بررسی محاسبه مقاومت بدنه زیردریایی در مقیاس‌های مختلف به روش عددی

سجاد اردشیری[۱*] ، مجتبی دهقان منشادی[۲]، علی‌جبار رشیدی[۳]

[۱] دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مکانیک، sajjad_ardeshiri@yahoo.com
[۲] عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر، dehghanmanshadi@gmail.com
[۳] عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر، aiorashid@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۰۹
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۰۹

کلمات کلیدی:
مقیاس
ضرایب هیدرودینامیکی
شناور زیرسطحی
سابوف
بررسی عددی

چکیده

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 مقاومت کل، اصطکاکی و فشاری به روش شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین دقت نتایج 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.

Investigating the changes of the submarine bare-hull resistance in different scales by CFD method

Sajjad Ardeshiri[1*], Mojtaba Dehghan Manshadi[2], Ali Jabar Rashidi [3]

[1] Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology; sajjad_ardeshiri@yahoo.com
[2] Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology; dehghanmanshadi@gmail.com
[3] 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%.

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 روش‌های نیمه تجربی، شبیه‌سازی‌های عددی و تست آزمایشگاهی در حوضچه کشش انجام پذیرد [1]. شبیه‌سازی‌های عددی و تست آزمایشگاهی 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، زیرا که جریان اطراف بدنه و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.41]

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[1]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[2] 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 شبیه‌سازی عددی شناور در ابعاد اصلی به دلیل عدم دسترسی به داده‌های آزمایش دریا[2]به ندرت اتفاق می‌افتد [7].

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 می‌باشد. در این خصوص نیاز به یافتن روشی برای اطمینان از صحت نتایج بدست آمده از مدل و تعمیم آن به ابعاد شناور اصلی می‌باشد. مطالعه رفتار و پارامترهای مدل به دو صورت آزمایشگاهی و عددی انجام می‌شود که در هر دو صورت نیاز به استفاده از روابطی برای تعمیم می‌باشد [8]. مبنای تشابه در زیرسطح آب عدد رینولدز می‌باشد که دست یابی آن برای 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 [10-25] 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 تخمین مقاومت انواع مختلفی از غوطه‌ور شونده‌ها بر اساس شکل آنها تحلیل شده است [20-25]. برخی مطالعات آنها نیز بر اساس تستهای تجربی در حوضچه کشش بوده است [19,20,23]. با این حال پژوهش‌های اندکی در رابطه با بررسی اثر مقیاس 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 حاصل از شبیه‌سازی عددی، تاثیر تغییر ابعاد مقیاس بر ضرایب مقاومت در سرعت‌های پیشروی متفاوت بررسی و مقایسه شده است.

۲- معادلات حاکم

۲-۱- مقاومت شناور

مقاومت کل شناور دارای دو مولفه مقاومت فشاری و باقیمانده است. در این صورت مولفه های مقاومت شناورها به صورت معادله (۱) خواهند بود [26].

$$R_T = R_p + R_r \quad (۱)$$

در این معادله R_p مقاومت فشاری و R_r بیانگر مقاومت باقی مانده است که متشکل از دو مولفه مقاومت موج سازی و ویسکوز(اصطکاکی) می‌باشد [26].

$$R_r = R_w + R_f \quad (۲)$$

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

$$R_T = R_f + R_p \quad (۳)$$

با بی‌بعد سازی مقادیر مقاومت می‌توان به ضرایب مقاومت رسید. برای این امر کافی مقادیر مقاومت معادله (۳) را بر مقدار ثابت زیر تقسیم کرد [27].

$$\frac{1}{2}\rho A_w V^2 \quad (۴)$$

ρ چگالی سیال، A_w سطح خیس بدنه و V سرعت شناور می‌باشد. بدین ترتیب خواهیم داشت [27]:

$$\frac{R_T}{\frac{1}{2}\rho A_w V^2} = \frac{R_f}{\frac{1}{2}\rho A_w V^2} + \frac{R_p}{\frac{1}{2}\rho A_w V^2} \quad (۵)$$

$$C_T = C_f + C_p \quad (۶)$$

$$C_p = \frac{R_P}{0.5\rho A_w V^2} \quad (۷)$$

$$C_f = \frac{R_f}{0.5\rho A_w V^2} \quad (۸)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.41]

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

$$C_T = C_f\left(1 + \frac{C_p}{C_f}\right) \quad (۹)$$

$$C_T = C_f(1 + K) \quad (۱۰)$$

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] .

$$Re_M = Re_S \quad (۱۱)$$

$$\frac{V_M L_M}{\vartheta_M} = \frac{V_s L_S}{\vartheta_s} \quad (۱۲)$$

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

$$Fn_M = Fn_S \quad (۱۳)$$

$$V_M = V_s\sqrt{\frac{L_M}{L_S}} \quad (۱۴)$$

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 با رابطه (۱۵) باشد [29].

$$5 < \frac{L}{D} < 7 \quad (۱۵)$$

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

$$h \geq 5D \quad (۱۶)$$

اگر شروط فوق برقرار باشد طی مراحل زیر مقاومت بدنه بدون ملحقات زیردریایی محاسبه می‌گردد.

روش اول: طبق روابط (۱۷) و (۱۸) ضریب مقاومت کل C_T و ضریب فرم بدنه K قابل محاسبه است [29].

$$C_T = C_F\left(1 + \left(\frac{D}{L}\right) + 1.5 * \left(\frac{D}{L}\right)^3\right) \quad (۱۷)$$

$$K_1 = \left(\frac{D}{L}\right) + 1.5 * \left(\frac{D}{L}\right)^3 \quad (۱۸)$$

روش ۲ :که ضریب مقاومت کل C_T و ضریب فرم بدنه K از روابط (۱۹) و (۲۰) قابل محاسبه است [29].

$$C_T = C_F\left(1 + 1.5 * \left(\frac{D}{L}\right)^{1.5} + 7 * \left(\frac{D}{L}\right)^3\right) \quad (۱۹)$$

$$K_2 = 1.5 * \left(\frac{D}{L}\right)^{1.5} + 7 * \left(\frac{D}{L}\right)^3 \quad (۲۰)$$

ضریب مقاومت اصطکاکلی را می توان از روابط زیر برای صفحه تخت محاسبه کرد. معادله (۲۱) روش تجربی بلازیوس[3]می‌باشد [30]. این رابطه برای محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی صفحه تخت است.

$$\mathrm{C_f} = \frac{1.328}{\sqrt{\mathrm{R_e}}} \quad (۲۱)$$

رابطه پرانتل[4](۲۲) برای محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی در محدوده عدد رینولدز $5 \times 10^5 < Re < 10^7$ بصورت زیر است [31].

$$C_f = \frac{0.072}{R_e^{\frac{1}{5}}} \quad (۲۲)$$

اگر عدد رینولدز در محدوده $5 \times 10^5 < \mathrm{Re} < 10^8$ باشد می‌توان از رابطه تعمیم یافته پرانتل-شلیختینگ[5]استفاده کرد [33] [32].

$$C_f = \frac{0.074}{R_e^{\frac{1}{5}}} - \frac{1700}{R_e} \quad (۲۳)$$

برای جریان‌های آشفته در محدوده رینولدز $10^6 < Re < 10^9$ رابطه شلیختینگ[6](۲۴) کاربرد دارد [34].

$$C_f = \frac{0.455}{(\log(R_e))^{2.58}} \quad (۲۴)$$

رابطه پرکاربرد آی‌تی‌تی‌سی-۵۷[7]که توسط آزمایش مدل شناور در حوضچه کشش بدست آمده نیز بصورت زیر است [35].

$$C_f = \frac{0.075}{[\log(R_e) - 2]^2} \quad (۲۵)$$

۲-۴- معادلات اساسی حاکم بر جریان سیال

معادلات حاکم بر مسئله، معادله پیوستگی و معادلات رنز[8]برای حالت ناپایای سه بعدی با سیال غیرقابل تراکم هستند. معادله پیوستگی بصورت زیر می باشد [36]:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۲۶)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.41]

سرعت U می تواند بصورت میانگین سرعت و سرعت نوسانی بیان شود:

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

معادله ممنتوم بصورت زیر قابل ارائه است [36]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\nu\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\right] - \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} \quad (۲۸)$$

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، ρ چگالی و ν لزجت سینماتیکی سیال است.

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

$$\overline{u_i' u_j'} = -\nu_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_J}{\partial x_i}\right) + \frac{2}{3}\delta_{ij}k \quad (۲۹)$$

در این معادله، عبارت ν_t ادی ویسکوزیتی هست که بصورت $\nu_t = \frac{C_\mu K^2}{\varepsilon}$ تعریف می شود بطوری که C_μ یک ثابت بدون بعد با مقدار ($C_\mu = 0.09$) است. و عبارت k انرژی سینماتیکی اغتشاشی و ε نرخ اضمحلال اغتشاشی[۹]است. علاوه بر معادلات پیوستگی و تکانه، دو معادله (۳۰) و (۳۱) جابجایی برای بدست آوردن عبارات k و ε حل می‌شود[34] :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (kU_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_J}\right] + P_k - \epsilon \quad (۳۰)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial (kU_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right] + C_{\epsilon 1}P_k\frac{\varepsilon}{k} - C_{\epsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۳۱)$$

توضیحات بیشتری در مورد مدل اغتشاشی $k-\varepsilon$ را می توان در مطالعات ویلوکس[۱۰]مطالعه کرد [37].

۲-۵- پایداری شبکه محاسباتی

در این مطالعه، طبق توصیه ITTC روش پایداری حل جی‌سی‌آی[۱](GCI) بکار گرفته شده است. این روش اولین بار توسط روچ[۲]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 شده اند به گونه ای $h_1 < h_2 < h_3$ است. معیارهای بهبودسازی شبکه بصورت معادله (۳۲) تعریف می شوند:

$$r_{21} = \frac{h_2}{h_1}, r_{32} = \frac{h_3}{h_2} \quad (۳۲)$$

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] :

$$r_{21} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{\frac{1}{3}}, r_{32} = \left(\frac{N_2}{N_3}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (۳۳)$$

اختلاف بین تعداد شبکه تولید شده(ϵ)، می‌تواند از معادله (۳۴) محاسبه شود:

$$\epsilon_{21} = X_2 - X_1, \epsilon_{32} = X_3 - X_2 \quad (۳۴)$$

شرط پایداری R می تواند بصورت معادله (۳۵) تعریف شود.

$$R = \frac{\epsilon_{21}}{\epsilon_{32}} \quad (۳۵)$$

اگر این پارامتر دارای مقادیر $-1 < R < 0$ 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 $R < -1$ یا $R > 1$ باشد، حل نا همگرا می باشد.

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

$$P = \frac{ln(\frac{\epsilon_{i-1,i}}{\epsilon_{i,i+1}})}{lnr} \quad (۳۶)$$

در معادله (۳۶) r بیانگر ضریب بهبود شبکه می باشد. شاخص همگرایی شبکه جی‌سی‌آی طبق معادله (۳۷) تعریف می شود.

$$GCI_{i,i+1} = F_S\frac{|e_{i,i+1}|}{r^P - 1} \quad (۳۷)$$

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.41]

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

$$e_{i,i+1} = \frac{X_i - X_{i+1}}{X_{i+1}} \quad (۳۸)$$

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

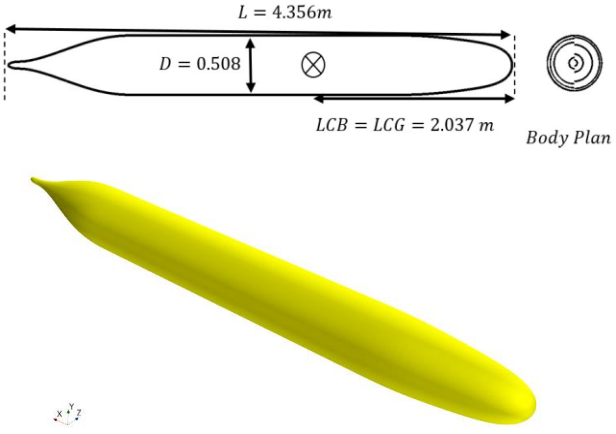
۳-۱- مشخصات هندسی زیردریایی مدل

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].

جدول ۱- مشخصات هندسی مدل شناور سابوف [42]

مشخصه	مقدار
طول $[m]$	۴,۳۵۶
قطر $[m]$	۰,۵۰۸
مساحت سطح خیس $[m^2]$	۵,۹۸۹
حجم $[m^3]$	۰,۶۹۹
مرکز شناوری از پاشنه $[m]$	۲,۳۴۴

هندسه ترسیم شده شناور سابوف بصورت شکل ۱ می‌باشد.

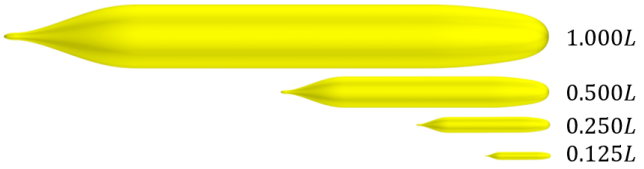


شکل ۱ – هندسه شناور مدل سابوف بدون متعلقات

در جدول ۲ و شکل ۲ به ترتیب نسبت ابعادی مختلف به همراه مشخصات هندسی و شکل مربوط به آن برای مدل زیردریایی سابوف که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است ارائه شده است. نسبت‌های در نظر گرفته شده به ترتیب ۱، ۰,۵، ۰,۲۵ و ۰,۱۲۵ برابر نمونه اصلی مدل سابوف می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات هندسی نسبت ابعادی مختلف

مقیاس	طول $[m]$	قطر $[m]$	مساحت سطح خیس $[m^2]$	حجم $[m^3]$	مرکز شناوری از پاشنه $[m]$
۰,۱۲۵	۰,۵۴۴۵	۰,۰۶۳۵	۰,۰۹۳۵۴		۰,۰۶۷۳
۰,۲۵۰	۱,۰۸۹۰	۰,۱۲۷۰	۰,۳۷۴۰		۰,۵۸۵۹
۰,۵۰۰	۲,۱۷۸۰	۰,۲۵۴۰	۱,۴۹۶۰		۱,۱۷۱۸
۱,۰۰	۴,۳۵۶۰	۰,۵۰۸۰	۵,۹۶۶۰		۲,۳۴۳۵



شکل ۲ – ابعاد مختلف شناور های مقیاس شده

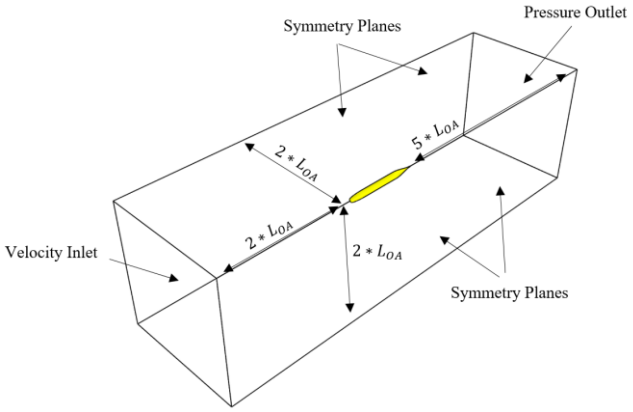
۳-۲- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

دامنه محاسباتی طبق توصیه ITTC [43] برای محاسبه مقاومت و جریان حول شناور انتخاب شده است. درشکل ۳ می‌توان 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 می‌شود. همچنین شرایط مرزی باید بگونه‌ای انتخاب شوند که کمترین تاثیر را بر حل مسئله عددی داشته باشند.

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، 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.

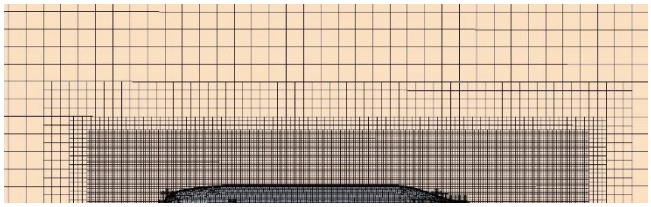
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.41]



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

به منظور ایجاد حجم کنترلی برای محاسبات از شبکه تریمر[۱۶] 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 قابل مشاهده است. اندازه سلول های روی سطح بدنه شناور بگونه ای تنظیم شده است که مقدار میانگین متغیر $Y+$ بر روی بدنه شناور بطور متوسط بین ۶۰ تا ۱۷۵ برای تمام سرعت‌های پیشروی است.



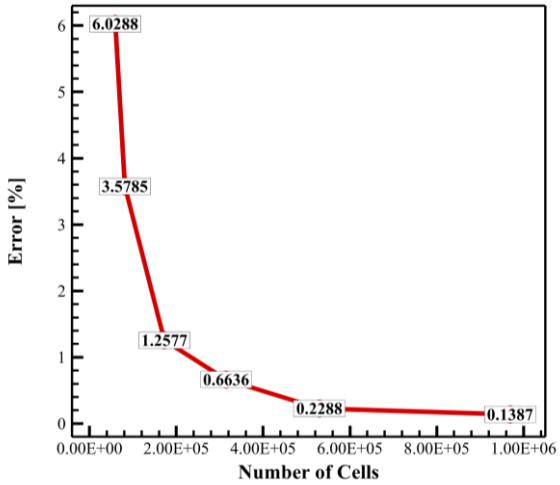
شکل ۴ – نمایی ازشبکه بندی ایجاد شده در دامنه محاسباتی

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

۴-۳-۱- 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

شماره شبکه	کیفیت شبکه	تعداد سلول ها	R_T	C_T	خطای نسبی
۳	ضعیف	۳۱۴۸۵۰	۸۷,۹۸	۰,۰۰۳۱۸۰۹۴۵	۰,۶۶٪
۲	متوسط	۵۲۹۵۴۸	۸۷,۶۰	۰,۰۰۳۱۶۷۲۰۶	۰,۲۳٪
۱	خوب	۹۶۸۹۹۵	۸۷,۵۲	۰,۰۰۳۱۶۴۳۵۷	۰,۱۴٪

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

۴-۳- 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 می‌باشد.

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

سرعت [m/s]	مقاومت عددی [N]	مقاومت آزمایشگاهی [N]	درصد خطا [%]
۳,۰۴۵	۸۷,۵۲	۸۷,۴۰	۰,۱۴
۵,۱۴۴	۲۳۱,۸۶	۲۴۲,۲۰	۴,۳۰
۶,۰۹۶	۳۱۸,۶۷	۳۳۲,۹۰	۴,۳۰
۷,۱۷۶	۴۳۰,۷۹	۴۵۱,۵۰	۴,۶۰

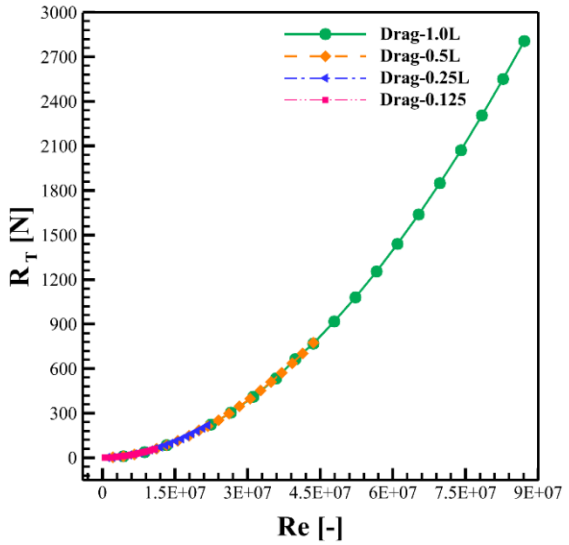
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

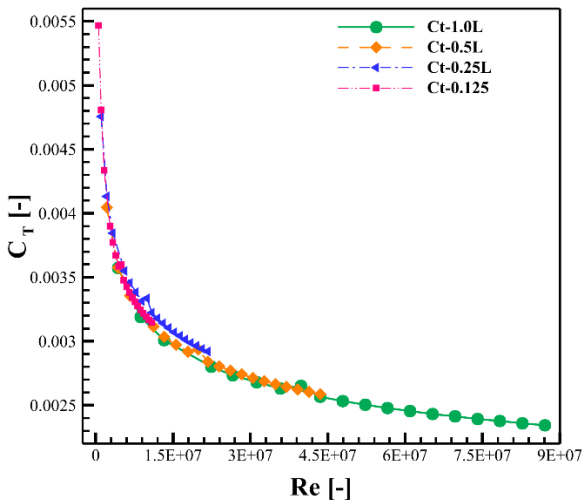
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.41]

۸,۲۳۱	۵۵۹,۳۳	۵۷۶,۹۰	۳,۰۰
۹,۱۴۶	۶۸۱,۷۶	۶۹۷,۰۰	۲,۲۰

۴- نتایج شبیه سازی عددی

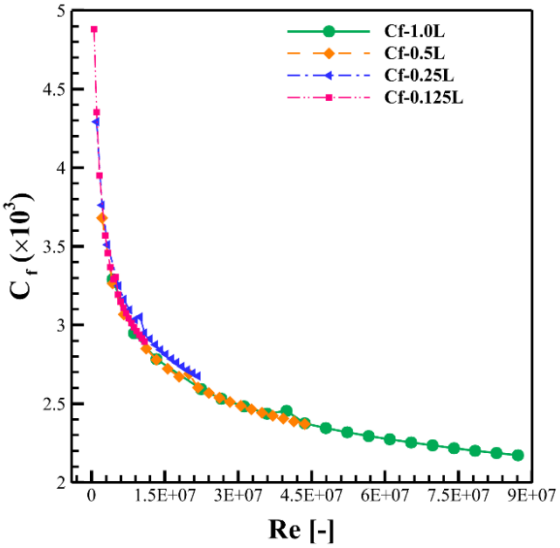
همانطور که قبلا اشاره گردید، نسبت‌های در نظر گرفته شده به ترتیب ۱، ۰,۵، ۰,۲۵ و ۰,۱۲۵ برابر نمونه اصلی مدل سابوف می‌باشد. سرعت‌های تحلیل نتایج نیز با توجه به محدوده عملیات زیرسطحی‌های بین ۱ تا ۲۰ متر بر ثانیه در نظر گفته شده است. در شکل ۶ مقادیر مقاومت کل R_T و ضریب مقاومت کل C_T بر حسب عدد رینولدز ارائه شده است. کوچکترین مقیاس دارای کمترین مقدار مقاومت و عدد رینولدز می‌باشد. با افزایش مقیاس و ابعاد شناور زیر سطحی مقادیر عدد رینولدز ومقاومت کل متعاقبا 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 شبیه‌سازی با دقت مناسبی انجام شود، با مدل‌های کوچکتر و در سرعت‌های کمتر و با تعداد المان شبکه‌بندی کمتر ضریب مقاومت کل با دقت مناسب قابل محاسبه 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 می‌شود با افزایش عدد رینولدز مقادیر ضریب مقاومت اصطکاکی کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده نمود که روند تغییرات در نسبت‌های ابعادی مختلف تقریبا مشابه و در مقادیر رینولدز مشابه تقریبا یکسان می‌باشد.



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

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.

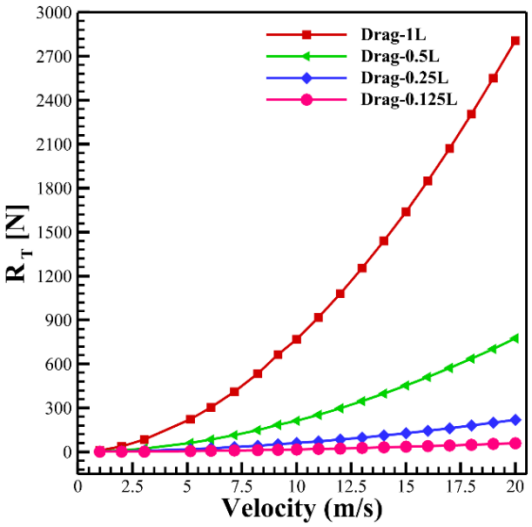
جدول ۵ – نسبت مقاومت اصطکاکی و فشاری به مقاومت کل در مقیاس‌های متفاوت

مقیاس [-]	نسبت مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل $[R_F/R_T]$	نسبت مقاومت فشاری به مقاومت کل $[R_p/R_T]$
۱,۰۰۰	۹۲,۲۷	۷,۷۳
۰,۵۰۰	۹۱,۶۳	۸,۳۷
۰,۲۵۰	۹۱,۵۷	۸,۴۳
۰,۱۲۵	۹۱,۸۹	۸,۱۱

در شکل ۸ مقادیر مقاومت بر حسب سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل و نتایج مشخص شده در آن می‌توان 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

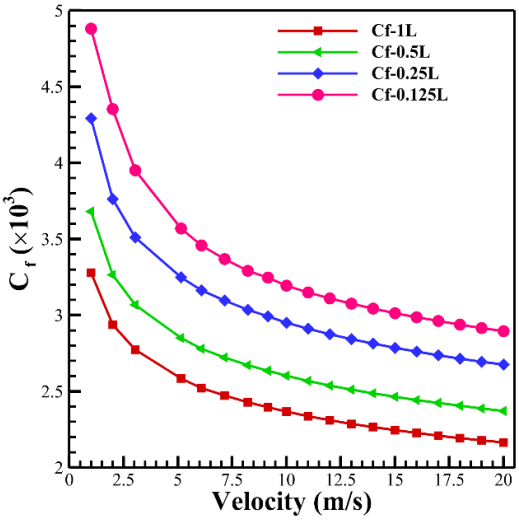
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.41]

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 می‌شود که با کاهش مقیاس، تعداد شبکه و زمان حل کاهش یافته است.

جدول ۶ – ارتباط مقیاس با تعداد شبکه و زمان حل

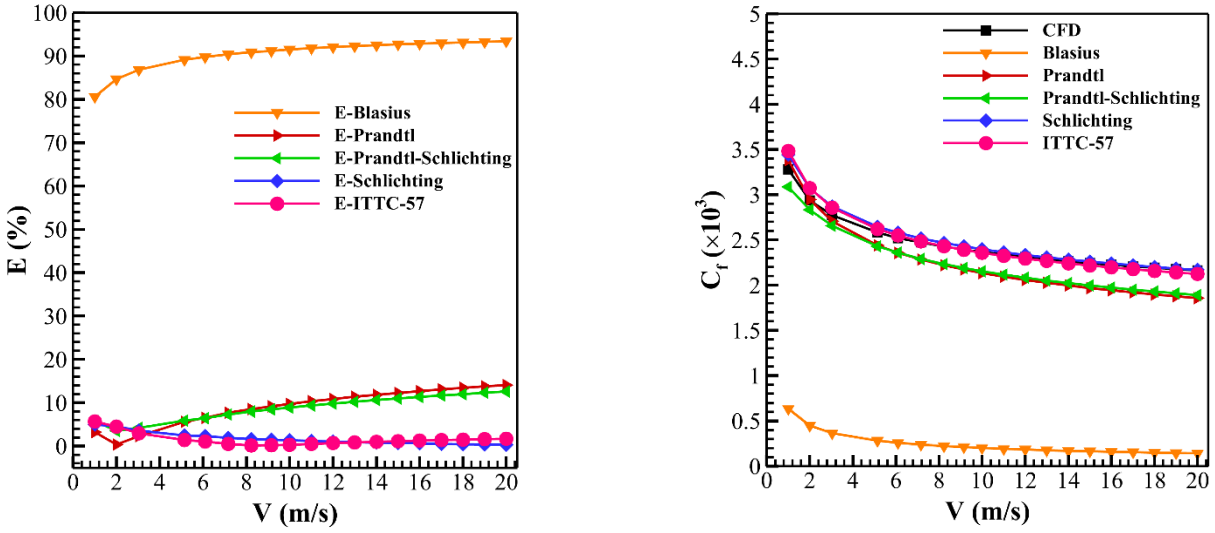
مقیاس[-]	تعداد شبکه	زمان حل[hr]
۰,۱۲۵	۲۳۳۰۹۳	۱۰,۵۲۷
۰,۲۵	۲۷۲۴۱۱	۱۲,۰۸۸
۰,۵	۳۳۲۳۰۷	۱۴,۷۶۶
۱	۹۶۸۹۵۵	۲۲,۴۶۵

۵- نتایج روابط تجربی

در بخش ۲-۳، پنج رابطه تجربی بلازیوس، پرانتل، پرانتل-شلیختینگ، شلیختینگ و آی‌تی‌تی‌سی-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، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۲۵ نشان داده شده است. با بررسی نتایج می‌توان 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 اصطکاکی هستند. رابطه‌ی بلازیوس مقادیری با اختلاف زیاد 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 می‌شود.

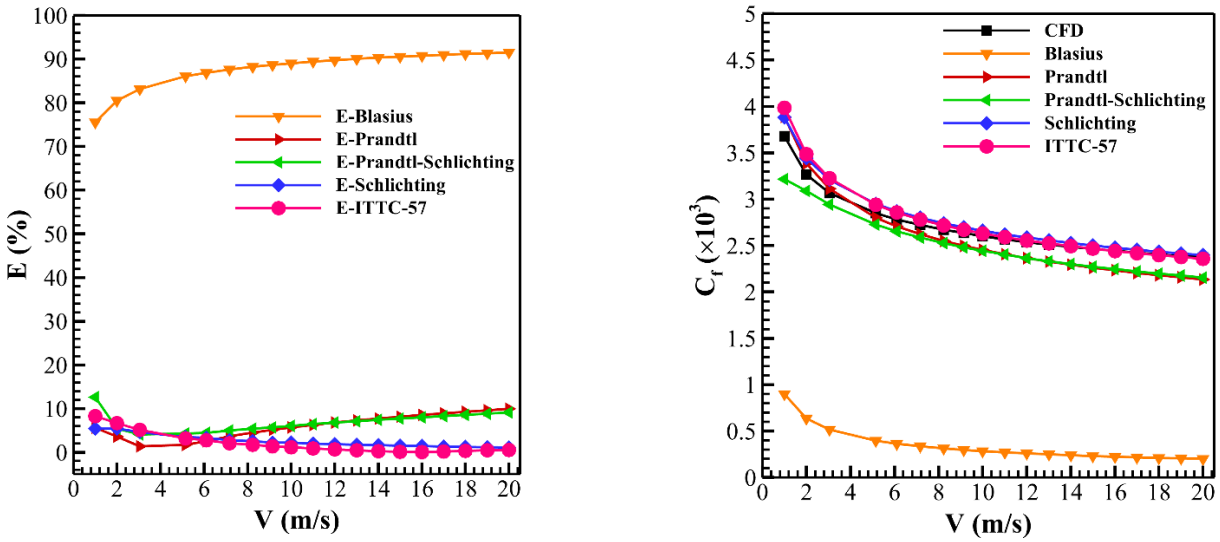
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.41]



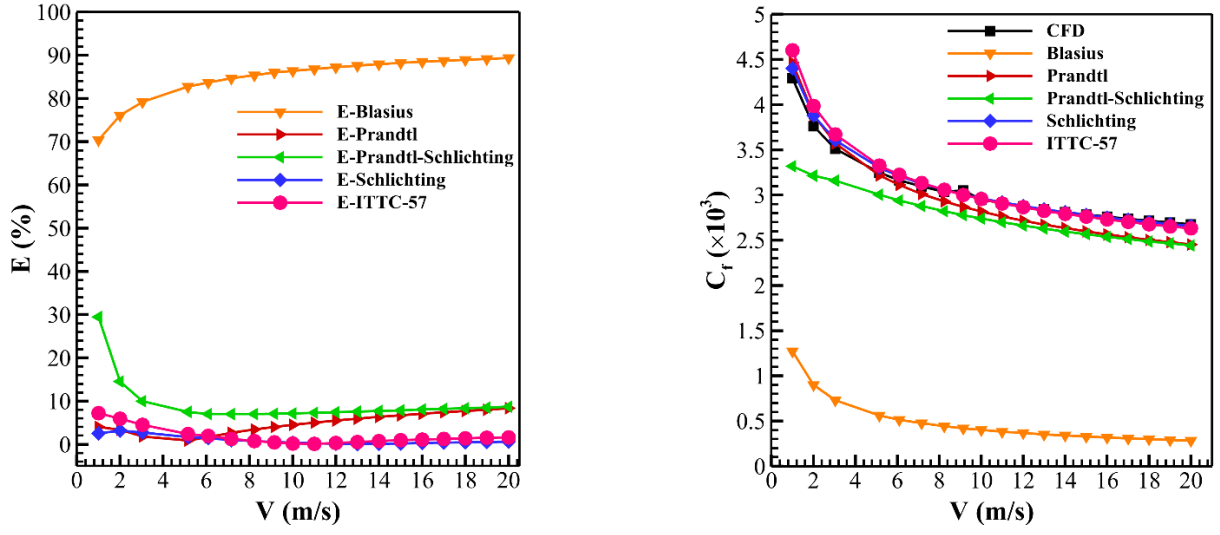
الف) ضریب مقاومت اصطکاکی — ب) مقادیر خطا

شکل ۱۰ – نمودار مقادیر ضریب مقاومت اصطکاکی و خطای محاسباتی در مقیاس ۱ (ابعاد اصلی)



الف) ضریب مقاومت اصطکاکی — ب) مقادیر خطا

شکل ۱۱ – نمودار مقادیر ضریب مقاومت اصطکاکی و خطای محاسباتی در مقیاس ۰٫۵

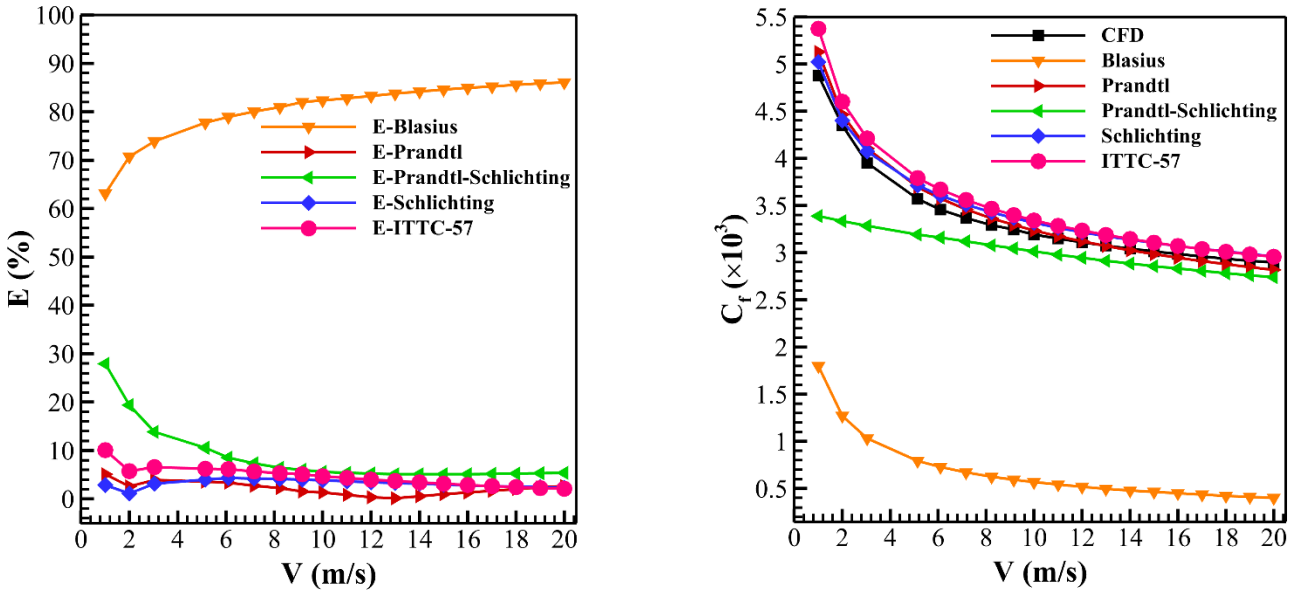


الف) ضریب مقاومت اصطکاکی — ب) خطای محاسباتی

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.41]

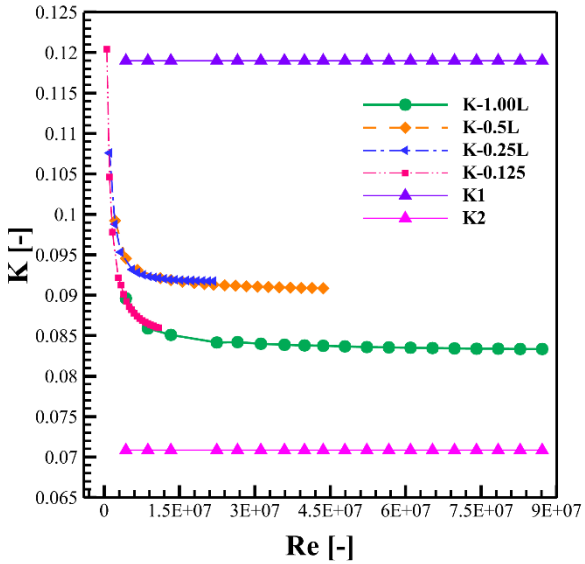


الف) ضریب مقاومت اصطکاکی

ب) خطای نسبی

شکل ۱۳ – نمودار مقادیر ضریب مقاومت اصطکاکی و خطای محاسباتی در مقیاس ۰,۱۲۵

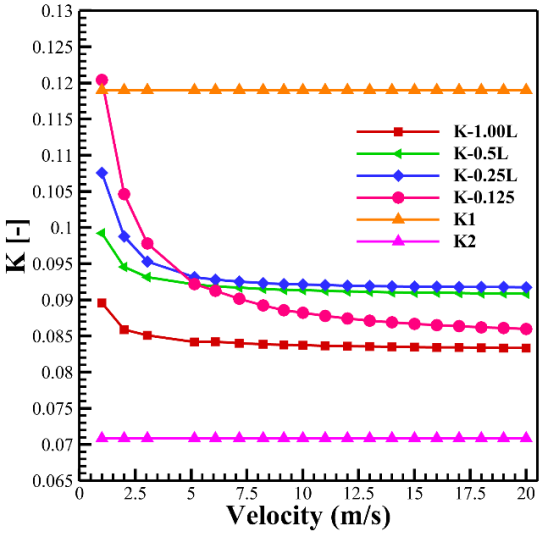
برای محاسبه مقاومت فشاری مطابق با رابطه (۱۰) می‌توان از فاکتور فرم بدنه K استفاده نمود. در بخش ۲-۳ روابط تجربی محاسبه فاکتور فرم بدنه ارائه شده است. با توجه به اینکه این روابط بر مبنای نسبت پارامترهای هندسی طول و قطر بدنه (L/D) تعریف شده‌اند، از آنجایی که در نسبت ابعادی(مقیاس‌های) مختلف مقدار نسبت طول به قطر تغییر نمی‌کند بنابراین در هر روش برای تمامی مقیاس‌های 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 می‌شود که در مقیاس‌های مختلف دارای اختلاف هستند. مقدار K_1 و K_2 محاسبه شده از روش تجربی برابر با $K_1 = 0.119$ و $K_2 = 0.0708$ می‌باشد. با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول ۷، نتایج نشان دهنده آن است که روابط تجربی نسبت به مقادیر محاسبه شده عددی دارای اختلاف کمتر از ۳۰ درصد می‌باشد.



شکل ۱۴ – نمودار فاکتور فرم برحسب رینولدز

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.41]



شکل ۱۵ – نمودار فاکتور فرم برحسب سرعت

جدول ۷ – خطای روش K_1 و K_2 نسبت به روش عددی

مقیاس [-]	مقدار K روش عددی [-]	خطای K_1 [%]	خطای K_2 [%]
۱,۰۰۰	۰,۰۸۴	۲۹,۴۱	۱۸,۶۴
۰,۵۰۰	۰,۰۹۱	۲۳,۵۳	۲۸,۵۳
۰,۲۵۰	۰,۰۹۲	۲۲,۷	۲۹,۹۴
۰,۱۲۵	۰,۰۸۸	۲۶,۰۵	۲۴,۳

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 می‌توان این نتیجه را گرفت در صورتیکه شبیه‌سازی 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 آی‌تی‌تی‌سی-۵۷ کمتر از ۱۵٪ می‌باشد 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 می‌باشد.

برای محاسبه مقاومت فشاری می‌توان از فاکتور فرم بدنه K استفاده نمود. با توجه به اینکه روابط تجربی بر مبنای نسبت پارامترهای هندسی طول و قطر بدنه (L/D) تعریف شده اند، از آنجایی که در نسبت ابعادی(مقیاس‌های) مختلف مقدار نسبت طول به قطر تغییر نمی‌کند بنابراین در هر روش برای تمامی مقیاس‌های مختلف تنها یک فاکتور فرم می‌توان 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 می‌شود. با توجه به اینکه مقدار مقاومت اصطکاکی و فشاری به ترتیب ۹۰ درصد و ۱۰ درصد مقاومت کل را تشکیل می‌دهد بنابراین با توجه با فرض استفاده از روش آی‌تی‌سی-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.

کلید واژگان

1- Scale Effect
2- Computational Fluid Dynamic
3- Sea trial
4- Lloyd’s Register
5- Blasius
6- Prantdl
7- Prantdl-Schlichting
8- Schlichting
9- ITTC-57
10- RANS (Reynolds-Average Navier-Stokes)
11- Turbulent dissipation
12- Wilcox
13- Grid convergence index (GCI)
14- Roach
15- Richardson
16- Trimmed Cell Mesher

فهرست علائم

C_p	ضریب مقاومت فشاری [-]	C_T	ضریب مقاومت کل [-]
K	فاکتور فرم [-]	C_f	ضریب مقاومت اصطکاکی [-]
Re	عدد رینولدز [-]	LOA	طول کلی شناور [m]
Fr	عدد فرود [-]	$Y+$	فاصله بی‌بعد دیواره [-]
$r_{i,i+1}$	نسبت طول سلول شبکه محاسباتی [-]	D	قطر شناور [-]
N_i	تعداد سلول‌های	h_i	طول مبنای سلول

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.41]

شبکه محاسباتی [-]		هـــای شـــبکه محاسباتی [-]	
اخـــتلاف پـــارامتر مورد بررســی در دو شبکه مختلف	$\epsilon_{i+1,i}$	پارامتر مورد بررسی در شبکه i ام [-]	X_i
		پـــارامتر پایـــداری شبکه	R

۶ - مراجع

[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.2017.12.051.

[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. Vukˇcevi´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 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/331001062_Bottom_effect_on_the_submarine_moving_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*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.41]

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.2023.115611.

[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.2023.115191.

[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) , *Semi-analytical 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/10.1080/17445302.2023.2200033.

[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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.41]

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.2015.01.011.

[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 aReynolds-averaged 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 self-propulsion characteristics of a submarine*, Applied Ocean Research, vol. 113, pp. 1-17. https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102728.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.41]