم

۲-۱- مقاومت شناور

(7)

مقاومت کل شـناور دارای دو مولف مقاومت فشـاری و باقیمانـده است. در این صورت مولفه های مقاومت شناورها به صورت معادلـه (۱) خواهند بود [26].  $R_T = R_p + R_r$ 

در این معادله R<sub>p</sub> مقاومت فشاری و R<sub>r</sub> بیانگر مقاومت باقی مانده اســت کــه متشــکل از دو مولفــه مقاومــت مــوج ســازی و ویسکوز(اصطکاکی) میباشد [26].

$$R_r = R_w + R_f$$

در شناورهای زیرسطحی بدلیل مغروق بودن شناور و عدم وجود سطح آزاد مولفهی مقاومت موج سازی صفر در نظر گرفته می شود. در این صورت مقدار مقاومت کل شناور زیر سطحی متشکل از دو مولفه مقاومت فشاری  $R_p$  و ویسکوز  $R_f$  خواهد بود [26].

 $R_T = R_f + R_p$  (۳) با بیبعد سازی مقادیر مقاومت می توان به ضرایب مقاومت رسید. برای این این کاف مقادی مقادمت معادای (۳) مای مقارمت ر

$$\frac{1}{2}\rho A_w V^2 \tag{f}$$

$$ho$$
 چگالی سیال،  $A_w$  سطح خیس بدنیه و  $V$  سرعت شیاور  $ho$  میباشد. بدین ترتیب خواهیم داشت [27]: $R_T$   $R_f$   $R_p$ 

$$\frac{A_{I}}{\frac{1}{2}\rho A_{w}V^{2}} = \frac{A_{I}}{\frac{1}{2}\rho A_{w}V^{2}} + \frac{A_{I}\rho}{\frac{1}{2}\rho A_{w}V^{2}}$$
( $\delta$ )

$$C_T = C_f + C_p \tag{9}$$

$$C_p = \frac{R_P}{0.5\rho A_w V^2} \tag{Y}$$

$$C_f = \frac{R_f}{0.5\rho A_w V^2} \tag{(A)}$$

Downloaded from marine-eng.ir on 2025-09-01

در معادله (۶)  $C_T$  ضریب مقاومت کل میباشد که برابر با جمع  $C_f$  ضریب مقاومت ویسکوز (اصطکاکی) و  $C_f$  ضریب مقاومت ویسکوز در معادله فشاری است. با فاکتور گیری از ضریب مقاومت ویسکوز در معادله (۶) می توان به مولف  $K = \frac{Cp}{c_f}$  که فاکتور فرم بدنه نامیده می شود، رسید [27].

$$C_T = C_f \left( 1 + \frac{C_p}{C_f} \right) \tag{9}$$

$$C_T = C_f (1 + K) \tag{(1)}$$

## ۲-۲- روابط تشابه

برای آزمایش های تجربی در حوضچه دریایی دو تشابه فرود Fn و رینولدز Re وجود دارد. تشابه رینولدز بدلیل افزایش سرعت شناور مدل قابل تامین نیست[5] .

$$Re_{M} = Re_{S} \tag{(11)}$$

$$\frac{V_M L_M}{\vartheta_M} = \frac{V_S L_S}{\vartheta_S} \tag{11}$$

در تشابه فرود سرعت شناور مدل نسبت به ابعاد اصلی برابر با رابطه(۱۴) است [28]:

$$Fn_M = Fn_S \tag{(17)}$$

$$V_M = V_S \sqrt{\frac{L_M}{L_S}} \tag{14}$$

#### ۲-۳- روش های تجربی تحلیلی محاسبه مقاومت کل بدنه

در این بخش دو روش جهت محاسبه ضریب مقاومت بدنه زیردریایی ارائه شده است. در این دو روش، مقاومت کلی زیردریایی بر اساس ضریبی از مقاومت اصطکاکی میباشد. شرط استفاده از این روشها به صورت زیر است:

نسبت طول به قطر بدنه در محدوده مطابق بــا رابطــه (۱۵) باشــد [29].

$$5 < \frac{L}{D} < 7 \tag{1a}$$

و عمق حرکت (h) زیردریایی مطابق با رابطه (۱۶) بیش از ۵ برابر قطر بدنه باشد.

$$h \ge 5D$$
 (19)

اگر شروط فوق برقرار باشد طی مراحل زیـر مقاومـت بدنـه بـدون  
ملحقات زیردریایی محاسبه میگردد.  
روش اول: طبـق روابـط (۱۷) و (۱۸) ضـریب مقاومـت کـل 
$$C_T$$
 و  
ضریب فرم بدنه  $K$  قابل محاسبه است [29].  
 $C_T = C_F \left(1 + \left(\frac{D}{L}\right) + 1.5 * \left(\frac{D}{L}\right)^3\right)$ 

$$K_{1} = \left(\frac{D}{L}\right) + 1.5 * \left(\frac{D}{L}\right)^{3}$$
(۱۸)  
روش ۲ :که ضریب مقاومت کل  $C_{T}$  و ضریب فرم بدنه  $K$  از روابط  
(۱۹) و (۲۰) قابل محاسبه است [29].

$$C_T = C_F \left( 1 + 1.5 * \left(\frac{D}{L}\right)^{1.5} + 7 * \left(\frac{D}{L}\right)^3 \right)$$
 (19)

$$K_{2} = 1.5 * \left(\frac{D}{L}\right)^{1.5} + 7 * \left(\frac{D}{L}\right)^{3}$$
 (7.)

ضریب مقاومت اصطکاکلی را می توان از روابط زیر برای صفحه تخت محاسبه کرد. معادله (۲۱) روش تجربی بلازیوس آمیباشد [30]. این رابطه برای محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی صفحه تخت است.

$$C_{\rm f} = \frac{1.328}{\sqrt{R_{\rm e}}} \tag{(1)}$$

رابطه پرانتل<sup>\*</sup>(۲۲) برای محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی در محدوده عدد رینولدز  $10^7 < Re < 10^7 \times 5$  بصورت زیر است [31].

$$C_f = \frac{0.072}{\frac{1}{p^{\frac{1}{5}}}}$$
(77)

الشد مىتوان از رابطە تعميم يافتـه 5 × 10<sup>5</sup> < Re < 10<sup>8</sup> يرانتل-شليختينگ أستفادە كرد [33] [32].

$$C_f = \frac{0.074}{R_e^{\frac{1}{5}}} - \frac{1700}{R_e} \tag{(TT)}$$

بـــرای جریانهـای آشـفته در محـدوده رینولـدز 10<sup>9</sup> جریانهای آشـفته در محـدوده رینولـدز 10<sup>6</sup> < Re < 10<sup>9</sup> رابطـه شـلیختینگ<sup>(۲۴)</sup> کـاربرد دارد [34].

$$C_f = \frac{0.455}{(\log(R_e))^{2.58}} \tag{(14)}$$

رابطه پرکاربرد آیتیتیسی-۵۷<sup>۷</sup>که توسط آزمایش مدل شناور  
در حوضچه کشش بدست آمده نیز بصورت زیر است [35].  
$$C_f = \frac{0.075}{[\log(R_e) - 2]^2}$$

۲-۴- معادلات اساسی حاکم بر جریان سیال معادلات حاکم بر مسئله، معادله پیوستگی و معادلات رنـز<sup>۸</sup>بـرای حالت ناپایای سه بعدی با سـیال غیرقابـل تـراکم هسـتند. معادلـه پیوستگی بصورت زیر می باشد [36]: ∂U<sub>i</sub>

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \tag{(77)}$$

سرعت U می تواند بصورت میانگین سرعت و سرعت نوسانی بیان

شود:
$$U_i = \overline{U}_i + u_i'$$
 (۲۷)

معادله ممنتوم بصورت زير قابل ارائه است [36]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left[ \nu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j}$$
(7A)

در این مطالعه بدلیل اینکه تمام شبیه سازیها بصورت پایا انجام شده است. عبارت زمانی اول بکارگرفته نشده است. در معادلات ممنتوم،  $U_i$  معادل سرعت میانگین و  $u'_i$  معادل سرعت متغیر نوسانی در جهت مختصات کارتزین  $x_i$  است. P بیان کننده فشار میانگین،  $\rho$  چگالی و v لزجت سینماتیکی سیال است.

k -برای شبیه سازی دقیق جریان حول شناور از مدل اغتشاشی k ج  ${\mathcal B}$  استفاده شده است. در طی شبیه سازی، تنسور تنش رینولدز بصورت معادله (۲۹) محاسبه می شود[32] :

$$\overline{u_i'u_j'} = -\nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_J}{\partial x_i}\right) + \frac{2}{3}\delta_{ij}k \tag{(19)}$$

در این معادلـه، عبـارت  $v_t$  ادی ویسکوزیتی هسـت کـه بصـورت  $v_t = \frac{C_\mu K^2}{\varepsilon}$  تعریف می شود بطوری که  $\mathcal{L}_\mu$  یک ثابت بـدون بعـد با مقـدار ( $\mathcal{L}_\mu = 0.09$ ) اسـت. و عبـارت k انـرژی سـینماتیکی اغتشاشی و  $\varepsilon$  نرخ اضمحلال اغتشاشی<sup>†</sup>سـت. عـلاوه بـر معـادلات پیوستگی و تکانه، دو معادله (۲۰) و (۳۱) جابجـایی بـرای بدست آوردن عبارات k و  $\varepsilon$  حل میشود[34] :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (kU_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_J} \right]$$

$$+ P_k - \epsilon$$
(7.)

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial (kU_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$$
(71)

توضیحات بیشتری در مورد مدل اغتشاشی  $k - \varepsilon$  را می توان در مطالعات ویلوکس طالعه کرد [37].

۲–۵- پایداری شبکه محاسباتی

در این مطالعه، طبق توصیه ITTC روش پایداری حل جیسیآی (GCI) بکار گرفته شده است. این روش اولین بار توسط روچ <sup>۲</sup>معرفی شد که بعدا توسط سایر مطالعات بهبود یافت. رویه به کار گرفته شده در این پژوهش به اختصار در زیر توضیح داده شده است [38] [39].

پارامتر های  $h_1,h_2,h_3$  طول شبکه در نظر گرفته شـده انـد بـه گونه ای  $h_1 < h_2 < h_3$  اسـت. معیارهـای بهبودسـازی شـبکه بصورت معادله (۳۲) تعریف می شوند:

$$r_{21} = \frac{h_2}{h_1}, r_{32} = \frac{h_3}{h_2} \tag{(77)}$$

طبق تجربه این پارامتر های بهبودسازی باید بزرگتر از ۱٫۳ در نظر گرفته شوند. این پارامتر در این مطالعه بر مبنای مطالعات پیشین  $\sqrt{2}$  در نظر گرفته شده است [40] [41].

بدلیل الگوریتم شبکه بندی، تعداد سلولهای شبکه محاسباتی در محاسبات پارامترهای بهبودسازی شبکه وارد شده است. این انتخاب در مطالعات پایداری حل بخصوص برای شبکه های نامنظم، لازم و ضروری است. بدین منظور این مقادیر بصورت معادله (۳۳) استفاده شدهاند[39] :

$$r_{21} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{\frac{1}{3}}, r_{32} = \left(\frac{N_2}{N_3}\right)^{\frac{1}{3}}$$
 (77)

اختلاف بین تعداد شبکه تولید شده(۶)، می تواند از معادلـه (۳۴) محاسبه شود:

$$\epsilon_{21} = X_2 - X_1, \epsilon_{32} = X_3 - X_2 \tag{(74)}$$

شرط پايدارى  ${
m R}$  مى تواند بصورت معادله (٣۵) تعريف شود.

$$R = \frac{\epsilon_{21}}{\epsilon_{32}} \tag{(a)}$$

اگر این پارامتر دارای مقادیر 0 > R > 1 -باشد، حل دارای همگرایی نوسانی است. در صورتی که مقادیر این پارامتر بصورت 0 < R < 1 باشد، حل دارای همگرایی پایدار می باشد. در صورتی که مقادیر این پارامتر بصورت 1 - R > R یا 1 < Rباشد، حل نا همگرا می باشد.

در صورتی که همگرایی شبکه انجام شود، برون یابی ریچاردسون<sup>۱۴</sup> برای محاسبه نرخ همگرایی مورد استفاده قرار میگیرد. تخمین بصورت زیر انجام می شود[39] .

$$P = \frac{ln(\frac{\epsilon_{i-1,i}}{\epsilon_{i,i+1}})}{lmr} \tag{(79)}$$

در معادله (۳۶) ۲ بیانگر ضریب بهبود شـبکه مـی باشـد. شـاخص همگرایی شبکه جیسیآی طبق معادله (۳۷) تعریف می شود.

$$GCI_{i,i+1} = F_S \frac{|e_{i,i+1}|}{r^P - 1}$$
(77)

پارامتر  $F_S$  ضریب اطمینان می باشد که به توصیه مطالعات روچ برای بررسی همگرایی شبیهسازی با حداقل سه شبکه مختلف e دارای مقدار  $F_S = 1.25$  می باشد. در معادله (۳۷) پارامتر

نشان دهنده خطای نسبی بین دو شبکه می باشد که طبق معادلـه (۳۸) قابل محاسبه می باشد[39] .

$$e_{i,i+1} = \frac{X_i - X_{i+1}}{X_{i+1}} \tag{(TA)}$$

پارامتر جیسیآی بیانگر اختلاف مقدار محاسبه شده و مقدار دقیق متغیر میباشد. به عبارت دیگر پارامتر جیسیآی متغیری برای بیان تغییرات مقدار محاسبه شده در قیاس با بهبودسازیهای بیشتر شبکه می باشد. هر چقدر این مقدار کمتر باشد، بیانگر این است که مقدار محاسبه شده بصورت عددی در بازه مقدار دقیق متغیر می باشد.

## ۳- شبیه سازی

#### ۳-۱- مشخصات هندسی زیردریایی مدل

مدل شناور زیر سطحی سابوف بطور گسترده بعنوان مرجعی قابل اطمینان برای مطالعات عددی و آزمایشگاهی در حوزه زیر سطحی استفاده می شود. در این مطالعه مدل بدون ملحقات آن استفاده شده است. مشخصات هندسی این مدل در جدول ۱ ذکر شده است [42].

مشخصات هندسی مدل شناور سابوف [42]	-١	جدول
-----------------------------------	----	------

مقدار	مشخصه
4,808	طول [m]
۰ ,۵۰ ۸	قطر [m]
۵,۹۸۹	$[m^2]$ مساحت سطح خیس
٠,۶٩٩	حج <sub>م</sub> [m <sup>3</sup> ]
7,7744	مرکز شناوری از پاشنه [m]

هندسه ترسیم شده شناور سابوف بصورت شکل ۱ میباشد.



**شکل ۱ – هندسه شناور مدل سابوف بدون متعلقات** در جدول ۲ و شکل ۲ به ترتیب نسبت ابعادی مختلـف بـه همـراه مشخصات هندسی و شکل مربـوط بـه آن بـرای مـدل زیردریـایی

سابوف که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است ارائه شده است. نسبتهای در نظر گرفت ه شده به ترتیب ۱، ۵،۰۰، ۰٫۲۵ و ۱۲۵۵ برابر نمونه اصلی مدل سابوف میباشد.

#### جدول ۲- مشخصات هندسی نسبت ابعادی مختلف

مرکز شناوری	حجم	مساحت سطح	قطر	طول	مقياس
از پاشنه [ <i>m</i> ]	$[m^{3}]$	خيس [m <sup>2</sup> ]	[m]	[m]	
• ,• ۶٧٣		• ,• 9864	• ,• ۶۳۵	• ,۵۴۴۵	۰,۱۲۵
۰٫۵۸۵۹		•,٣٧۴•	•,177•	١,٠٨٩٠	۰,۲۵۰
١,١٧١٨		1,4980	• ,754•	۲,۱۷۸۰	۰ ,۵۰۰
2,8470		۵,۹۶۶۰	۰٫۵۰۸۰	4,8080	۱,۰۰
				1	.000 <i>L</i>
					).500 <i>L</i>
				(	).250 <i>L</i>
				(	).125 <i>L</i>

شکل ۲ – ابعاد مختلف شناور های مقیاس شده

## ۳-۲- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

دامنه محاسباتی طبق توصیه ITTC [43] برای محاسبه مقاومت و جریان حول شناور انتخاب شده است. درشکل ۳ می توان ابعاد دامنه محاسباتی و شرایط مرزی اعمال شده را مشاهده کرد. شرایط مرزی و اولیه مناسب، تاثیر به سزایی در حل عددی یک مساله دارد. شرط مرزی مناسب باعث بالا رفتن دقت حل و کم شدن هزینه محاسبات می شود. همچنین شرایط مرزی باید بگونهای انتخاب شوند که کمترین تاثیر را بر حل مسئله عددی داشته باشند.

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود، شرط مرزی بالا دست دامنه بعنوان ورودی سرعت و شرط مرزی پایین دست دامنه بعنوان خروجی فشار در نظر گرفته شده است. شرط مرزی بدنه شناور زیر سطحی دیواره بدون لغزش در نظر گرفته شده است، که بدین معناست که مولفه سرعت (سرعت کل) بر روی بدنه برابر صفر می باشد. مابقی شرایط مرزی بدلیل تقارن، شرط مرزی تقارن در نظر گرفته شده اند.



#### شکل ۳ – ابعاد دامنه محاسباتی نسبت به طول بدنه نوع شرایط مرزی دامنه محاسباتی

به منظور ایجاد حجم کنترلی برای محاسبات از شبکه تریمر<sup>۱۶</sup> استفاده شده است. الگوریتم شبکه تریمر برای ایجاد سلول های شش وجهی استفاده شده است. دامنه محاسباتی با المانهای شش وجهی، بصورتی که در نواحی نزدیک بدنه دارای تراکم بیشتری میباشد، ایجاد شده است. نمایی از این شبکه در شکل ۲ بیشتری میباشد، ایجاد شده است. نمایی از این شبکه در شکل ۲ این تنظیم شده است که مقدار میانگین متغیر + ۲ بر روی بدنه شناور بطور متوسط بین ۶۰ تا ۱۷۵ برای تمام سرعتهای پیشروی است.



شکل ۴ – نمایی از شبکه بندی ایجاد شده در دامنه محاسباتی

۳-۳- مطالعات استقلال از شبکه، همگرایی و پایداری در این بخش مطالعات استقلال از شبکه شامل صحت سنجی و پایداری حل پرداخته شده است. در مطالعه حاضر بر روی هر شبیهسازی معیارهای پایدرای، استقلال نتایج از تعداد المانهای شبکه مورد بررسی قرار گرفت. جهت خلاصهسازی تنها مقادیر مربوط به نسبت ابعادی یک به یک ارائه شده است.

#### ۳-۳-۱- استقلال از شبکه

شش نمونه شبکه بندی مختلف بر روی مدل زیردریایی سابوف ایجاد شد و مقدار خطای نسبی مقدار مقاومت بدست آمده، محاسبه گردید. در شکل ۵ میتوان خطای نسبی حاصل از شبکهبندیهای ایجاد شده را مشاهده کرد. با توجه به نتایج مشخص میشود که تغییرات بعد از مش ۵ ( ۵۲۹۵۴۸ سلول) تقریبا ثابت بوده و میتوان گفت مستقل از تعداد شبکه میباشد.



شکل ۵ – خطای نسبی مطالعه شبکه محاسباتی برای شش شبکه با تعداد المانهای متفاوت

#### ۴-۳-۴- همگرایی و پایداری حل

مطابق با نتایج حاصل نشان داده شده در شکل ۵، سه شبکه محاسباتی برای بررسی معیارهای همگرایی و پایداری طبق جدول ۳ استفاده شد.

جدول ۳ – تعداد سلول های شبکه محاسباتی برای تحلیل عدم قطعیت

خطای نسبی	C <sub>T</sub>	R <sub>T</sub>	تعداد سلول ها	کیفیت شبکه	شماره شبکه
۰,۶۶ <sup>.</sup> /	•,••٣١٨•٩۴۵	٨٧,٩٨	314400	ضعيف	٣
•,٣٣٪	•,••٣١۶٧٢•۶	۸۷,۶۰	529541	متوسط	٢
•,14%	•,••۳1۶۴۳۵۷	۸۷,۵۲	988990	خوب	١

با توجه به مقادیری که در جدول ۳ ارائه شده شرط همگرایی (R) برابر با ۰٫۲۱ برای نسبت ابعادی یک به یک محاسبه شده، که بدین معناست که حل دارای پایداری می باشد.

#### ۳-۴- اعتبارسنجی

برای مدل یک به یک با شبکه بندی با کیفیت خوب، نتایج مقاومت در سرعتهای مختلف و مشابه با مقادیر آزمایشگاهی استخراج گردید. مقایسه نتایج تجربی و شبیهسازی عددی بهمنظور اعتبار سنجی در جدول ۴ قابل مشاهده است. نتایج نشان دهنده آن است که مقدار خطای محاسبه شده کمتر از ۵ درصد در سرعتهای مختلف می باشد.

## جدول ۴ – مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی در نسبت ابعادی یک به یک و در سرعتهای مختلف

درصد خطا	مقاومت آزمایشگاهی	مقاومت عددى	سرعت
[%]	[N]	[N]	[ <i>m</i> / <i>s</i> ]
۰,۱۴	٨٧,۴٠	۸۷,۵۲	۳,۰۴۵
4,80	747,70	221,18	0,144
۴,۳۰	۳۳۲,۹۰	318,84	۶,· ۹۶
4,80	401,00	42.14	٧,١٧۶

۳,۰۰	۵۷۶,۹۰	۵۵۹,۳۳	٨,٢٣١
۲,۲۰	۶۹۷,۰۰	۶۸۱,۷۶	9,149

#### ۴- نتایج شبیه سازی عددی

همانطور که قبلا اشاره گردید، نسبتهای در نظر گرفته شده به ترتیب ۱، ۵.۹، ۲۵، ۹۲۰ و ۱۲۵۵ برابر نمونه اصلی مدل سابوف میباشد. سرعتهای تحلیل نتایج نیز با توجه به محدوده عملیات زیرسطحیهای بین ۱ تا ۲۰ متر بر ثانیه در نظر گفته شده است. در شکل ۶ مقادیر مقاومت کل  $R_T$  و ضریب مقاومت کل  $C_T$  بر حسب عدد رینولدز ارائه شده است. کوچکترین مقیاس دارای کمترین مقدار مقاومت و عدد رینولدز میباشد. با افزایش مقیاس افزایش یافته است. نمودار مقاومت کل برای هر مقیاس روند مشابهی را دنبال می کنند و در مقادیر عددی رینولدز یکسان، به خوبی هم پوشانی دارند. بنابراین میتوان این نتیجه را گرفت در صورتیکه شبیه سازی با دقت مناسبی انجام شود، با مدل های کوچکتر و در سرعتهای کمتر و با تعداد المان شبکهبندی کمتر ضریب مقاومت کل با دقت مناسب است.



شکل ۶ – نمودار مقادیر مقاومت و ضریب مقاومت کل بر حسب عدد رینولدز

#### برای مقیاسهای مختلف

مقادیر بدست آمده ضریب مقاومت اصطکاکی بر مبنای عدد رینولدز برای نسبتهای ابعادی مختلف در شکل ۷ ارائه شده است. همانگونه که از شکل ۷ مشخص می شود با افزایش عدد رینولدز مقادیر ضریب مقاومت اصطکاکی کاهش می یابد. همچنین می توان مشاهده نمود که روند تغییرات در نسبتهای ابعادی مختلف تقریبا مشابه و در مقادیر رینولدز مشابه تقریبا یکسان می باشد.



شکل ۷ – نمودار ضریب مقاومت اصطکاکی بر حسب عدد رینولدز در مقیاس های متفاومت

در جدول ۵ میانگین نسبت مقاومت اصطکاکی و فشاری به مقاومت کل در مقیاسهای متفاوت که در سرعتهای مختلف محاسبه شده، ارائه شده است. نتایج نشان میدهد که تقریبا ۹۰ درصد مقاومت بدنه بدون ملحقات شناور زیرسطحی مقاومت اصطکاکی و حدود ده درصد آن را مقاومت فشاری، تشکیل میدهد.

جدول ۵ - نسبت مقاومت اصطکاکی و فشاری به مقاومت کل در مقیاسهای ۱۰۰ -

نسبت مقاومت فشارى به	نسبت مقاومت اصطكاكي به	مقياس
مقاومت كل [R <sub>p</sub> /R <sub>T</sub> ]	$[R_F/R_T]$ مقاومت کل	[_]
٧,٧٣	97,77	۱,۰۰۰
۸,۳۷	91,88	۰,۵۰۰
٨,۴٣	۹١,۵٢	۰,۲۵۰
٨,١١	٩١,٨٩	•,170

در شکل ۸ مقادیر مقاومت بر حسب سرعتهای مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل و نتایج مشخص شده در آن می توان اینگونه نتیجه گرفت که، در سرعتهای یکسان با افزایش ابعاد بدنه مقدار مقاومت افزایش یافته است. روند افزایش مقاومت با افزایش سرعت شناور در ابعاد بزرگتر بیشتر و در سرعتهای

کوچکتر کمتر میباشد. بنابر این الگو میتوان حرکت شناورهای زیرسطحی با سرعتهای کمتر، جهت دستیابی به برد بیشتر را توجیه نمود.



شکل ۸ – نمودار ضریب مقاومت کل برحسب عدد سرعت تغییرات ضریب مقاومت اصطکاکی بر حسب سرعت در شکل ۹ ارائه شده است. تغییرات نشان دهنده آن است که روند نمودار مقاومت اصطکاکی برای نسبت ابعادی مختلف با تغییرات سرعت تقریبا مشابه اما از نظر اندازه متفاوت میباشد به نحوی که در ابعاد بزرگتر مقدار ضریب اصطکاکی در سرعت مشابه نسبت به ابعاد کوچکتر، کمتر میباشد.



## شکل ۹ – نمودار ضریب مقاومت اصطکاکی بر حسب سرعت

در جدول ۶ ارتباط مقیاس با تعداد شبکه و زمان حل ارائه شده است. مشاهده می شود که با کاهش مقیاس، تعداد شبکه و زمان حل کاهش یافته است.

<b>جدول ۶ –</b> ارتباط مقیاس با تعداد شبکه و زمان حل				
	زمان حل[hr]	تعداد شبكه	مقياس[-]	
	۱۰,۵۲۷	۲۳۳۰۹۳	۰,۱۲۵	
	۱۲,۰۸۸	272611	۰,۲۵	
	14,788	3422.0	۵, ۰	
	22,480	٩۶٨٩۵۵	١	

#### ۵- نتایج روابط تجربی

در بخش ۲-۳، پنج رابطه تجربی بلازیوس، پرانتل، پرانتل-شلیختینگ، شلیختینگ و آیتی تی سی-۵۷ جهت محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی ارائه گردید. در نمودارهای شکل ۱۰، شکل ۱۱، شکل ۱۲، شکل ۱۳ مقادیر حاصل از این روابط در مقایسه با مقادیر تجربی و مقادیر خطای نسبی ضریب مقاومت اصطکاکی نسبت به مقادیر محاسبه شده از شبیه سازی عددی در سرعتهای مختلف، برای نسبت ابعادی ۱، ۵/۰، ۲//۰ و ۱/۱۲۵ نشان داده شده است. با بررسی نتایج می توان نتیجه گرفت که روابط تجربی پرانتل-شلیختینگ و آیتیتیسی-۵۷ از نظر دقت تقریبا یکسان میباشند و دارای خطای کمتر از ۱۰ درصد نسبت به نتایج شبیهسازی عددی هستند و کمترین خطا را نسبت به سایر روشها دارا میباشند. روشهای پرانتل و شلیختینگ با خطای کمتر از ۱۵ درصد قادر به تخمین ضریب مقاومت اصطكاكي هستند. رابطهي بلازيوس مقاديري با اختلاف زياد و خطای بیش از ۷۰ درصد را محاسبه کرده است. رابطه بلازیوس برای جریانهای آرام قابل کاربرد است به همین علت در هنگام استفاده برای جریانهای مغشوش باعث ایجاد خطای بسیار زیادی مىشود.



شکل ۱۱ – نمودار مقادیر ضریب مقاومت اصطکاکی و خطای محاسباتی در مقیاس ۵٫۵



شکل ۱۲ – نمودار مقادیر ضریب مقاومت اصطکاکی و خطای محاسباتی در مقیاس ۰٫۲۵







شکل ۱۴ – نمودار فاکتور فرم برحسب رینولدز

برای محاسبه مقاومت فشاری مطابق با رابطه (۱۰) می توان از فاکتور فرم بدنه K استفاده نمود. در بخش ۲-۳ روابط تجربی محاسبه فاکتور فرم بدنه ارائه شده است. با توجه به اینکه این روابط بر مبنای نسبت پارامترهای هندسی طول و قطر بدنه (L/D) تعریف شـدهاند، از آنجـایی کـه در نسـبت ابعادی(مقیاسهای) مختلف مقدار نسبت طول به قطر تغییر نمی کند بنابراین در هر روش برای تمامی مقیاس های مختلف تنها یک فاکتور فرم قابل محاسبه است. K1 و K2 روابط تجربی محاسبه فاکتور فرم هستند که قبلا توضیح داده شد. در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ مقادیر K1و K2 و فاکتور فرم محاسبه شده به روش عددی برای هر مقیاس به ترتیب بر مبنای رینولدز و سرعت ارائه شده است که با افزایش رینولدز به بیش از 5E+06 مقادیر آن در هر مقیاس تقریبا ثابت می شود که در مقیاس های مختلف دارای اختلاف هستند. مقدار  $K_1$  و  $K_2$  محاسبه شده از روش تجربی برابر با  $K_2 = 0.0708$  و  $K_1 = 0.119$  مے باشد. با توجیہ ب مقادیر ارائه شده در جدول ۲، نتایج نشان دهنده آن است که روابط تجربی نسبت به مقادیر محاسبه شده عددی دارای اختلاف کمتر از ۳۰ درصد میباشد.

 ${
m K}$  برای محاسبه مقاومت فشاری میتوان از فاکتور فرم بدنه استفاده نمود. با توجه به اینکه روابط تجربی بر مبنای نسبت یارامترهای هندسی طول و قطر بدنه (L/D) تعریف شده اند، از آنجایی که در نسبت ابعادی(مقیاسهای) مختلف مقدار نسبت طول به قطر تغییر نمی کند بنابراین در هر روش برای تمامی مقیاسهای مختلف تنها یک فاکتور فرم می توان محاسبه نمود. نتایج نشان دهنده آن است که روابط تجربی نسبت به مقادیر محاسبه شده عددی دارای اختلاف کمتر از ۳۰ درصد هستند. همچنین در مقیاسهای مختلف شبیهسازی عددی فاکتورهای فرم محاسبه شده دارای اختلاف هستند. با افزایش رینولدز به بیش از 5E+06 مقادیر آن در هر مقیاس تقریبا ثابت می شود. با توجه به اینکه مقدار مقاومت اصطکاکی و فشاری به ترتیب ۹۰ درصد و ۱۰ درصد مقاومت کل را تشکیل می دهد بنابراین با توجه با فرض استفاده از روش آیتیسیسی-۵۷ که کمترین خطای نسبی(کمتر از ۶درصد) را نسبت به مقادیر عددی دارد و استفاده از یکی از روشهای تجربی معرفی شده در مجموع محاسبه مقاومت کل با خطای کمتر از ۸/۵ درصد قابل محاسبه خواهد بود.

ان	گا	اژ'	وا	ید	کل
~					

1- Sc	ale Effect		
2- Co	mputational Fluid Dyn	amic	
3- Se	a trial		
4- Lle	oyd's Register		
5- Bl	asius		
6- Pra	antdl		
7- Pra	antdl-Schlichting		
8- Sc	hlichting		
9- IT	TC-57		
10- R	ANS (Reynolds-Avera	ge Navier-	Stokes)
11- T	urbulent dissipation		
12- V	Vilcox		
13- C	brid convergence index	(GCI)	
14- R	loach		
15- R	lichardson		
16- T	rimmed Cell Mesher		
			فهرست علائم
C	ضریب مقاومت کـل	C	ضـــريب مقاومـــت
$\mathcal{L}_T$	[_]	$\mathcal{L}_p$	فشاري [-]
C	ضــريب مقاومـــت	V	[] ; "<);
$c_f$	اصطکاکی [-]	٨	فاكتور قرم [-]
	طوا کا شاہ		

عدد رينولدز [-]	Re	ے۔ طـول کلـی شــناور	LOA
عدد فرود [–]	Fr	[111] فاصله بیبعد دیواره	Y +
نسبت طـول سـلول مـكر ما اتر ا	~	[-]	ת
سبکه محاسبانی [- ]	<i>i,i</i> +1	قطر سناور [-]	D

 $N_i$ 

تعـداد سـلولهاي



شكل ۱۵ – نمودار فاكتور فرم برحسب سرعت جدول ۲ – خطای روش  $K_1$  و  $K_2$  نسبت به روش عددی

_				
	$K_2$ خطای	$K_1$ خطای	مقدار K روش عددی	مقياس
	[%]	[%]	[-]	[-]
	18,84	59,41	٠,٠٨۴	۱,۰۰۰
	27,07	٢٣,۵٣	٠,٠٩١	۰ ,۵۰۰
	79,94	۲۲,۷	۰,۰۹۲	۰,۲۵۰
	74,7	28,00	۰,۰۸۸	۰,۱۲۵

#### ۶- نتیجه گیری

تغییرات مقاومت کل و اجزا آن یعنی مقاومت اصطکاکی و فشاری در تغییرات ابعادی(مقیاسهای مختلف) بدنه یک مدل شناور زیرسطحی به روش عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نمودار مقاومت کل برای هر مقیاس روند تقریبا مشابهی را طی می کند و در مقادیر عددی رینولدز یکسان به خوبی هم پوشانی دارند. بنابراین می توان این نتیجه را گرفت در صورتیکه شبیه سازی با دقت مناسبی انجام شود، میتوان با مدلهای کوچکتر و در سرعتهای کمتر و با تعداد المان شبکهبندی کمتر ضریب مقاومت کل را با دقت مناسب محاسبه نمود. مقدار مقاومت اصطکاکی بدنه تقریبا ۹۰ درصد و مقدار مقاومت فشاری تقریبا ۱۰ درصد مقاومت کل را تشکیل میدهند.

مقادیر خطای نسبی مقادیر ضریب مقاومت اصطکاکی روشهای تجربی موجود، نسبت به مقادیر محاسبه شده از شبیهسازی عددی بررسی شد. به طور کلی روشهای پرانتل و شلیختینگ، پرانتل-شلیختینگ و آیتی تی سی-۵۷ کمتر از ۱۵٪ می باشد که در بین این روابط، کمترین خطا را در رابطه آیتیتیسی-۵۷ با خطای بین ۶-۲٪ شاهد هستیم. مقدار خطای رابطهی بلازیوس بیش از ۷۰درصد می باشد.

 $h_i$ 

طول مبنای سلول

*a CFD model of self-propelled ships*, Applied Ocean Research, vol. 99. https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102162.

- [10] M. Moonesun, Y. M. Korol, V. A. Nikrasov, A. Ursalov, A. Brajhko, (2016). CFD analysis of the bow shapes of submarines, Journal of Scientific and Engineering Research, vol. III, no. 1, pp. 1-16, 2016. https://jsaer.com/download/vol-3-iss-1-2016/JSAER2016-03-01-01-16.pdf.
- [11] M. Moonesun, Y. M. Korol, V. A. Nikrasov, A. Ursalov, A. Brajhko, (2015). *Power* series optimization for submarine bare hull form, Turkish Journal of Engineering, Science and Technology, vol. 1, pp. 11-19.
- [12] Y. M. Korol, M Moonesun, (2015). Minimum Immersion Depth for EliminatingFree Surface Effect on Submerged Submarine Resistance, Turkish Journal of Engineering, Science and Technology (TUJEST), vol. 3, no. 1, pp. 36-46.
- [13] M. Moonesun, Y. M. Korol, V. A. Nikrasov, A. Ursalov, A. Brajhko, (2016).Bottom effect on the submarine moving close to the sea bottom, The Journal of Scientific and Engineering Research, vol. 6, no. 1, pp. 106-113.

https://www.researchgate.net/publication/331 001062\_Bottom\_effect\_on\_the\_submarine\_m oving\_close\_to\_the\_sea\_bottom.

- [14] P. C. Mohammad Moonesun, 2012. General arrangement and naval architecture aspects in midget submarines, in Proceedings of the 4th International Conference on Underwater System Technology Theory and Applications, Malaysia.
- [15] M. Moonesun, F. Ghasemzadeh,3 Y.Korol, N. Valeri,1 A. Yastreba, A.Ursalov (2017), *Effective depth of regular wave on submerged submarines and AUVs*, International Robotics & Automation Journal, vol. 2, no. 6, pp. 208-216. DOI: 10.15406/iratj.2017.02.00037.
- [16] M.Moonesun, Y. M. Korol, S.H. Moosavizadegan, H. Dalayeli, A. Mahdian, M. Javadi, A. Brazhko, (2016). Wave making system in submarines at surface condition, NISCAIR-CSIR, India. https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789

/34858/1/IJMS%2045(1)%2044-53.pdf

[17] T. Aliakbari , M. Adjami, M. Moonesun , ,(2023). An experimental study of stabilizing

اخـــتلاف پـــارامتر  
مورد بررسـی در دو 
$$\epsilon_{i+1,i}$$
 در شبکه  $i$  ام [-] X\_i شبکه مختلف

- [1] S. Savas, D. Ali, D. Cihad, and B. Sakir, (2018). *Investigation of self-propulsion of DARPA Suboff by RANS method*, Ocean Engineering,vol.150,pp.1-14. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.05 1.
- [2] S. B. Furkan Cavdar, (2022). An Investigation of Hydrodynamic Maneuvering Derivatives and Horizontal Stability of Darpa Suboff Depending on Depth, GMO Journal of Ship and Marine Technology, no. 221. https://doi.org/10.54926/gdt.1084413.
- [3] W. Sun, Q. Hu, S. Hu, J. Su, J. Xu, J. Wei and G. Huang, (2020). Numerical analysis of fullscale ship self-propulsion performance with direct comparison to statistical sea trail results, Journal of Marine Science Engineering, p. 24. https://doi.org/10.3390/jmse8010024.
- [4] H. Jasak, V. Vuk'cevi'c, I. Gatin and I. Lalovi'c, (2019). CFD validation and grid sensitivity studies of full scale ship self propulsion, Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, pp. 33-43. https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.12.004.
- [5] V. Bertram, *Practical Ship Hydrodynamics*, (2014). 2 ed., Elsevier Science.
- [6] L. Larsson, F. Stern and M. Visonneau, (2014). *Numerical Ship Hydrodynamics*, Netherlands, Dordrecht: Springer.
- [7] D. Ponkratov and C. Zegos, (2015). Validation of ship scale CFD self-propulstion simulation by the direct comparison with sea trials results, in Forth International Symposium on Marine Propulsors, Austin.
- [8] H. A. Jackson, Submarine Design Notes, (1980). Massachusetts Institute of Technology.
- [9] H. Mikkelsen and J. H. Walther, (2020). Effect of roughness in full-scale validation of

Technology, vol. 3, pp. 1-16. DOI: 20.1001.1.23456000.2015.3.0.6.8

- [25] Y. Karol. M. Moonesan, (2015). Naval Submarine Body Form Design and Hydrodynamics, Germany: Lap Lambert Academic Publishing.
- [26] A.F. Molland, S.R. Turnock, D.A. Hudson, (2017). Ship Resistance And Propulsion, Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press https://doi.org/10.1017/9781316494196.
- [27] L. Birk, (2019). Fundamentals of Ship Hydrodynamics, Padstow, Cornwall, Great Britain: John Wiley & Sons Ltd. DOI:10.1002/9781119191575.
- [28] V. Bertram, (2012).*Submarine hull design*, Engineering, Environmental Science.
- [29] S. F. HOERNER, (1965). Fluid-Dynamic Drag Practical Information On Aerodynamic Drag And Hydrodynamic Resistance, Bakersfield, CA, USA: Published by the Author.
- [30] H. Blasius, (1950). *The Boundary Layers In Fluids with Little Friction*, National Advisory Committee for Aeronautics.
- [31] X. Ling, Zhi, Q. Leong, J. Duffy,(2023). *Effects of pitch angle on a near free surface underwater vehicle*, Ocean Engineering, p. 115611. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.1156 11.
- [32] R. H. Nunn, (1989). Intermediate Fluid Mechanics, 270 Madison Avenue New York, NY 10016: Taylor & Francis Group.
- [33] P. M. Sforza, (2014). *Commercial Airplane Design Principles*, Butterworth-Heinemann.
- [34] K. G. Hermann Schlichting, (2017). Boundary-Layer Theory, 9 ed., vol. 1, K. Mayes, Ed., Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5.
- [35] A.Morrall, (1957), 1957 Ittc Model-Shipcorrelation Line Values Offrictional Resistancecoefficient.
- [36] F. M. White, (2016). *Mechanics Fluid*, New York, USA: McGraw-Hill Education.
- [37] D. C. Wilcox, (2006). *Turbulence Modeling* for CFD In: Industries, 3 ed., Canada: D.C.W.
- [38] ITTC(2017), Uncertainty Analysis is CFD Verification and Validation, Methodology and

ordinary fishing nets (SOFNets) on a stationary SWATH ship seakeeping behavior under irregular waves, Ocean Engineering, vol. 283, pp. 115-191. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.1151 91.

- [18] E. Asadi Asrami, M. Moonesun, F. Aziz Abi, (2021). Computational fluid dynamics and experimental hydrodynamic analysis of a solar AUV. Computer Assisted Methods in Engineering and Science, vol. 28, no. 1, pp. 57-77. DOI:10.24423/cames.301
- [19] N. Khanmoradi, M.Moonesun, S. Jafari Horestani, (2023). Calculation of Hydrodynamics Resistance Coefficient of Diver by CFD Method, Journal of Hydraulic and Water Engineering, vol. 1, no. 1, pp. 99-107. DOI: 10.61186/ijmt.18.15.
- [20] E. Asadi Asrami, S. Ardeshiri M. Adjami M. Moonesun,(2023). Experimental Results of an Underwater Glider Hydraulic Model Test in Towing Tank of NIMALA, Journal of Hydraulic and Water Engineering, vol. 1, no. 1, pp. 31-40 . DOI:10.22044/JHWE.2023.12852.1006.
- [21] N. Khanmoradi , M.Moonesun, S. Jafari Horestani,(2023), Calculation of Hydrodynamics Resistance Coefficient of Diver by CFD Method at Free Surface Condition, International Journal of Maritime Technology, vol. 18, pp. 15-24, 2023. DOI: 10.61186/ijmt.18.15
- [22] A Gharechae, M.Moonesun, (2023), Semianalytical study of linear waves interaction with a vertical permeable cylinder of arbitrary cross-section based on perturbation theory, Ships and Offshore Structures, vol. 19, no. 5, pp. 645-669. https://doi.org/10.1080/17445302.2023.22003 3.
- [23] Julia Bodnarchuk, Y. Karol, M.Moonesun, (2020). A Study of the Effect of Recesses on the Motion Resistance of Submarines by Methods of Computational Fluid Dynamics," Восточно-Европейский журнал передовых технологий, vol. 5, no. 7-107, pp. 82-88. doi: 10.15587/1729-4061.2020.212005.
- [24] M. Moonesun, Y. Karol. H. Dalayeli, (2015).
   CFD analysis on the bare hull form of submarines for minimizing the resistance, International Journal of Maritime

Procedures.

- [39] P. J. Roache, (1998). Verification Of Codes And Calculations, AIAA JOURNAL, vol. 36, May.
- [40] T. Tezdogan, Y. K. Demirel, P. Kellett, M. Khorasanchi, A. Incecik and O. Turan, (2015). Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance inhead seas due to slow steaming, Ocean Engineering, pp. 186-206. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.01.01 1.
- [41] Y. H. Ozdemir, T. Cosgun, A. Dogrul and B. Barlas, 2016. A numerical application to predict the resistance and wave pattern of KRISO container ship, Brodogradnja, vol. 67, pp.47-65.https://doi.org/10.21278/brod67204.
- [42] N. C. Groves, T. T. Huang and M. S. Chang, (1989). *Geometric characteristics of darpa suboff models (dtrc model nos. 5470 and 5471)*.
- [43] ITTC, (2011). *Recommended Procedures and Guidlines Resistance Test.*
- [44] O. F. S. Omer K Kinaci and S. Bal, (2016). Prediction of wave resistance by aReynoldsaveraged Navier–Stokes equation–based computational fluiddynamics approach, J Engineering for the Maritime Environment, pp.1-18,June. DOI:10.1177/1475090215599180
- [45] C. L. Warren, (1997). Submarine design optimization using boundary layer control.
- [46] D. Ponkratov, (2016). *Lloyd's Register Workshop on Ship Scale Hydrodynamics*, UK.
- [47] C. D. A. D. M. A. Savas Sezen, (2021). An investigation of scale effects on the selfpropulsion characteristics of a submarine, Applied Ocean Research, vol. 113, pp. 1-17. https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102728.