شبیه‌سازی عددی خزه های دریایی چسبیده به بدنه شناورها و بکارگیری روشهای کاربردی و نوین به منظور کاهش نیروی درگ ناشی از آنها

محمد احمدزاده طلاتپه[۱*]، سید مجید موسوی[۲]

[۱] استادیار دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار؛ m_ahmadzadeh56@yahoo.com
[۲] کارشناس ارشد مهندسی دریا هیدرودینامیک، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار؛ s.majid.mousavi88@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۰۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:
شبیه‌سازی
فولینگ
آنتی فولینگ
کاهش درگ
ناوشکن سطحی

چکیده

در این تحقیق به بررسی اثر خزه‌های دریایی (فولینگ) بر روی سطوح شناورها، به روش دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته شده است. به این منظور مدل آشفتگی مناسب انتخاب و شبیه‌سازی و معتبرسازی انجام گردید. مدلسازیهای عددی اثرات چسبیدن خزه ها در درجه‌های متفاوت نشان دادند که وجود یک لایه بسیار نازک از لجن و گل‌ولای موجب افزایش ۴/۵۸ درصدی نیروی درگ می‌شود. حال آنکه با افزایش مقدار و شدت خزه‌گرفتگی بدنه شناورها، نیروی مقاومت کل تا ۴۰ درصد افزایش می یابد. در این مطالعه تعدادی از پوشش های نوین ضد خزه که برای جلوگیری از رشد فولینگ‌ها و به منظور کاهش نیروی درگ مورد استفاده قرار می گیرند مورد ارزیابی و مدلسازی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با بکار بردن این پوششها نیروی درگ ناشی از فولینگ‌ها تا ۳۷ درصد کاهش می یابد. به علاوه استفاده از الگوی موج در سطح آزاد و همچنین نمودارهای توزیع تنش برشی، فشار، شدت توربولانسی و غیره در اطراف شناور در حالت‌های متفاوت نیز مطالعه و مورد مقایسه قرار گرفته اند.

Numerical Simulation of Foulings on the Marine Vessels Body and Application of Newly Recommended Techniques to Reduce the Resulting Drag Force

Mohammad Ahmadzadetalatapeh[1*], Majid Mousavi[2]

[1]Assistant Professor, Department of Marine Engineering, Chabahar Maritime University; m_ahmadzadeh56@yahoo.com
[2]M.Sc. Graduate, Department of Marine Engineering, Chabahar Maritime University; s.majid.mousavi88@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 30 Dec. 2015
Accepted: 21 Aug. 2016

Keywords:
Simulation
Fouling
Marine Vessel
Drag Reduction
Antifouling

ABSTRACT

In this research, the effects of foulings on the outer surface of a marine vessel have been studied using the Computational Fluid Dynamics (CFD) methods. To this end, a proper turbulence model was considered and validated for the simulations. The simulation results for different fouling grades indicated that existing of a thin layer of slime could make 4.58 % increase in drag force; however, foulings on the outer surface of a marine vessel could make about 40% increase in drag force. In this study, the application of modern coatings (surface covers) for reducing the foulings and the resulting drag force was also investigated and the results were presented. Based on the simulation results, application of the coatings, the foulings resulted drag force would decrease about 37%. In addition, wave patterns, pressure distribution, drag coefficient distribution, and turbulent distribution profile were investigated on the free surface.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.9.4]

۱- مقدمه

مقاومت اصطکاکی مهمترین بخش نیروی مقاومت کل در یک کشتی است که به صورت مستقیم سرعت، توان و مصرف سوخت کشتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با بهینه‌سازی فرم بدنه شناورها می‌توان مقداری از نیروی مقاومت وارد بر آن را کاهش داد اما پس از آن مقاومت اصطکاکی ۸۰-۶۰ درصد از مقاومت باقی مانده را تشکیل می‌دهد[۱]. بعلاوه، هرگونه افزایش در زبری بدنه موجب افزایش قابل توجهی در هزینه عملیاتی کشتی می‌شود. فولینگ‌ها از جمله مهم‌ترین عوامل افزایش نیروی درگ کشتی‌ها و سایر وسیله‌های شناور در دریا بوده و به همین دلیل تلاشهای بسیاری برای یافتن شیوه‌ای مؤثر برای جلوگیری از رشد فولینگها و اثر آنها بر مقاومت اصطکاکی انجام گرفته است. اولین مطالعه تجربی در این زمینه در سال ۱۹۱۶ انجام گرفت[۲]. این مطالعه، جریان لایه مرزی آشفته روی بایو فیلمهای طبیعی دریایی و مقایسه آن با یک صفحه صاف، متوسط افزایش ٪۳۳ تا ٪۱۸۷ در ضریب اصطکاک پوسته‌ای روی نمونه‌های خزه زده را نشان داد. نتایج بدست آمده نشان دادند که ضریب اصطکاک پوسته‌ای به ضخامت بایو فیلمها و شکل سطح وابسته است[۳].

یکی از مهمترین موضوعات در خصوص زبری سطح در مهندسی سیالات چگونگی وابستگی درگ اصطکاکی به ویژگی‌های سطح یک زبری مشخص است. تلاشهایی توسط نیکورادزه برای یافتن مقیاس طول زبری مناسب به صورت آزمایشگاهی انجام گرفت[۴]. هاما نشان داد که افزایش اصطکاک سطحی موضعی ناشی از زبری فقط به عدد رینولدز زبری بستگی دارد[۵]. مناسب‌ترین تابع زبری که بتواند اثرات زبری فولینگها و پوششهای مورد استفاده در صنایع دریایی را به درستی بیان کند توسط شولتز در سال ۲۰۰۴ ارائه گردید[۶]. او با استفاده از نتایج تجربی بدست آمده از حوضچه کشش به ارائه سه رابطه متفاوت برای مدل کردن زبری ناشی از فولینگها و پوششهای مختلف پرداخت. در این مطالعه از زبری معادل ماسه برای بررسی اثرات فولینگها و پوششهای سطوح استفاده گردید.

برای محاسبه مقاومت کشتی ناشی از زبری سطح، شولتز در سال ۲۰۰۷ نتایج بدست آمده از مقاومت کشتی مدل و آنالیز و شبیه‌سازی قانون لایه مرزی را در شرایط زبری مختلف با هم مقایسه کرد. این مطالعه نشان داد که وجود لجن و گل‌ولای، توان محور را ٪۲۱ در مقایسه با یک ناوچه بدون خزه همسان دیگر افزایش می‌دهد. این در حالی است که خزه زدگی آهکی شدید منجر به افزایش ٪۸۶ توان مورد نیاز می گردد[۷].

در تحقیق دیگری خور و ژاؤ به مطالعه عددی اثرات بارناکل ها و دو نوع پوشش ضدخزه متفاوت، بر نیروی درگ وارد بر یک ایرفویل و یک زیردریایی پرداختند. بر اساس نتایج این تحقیق، فولینگها باعث کاهش ۸۰ درصدی نسبت ضریب لیفت به ضریب درگ شده و در نتیجه باعث افزایش مصرف سوخت می‌شوند. همچنین نشان داده شد که گرادیان فشار به تدریج با افزایش ارتفاع زبری افزایش یافته اما با تغییر تراکم فولینگها گرادیان فشار تغییر نمی یابد[۸].

کورکوت و یوستا اثرات زبری سطوح پنج صفحه آلومینیومی را بر روی نیروی درگ مورد آزمایش قرار داده و از نتایج موجود برای معتبر سازی حل عددی زبری سطح استفاده نمودند. در این مطالعه از مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ برای شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی به روش حجم سیال، منطبق بر شرایط آزمایشگاهی استفاده گردید. نتایج نشان دادند که زبری سطح، نقش تعیین کننده ای در نیروی مقاومت یک صفحه دارد[۹].

استفاده از پوششهای نوین ضدخزه یکی از روشهای جلوگیری از افزایش نیروی مقاومت وارد بر شناورها است. استفاده از روشهای تجربی و عددی برای مطالعه فولینگها و آنتی فولینگها از جمله بهترین شیوه ها برای بررسی اثرات آنها بر کشتیها است. دِمیرِل و همکاران اهمیت پوششهای ضدخزه در مقاومت و توان کشتیها را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه نشان داده شد که میزان زبری بدنه برای زمان غوطه‌وری مشابه با توجه به نوع پوشش مورد استفاده و درجه‌های مختلف خزه زدگی تغییر می‌کند. بعلاوه، مقدار افزایش در توان مؤثر یک نفتکش سوخت مایع به دلیل استفاده از پوششهای ضدخزه پیش‌بینی گردید[۱۰]. در مطالعه دیگری، دِمیرِل و همکاران نیروی درگ ناشی از پوششهای ضدخزه بر روی صفحات تخت را بصورت مدل‌سازی عددی و تجربی بررسی نمودند. در این مطالعه قانون دیواره اصلاح شده در داخل تابع دیواره زبری سطح مدلسازی گردید[۱۱]. وو یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ به مطالعه پوششی نوین که از ترکیب پلی‌اتیلن اکسید با رنگ ضدخزه خود صیقل شونده بدست آمده بود، پرداختند. در این تحقیق، با آزمایش یک صفحه تخت پوشیده شده با پوشش مورد نظر در تونل آب، میزان کارائی آن برای کاربردهای دریایی مورد تحقیق قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت اصطکاکی صفحه تخت تا ٪۳۳ نسبت به رنگهای ضدخزه معمولی کاهش می‌یابد[۱۲].

بر اساس آخرین تحقیقات نگارندگان، تاکنون تحقیق قابل توجهی در زمینه مدلسازی عددی اثر فولینگها و آنتی فولینگها بر بدنه شناورها صورت نگرفته است. به همین علت در مقاله حاضر سعی شده است تا با مدلسازی فولینگها و آنتی فولینگها ، اثر آنها را در میزان افزایش نیروی درگ و سایر پارامترهای جریان حول شناور، مورد ارزیابی قرار بگیرد.

در این تحقیق ابتدا به نحوه مدل کردن شناور و زبری ناشی از فولینگهای دریایی پرداخته شد. روابط مدلسازی عددی زبری و رژیمهای زبری تحلیل شده و در نهایت با انتخاب مدل شناور و شبکه‌بندی آن، شرایط مرزی لازم برای شبیه‌سازی جریان در عدد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.9.4]

رینولدز ۰/۴۱ آورده شده و استقلال شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش بعدی به ارائه و تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی در سرعتهای متفاوت برای بدنه کشتی صاف پرداخته شده و مدل های توربولانسی ارائه شده مورد شبیه‌سازی و نتایج بدست آمده با نتایج تجربی موجود معتبرسازی می شوند. پس از انتخاب مدل آشفتگی مناسب، اثرات زبری سطح ناشی از فولینگهای دریایی در شرایط مختلف زبری بر روی بدنه ناوشکن سطحی انتخاب شده مدل‌سازی و مورد تحقیق قرار می گیرد. به منظور معتبر سازی نتایج شبیه سازی، نتایج بدست آمده از روش عددی با مقادیر تجربی آن مقایسه می گردد.

در انتها برای جلوگیری از افزایش نیروی درگ که منجر به افزایش هزینه های اقتصادی و زیست محیطی می شود، به مطالعه پوششهای ضدخزه پرداخته شده و ضمن بررسی پوششها و روشهای نوین، اثرات آنتی فولینگ ها در جلوگیری از افزایش نیروی درگ به روش عددی شبیه‌سازی و نتایج آن ارایه می گردد.

۲- معادلات اساسی حاکم

در این مطالعه از معادلات متوسط گیری شده ناویر استوکس در حالت گذرا به‌منظور حل معادلات حاکم بر مسأله استفاده گردید. حل معادلات بقای جرم و مومنتوم با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت ۱۳ انجام گرفت. معادلات پیوستگی و مومنتوم متوسط گیری شده در مختصات دکارتی بصورت معادلات زیر ارائه می شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0$$
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i} \qquad (۱)$$
$$+\frac{\partial}{\partial x_j}[\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l})]+\frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho\overline{u_i' u_j'})$$

u_i' بیانگر سرعت نوسانی آشفته در جهت x_i، P مؤلفهٔ فشار، ρ چگالی، μ لزجت دینامیکی و $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ ترم تنش‌های رینولدزی است.

با توجه به اینکه دستگاه معادلات فوق هنوز بسته نشده و تعداد مجهولات مسئله از تعداد معلومات آن بیشتر است باید با کمک معادلات اضافی ترم تنش‌های رینولدزی را به‌نوعی مدل‌سازی یا محاسبه گردد. در مدل‌های توربولانسی صفر، یک و دو معادله‌ای می‌توان با استفاده از روابط اساسی لزوجت گردابی، مولفه‌های تنش‌های رینولدز را به گرادیان‌های سرعت متوسط مرتبط نمود. یکی از این تقریب‌ها فرضیه بوزینسک است که فرم تراکم ناپذیر آن بصورت معادله (۲) است.

$$-\rho\overline{u_i' u_j'}=2\mu_t S_{ij}-\frac{2}{3}\rho k\,\delta_{ij} \qquad (۲)$$

که در آن، δ_{ij}دلتای کرونیکر و S_{ij} تانسور نرخ کرنش متوسط بوده و توسط رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$s_{ij}=\frac{1}{2}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \qquad (۳)$$

در مدل انتقال تنش رینولدز برای محاسبه هر یک از ترم های تنش رینولدز از یک معادله انتقالی کمک گرفته می شود. در یک مساله سه بعدی به شش معادله انتقالی برای محاسبه دقیق توزیع تنش‌های رینولدز نیاز است. این در حالی است که در مدل های دو معادله ای تنها دو تنش بطور دقیق محاسبه و مابقی بصورت غیردقیق محاسبه شده‌اند. به همین دلیل مدل تنش رینولدز توصیف به مراتب دقیق تری از آشفتگی ارائه می‌دهد امّا این مدل بسیار پیچیده و از لحاظ هزینه محاسباتی بسیار هزینه‌بر است.

۲-۱- تقریب تابع دیواره برای خزه‌ها و پوشش‌های ضدخزه

در نزدیکی دیواره کمیت‌هایی چون سرعت دارای گرادیان‌های شدید هستند، مدل کردن صحیح جریان در نزدیکی دیواره اثر بسیار مهمی بر موفقیت‌آمیز بودن حل مسئله دارد. در جریان‌هایی با رینولدز بالا توابع دیواره بطور قابل توجهی در زمان و هزینه محاسبات صرفه‌جویی می‌کنند. در شرط مرزی تابع دیواره استاندارد، نیازی به استفاده از شبکه‌های ریز جهت تسخیر خصوصیات میدان جریان در زیر لایه لزج و ناحیه بافر نیست و وظیفه تسخیر خصوصیات میدان جریان، تماماً بر عهده تابع دیواره گذاشته می‌شود. در شکل استاندارد تابع دیواره، برای ناحیه حدی زیر لایه لزج $\upsilon \gg \upsilon_t$ از شرط مرزی (۴) استفاده می‌شود[۱۳].

$$U^+=y^+ \qquad (۴)$$

برای ناحیه حدی تماماً آشفته، از شرط مرزی (۵) استفاده می‌شود که در آن $E=9\cdot 793$ می‌باشد[۱۳].

$$U^+=\frac{1}{k}\ln(Ey^+)$$
$$U^+=\frac{C_\mu^{1/4}k_p^{1/2}U_p}{\frac{\tau_w}{\rho}} \qquad (۵)$$
$$y^+=\frac{\rho C_\mu^{1/4}k_p^{1/2}y_p}{\mu}$$

قانون لگاریتمی تابع دیواره برای محدودهٔ $30\le y^+\le 300$ معتبر بوده و هنگامی‌که $y^+\ge 11\cdot 25$ باشد از قانون دیواره لگاریتمی استفاده می‌شود. برای $y^+\le 11\cdot 25$، سلول‌های نزدیک دیواره از رابطه خطی جریان لایه‌ای ($U^+=y^+$) استفاده می‌کنند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.9.4]

۲-۲- اثرات زبری سطح روی توابع دیواره

بطور کلی المانهای زبری سطح به دو دسته تقسیم می‌شوند: نوع k و نوع d. در زبری نوع k، ترم انتقال زبری فقط تابعی از ارتفاع زبری می‌باشند درحالی‌که در نوع d فضای خالی در میان المان‌های زبری بسیار کوچک است و ترم انتقال زبری فقط به مقیاس خارجی (مانند شعاع لوله) بستگی دارد.

برای زبری نوع k عدد رینولدز زبری k_s^+ معادل با ذرات ماسه k_s به‌صورت زیر تعریف می‌شود. که می‌تواند به عنوان یک شناسه برای رژیم مغشوش دیوارهٔ زبر مورد استفاده قرار گیرد[۱۴].

$$k_s^+ = \frac{U_\tau k_s}{\nu} \qquad (۶)$$

در معادلهٔ (۶)، U_τ سرعت اصطکاکی، ν لزجت سینماتیکی و k_s برابر با زبری ذرات ماسه است. که بر این اساس سه نوع رژیم جریان، برای جریان مغشوش نزدیک دیواره به شرح زیر بیان می‌شود.

رژیم صیقلی (ازلحاظ هیدرودینامیکی) با مقدار $k_s^+ \leq 2 \cdot 25$

رژیم گذار با مقدار $2 \cdot 25 \leq k_s^+ \leq 90$

رژیم کاملاً زبر با مقدار $k_s^+ \geq 90$

برای یک سطح زبر تابع دیواره با افزودن ترم انتقال زبری (ΔB) به‌صورت معادله (۷) اصلاح می‌گردد.

$$\frac{u_p u^*}{\frac{\tau_w}{\rho}} = \frac{1}{k}\ln\left(\frac{E\rho u^* y_p}{\mu}\right) - \Delta B \qquad (۷)$$

که در آن اندازه سرعت u^* برابر $u^* = C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}$ است. همچنین ΔB یک تابع زبری بوده که جابجایی معادله تابع دیواره را به واسطه اثرات زبری بیان می‌کند. . به‌طور کلی ΔB تابعی از نوع زبری و اندازه زبری دیواره می باشد. با توجه به عدم وجود یک نوع تابع دیواره عمومی معتبر برای تمام انواع زبری، برای زبری دانه شن و انواع مشابه‌ای از عناصر زبری یکنواخت، می‌توان تابع زبری ΔBرا ارائه نمود که با ارتفاع زبری بدون بعد، به طور مناسبی همبسته شده باشد. تحلیل نتایج تجربی حاکی از این موضوع است که تابع زبری ΔB یک تابع یکتا از k_s^+ نبوده، ولی بسته به مقدار آن دارای شکل‌های مختلفی می‌باشد.

جهت محاسبه تابع زبری ΔB برای هر رژیم، از فرمولهای ارائه شده توسط چبیشی و بردشاو که بر مبنای اطلاعات ارائه شده توسط نیکورادزه به دست آمده‌اند استفاده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، برای رژیم صیقلی از مقدار $\Delta B = 0$ استفاده می‌شود. برای رژیم گذار از تابع زبری (۸) استفاده می‌گردد[۱۵].

$$\Delta B = \frac{1}{k}\ln\left[\frac{k_s^+ - 2.25}{87.75} + C_s k_s^+\right]\sin\left[0.4258(\ln k_s^+ - 0.811)\right] \qquad (۸)$$

در این رابطه ثابت زبری C_s وابسته به نوع زبری است. در رژیم کاملاً زبر از تابع زبری (۹) استفاده می‌شود. مقدار پیش‌فرض برای ثابت زبری برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود[۱۵].

$$\Delta B = \frac{1}{k}\ln[\,1 + C_s k_s^+] \qquad (۹)$$

۳- شناور مدل و شبکه بندی دامنه حل

مدل DTMB ۵۴۱۵[1] به عنوان یک طرح اولیه برای ناوشکن‌های سطحی در سال۱۹۸۰ساخته شد. مدل مطرح شده از نوع شناورهای جابه‌جایی سطحی بوده که در آن تمام وزن شناور توسط نیروی شناوری خنثی می‌شود. این مدل بدلیل شرایط بدنه، یکی از پرکاربردترین نوع شناور در مدل‌سازی عددی و صنایع نظامی است. ابعاد شناوراصلی و مدل آن در جدول ۱ آمده است.

برای حل عددی جریان اطراف شناور، ابعاد دامنهٔ محاسباتی در قالب ضرایبی از طول شناور انتخاب گردید. شکل ۱ نمایی از ابعاد دامنه حل و شبکه‌بندی آن را نمایش می‌دهد. ابعاد دامنه محاسباتی براساس مطالعه جونز و کلارک انتخاب شده [۱۶] و با توجه به متقارن بودن شناور مدل ۵۴۱۵، برای کاهش حجم محاسبات فقط نیمی از دامنه مدلسازی می شود.

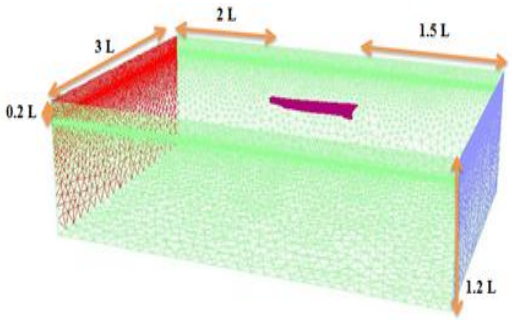
جدول۱- مشخصات شناور ۵۴۱۵ و مدل شناور

مشخصات	شناور اصلی	شناور مدل
طول $[m]$	۱۴۲/۱۸	۵/۷۲
عرض $[m]$	۱۹/۰۶	۰/۷۶۸
آبخور $[m]$	۶/۱۵	۰/۲۴۸
سطح خیس $[m^2]$	۲۹۷۲/۶	۴/۸۶۱
جابجایی $[m^3]$	۸۴۲۴/۴	۰/۵۵۴

مدل‌سازی هندسه های پیچیده، توسط شبکه‌های با سازمان، به سهولت امکان پذیر نیست. استفاده از شبکه‌های بی سازمان باعث افزایش دقت مدل‌سازی هندسی و تطبیق پذیری بسیار خوب شبکه در ناحیه‌هایی از میدان حل با گرادیان‌های زیاد می‌شود. استفاده از المان‌های چهار وجهی در اطراف بدنه به سلولهای شبکه اجازه می‌دهد که در نواحی منتخب از دامنه سیال به صورت خوشه ای در آمده و درنتیجه باعث بالا رفتن سرعت محاسبات و کاهش پراکندگی عددی شوند. به همین دلایل در این مطالعه از شبکه‌بندی بی‌سازمان با المان‌های چهار وجهی و مثلثی برای مش‌بندی مدل و دامنه حل استفاده گردیده است[۱۷].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.9.4]



شکل ۱- نمایی از ابعاد دامنه حل و مش بندی آن

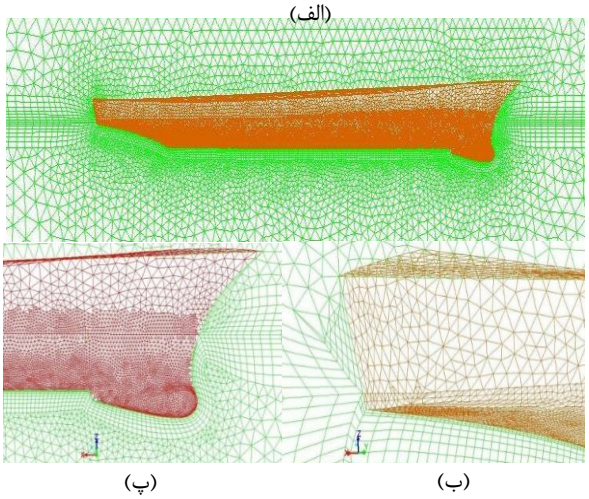
یک عامل مهم برای ارزیابی کیفیت مش در لایه مرزی حول بدنه شناور مقدار بدون بعد y^+ است. تنش برشی روی دیواره را می‌توان به صورت یک مقیاس سرعت مهم بنام سرعت اصطکاکی u_τ تعریف نمود.

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \qquad (۱۰)$$

با استفاده از این سرعت و ویسکوزیته دینامیکی می‌توان مقیاس طول ویسکوزیته را تشکیل داد. حال امکان تعریف سرعت بدون بعد و فاصله بی‌بعد از دیواره وجود دارد.

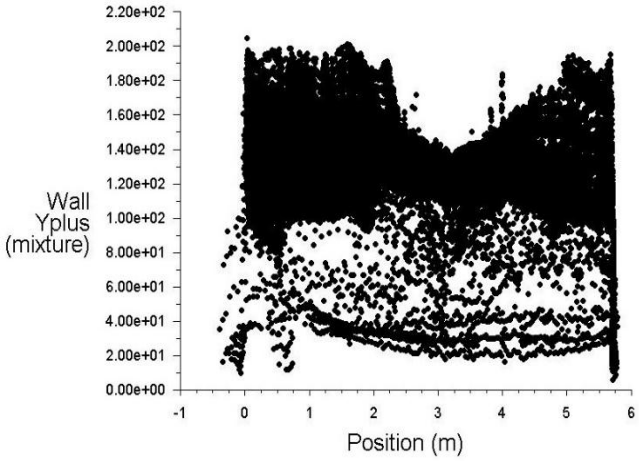
$$l_\upsilon = \frac{\nu}{u_\tau}$$
$$U^+ = \frac{U}{u_\tau} \qquad (۱۱)$$
$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu}$$

جهت حل جریانهای دو فازی در روش تابع دیواره باید محل قرارگرفتن اولین گره نزدیک دیواره (y^+) بزرگتر از ۳۰ بوده و باید توجه نمود که مقدار y^+ در لایه میانی (۳۰>y^+>۵) قرار نگیرد[۱۸]. بعلاوه برای جلوگیری از بدست آمدن جواب غیر فیزیکی، اندازه مش در ناحیه نزدیک دیواره باید بزرگ‌تر از اندازه زبری متوسط در نظر گرفته شود. شکل ۲ مش‌بندی شناور و لایه مرزی اطراف آن را در نماهای متفاوت نشان می‌دهد.



شکل۲- نمایی از مش بندی شناور، (الف): شناور مدل، (ب): نمای نزدیک سینه شناور، (پ): نمای نزدیک انتهای شناور

حداکثر مقدار y^+ در تمامی روش‌های توربولانسی ۳۰۰ در نظر گرفته شده است، چرا که تغییر فاصله اولین گره به بیش از این مقدار، موجب افزایش خطا در نتایج عددی می‌شود. مقدار y^+ مناسب جهت مدلسازی عددی این مساله به‌طور میانگین برابر ۱۳۰ می‌باشد. شکل ۳ نمایی از مقدار y^+ روی بدنه شناور مدلسازی شده را نشان می‌دهد.



شکل۳- مقدار y^+ روی بدنه شناور

۴- شرایط مرزی

با توجه به متقارن بودن شناور مدل، تنها نیمی از دامنه حل، مورد تحلیل قرار گرفته است. برای بدنه شناور از شرط مرزی دیوارهٔ بدون لغزش استفاده شده و شرط مرزی فشار ورودی برای جریان بالادست انتخاب گردید که بر مبنای آن فشار کل در ورودی برحسب فاصله از سطح آزاد محاسبه می گردد. از شرط مرزی فشار استاتیکی نیز در خروجی جریان استفاده گردید. صفحه میانی شناور بعنوان صفحهٔ تقارن و همچنین برای جلوگیری از محاسبات غیر ضروری اثرات لایه‌مرزی در مرزهای کناری و بالا و پایین از شرط مرزی تقارن لحاظ گردیده است.

شدت توربولانسی جریان آزاد در مرز ورودی مقدار ۲ درصد انتخاب گردید. مقدار پارامترهای انرژی جنبشی آشفتگی و شدت توربولانسی با استفاده از روابط (۱۲) محاسبه می‌گردد. در فرود ۰/۴۱، مقدار آنها به ترتیب برابر ۰/۰۰۵۶۵۸۶ و ۱/۲۲۹۳۹۹ می‌باشد

$$I = 0 \cdot 16Re^{-1/8}$$
$$\mathrm{K} = \frac{3}{2}(u_{avg} \cdot I)^2$$
$$\varepsilon = C_\mu \frac{K^{3/2}}{l} \qquad (۱۲)$$
$$l = 0 \cdot 07L_s$$

با توجه به استفاده از روش حجم محدود برای گسسته‌سازی معادلات حاکم، از الگوریتم سیمپل برای کوپله کردن میدان سرعت و فشار استفاده شده است. گسسته سازی معادله فشار به روش

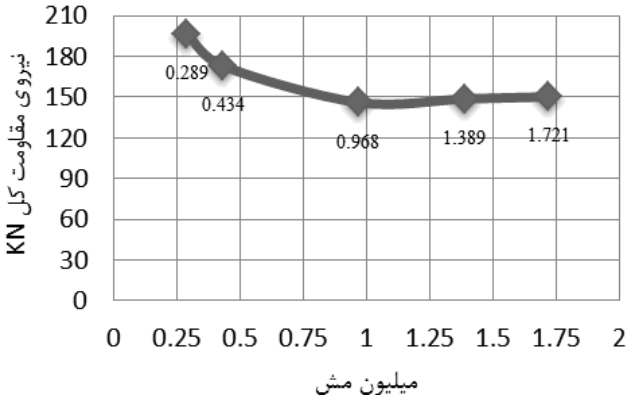
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.9.4]

PRESTO[۲] انجام گردیده و معادلات مومنتوم، انرژی جنبشی توربولانسی، نرخ اتلاف توربولانسی و کسر حجمی از تقریب بالا دست مرتبه دوم استفاده شده است. برای اعمال تغییر شکلهای پیچیده در سطح مشترک دو سیال، روش حجم سیال برای مدل‌سازی سطح آزاد به کار گرفته شد. ملاک همگرایی برای هر متغیر بر اساس ثابت ماندن ضریب لیفت و درگ و همچنین عدم‌تغییر شکل موج در سطح آزاد جریان انتخاب گردیده است.

۵- همگرایی و استقلال شبکه

برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج به زمان از تغییرات ضرایب درگ و لیفت در مقابل زمان در روند حل استفاده می‌شود. بنحوی که با گذشت زمان تغییر چندانی در مقادیر آن‌ها ملاحظه نشود. دراین مطالعه، زمان لازم برای اطمینان از همگرایی حل مسئله عددی، ۱۵ ثانیه و با گام زمانی برابر ۰/۰۰۵ ثانیه در نظر گرفته شده و در هر گام زمانی نیز حداکثر ۲۰ تکرار صورت پذیرفته است. در این مطالعه از شبکه‌بندی ثابت برای مدل‌سازی استفاده شده است. با افزایش تعداد شبکه به بیش از ۱/۷ میلیون مش، زمان محاسباتی لازم برای حل مسئله نیز به شدت افزایش می‌یابد. با توجه به خطای کم بین شبکه‌بندی حالت چهارم و پنجم، از تعداد شبکه‌های کمتر، یعنی شبکه‌بندی با تعداد ۱/۳۸۹ میلیون مش استفاده شده است. تصویر شماره ۴ نتایج این بررسی را نشان می‌دهد. در این تصویر مقدار نیروی درگ تجربی برابر ۱۵۲/۷ کیلو نیوتن می باشد[۱۹].



شکل۴- استقلال مش در فرود ۰/۴۱

۶- مدل آشفتگی

خور و ژاوٗ با استفاده از مدل آشفتگی k-ε به شبیه‌سازی اثرات زبری فولینگ‌ها پرداختند. آنها برای بهبود رفتار جریان نزدیک دیواره در این مدل توربولانسی، تابع دیواره استاندارد را بکار بردند[۸]. کورکوت و یوستا نیز با بکار گرفتن همین مدل آشفتگی به مدل‌سازی عددی اثرات زبری سطح بر روی مشخصه‌های نیروی مقاومت پرداختند[۹]. به همین دلیل در این پژوهش نیز از مدل توربولانسی k-ε استاندارد در پیش بینی الگوی جریان در سطح آزاد و محاسبه نیروی مقاومت وارد بر شناور DTMB 5415گردید. با انتخاب مدل آشفتگی مناسب جریان اطراف شناور مدل در اعداد فرود بین ۰/۲۵ تا ۰/۴۱ بوسیله مدل $k-\varepsilon$ شبیه‌سازی گردید که نتایج آن در جدول شماره ۲ نشان داده شده است. جدول ۲ بیانگر دقت بالای روش عددی مورد استفاده در محاسبه نیروی مقاومت است. به منظور معتبرسازی نتایج عددی بدست آمده، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تست مدل اولیور و همکاران [۱۹] مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. این مقایسه نشان دهنده تطابق بسیار بالای الگوی موج انتشار یافته در سطح آزاد و خطای پایین در محاسبه نیروی درگ وارد بر کشتی است.

جدول۲- مقایسه نتایج تجربی و عددی نیروی مقاومت بدنه شناور مدل

مشخصه	عدد فرود			
	۰/۲۵	۰/۲۸	۰/۳۵	۰/۴۱
نیروی درگ تجربی [۱۹]، $[kN]$	۳۴/۶۸	۴۵/۱۸	۸۰/۶۶	۱۵۲/۷
نیروی درگ عددی $[kN]$	۳۷/۳۲	۴۷/۲۵	۸۷/۵	۱۴۸/۸
خطا [%]	۷/۶	۴/۵	۸/۴	۲/۵

برآمدگی سطح آب در قسمت دماغه بدنهٔ شناور (ناحیه پرفشار) و فرورفتگی آن در قسمت پاشنه به وضوح در تصاویر ۵ و ۶ قابل رؤیت است. این پدیده در حالت تجربی نیز مشاهده می‌شود. در هر دو تست تجربی و عددی جریان از ورودی دامنه حل وارد و بصورت کارتزین و فقط در جهت طول کشتی جریان می یابد. مقایسه الگوی موج ایجاد شده به روش عددی با نتایج تجربی موجود، توانایی مدل k-ε در شبیه‌سازی سطح آزاد کشتی را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین نمودار الگوی موج روی سطح بدنه شناور نیز با دقت قابل قبولی بدست آمده است که در ادامه به بررسی آن پرداخته می‌شود.

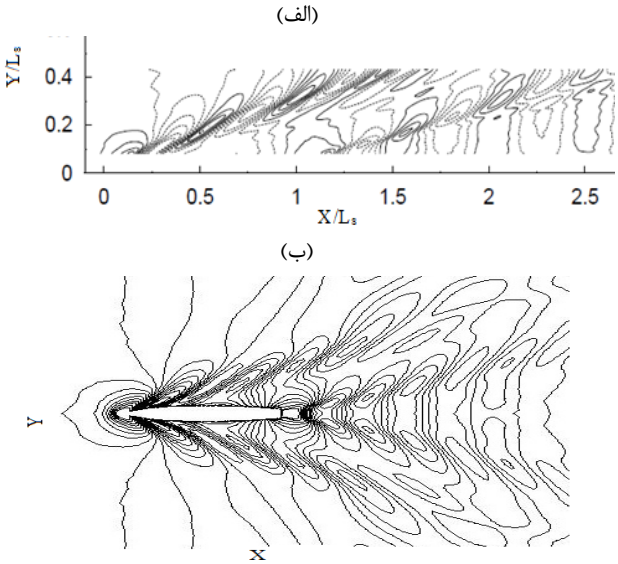
در فرود ۰/۲۸ ضریب درگ کل بدست آمده توسط مدل استاندارد k-ε، ۴/۰۱ درصد بیشتر از مقدار تجربی آن می‌باشد. در حالی که پیش‌بینی این مدل از ضریب درگ فشاری، تنها ۲ درصد اختلاف با مقدار آزمایشگاهی را دارد. ضریب درگ اصطکاکی و ضریب درگ فشاری با استفاده از معادلات (۱۳) محاسبه شده‌اند.

$$C_F = \frac{R_F}{0{\cdot}5\rho AU^2}$$
$$C_P = \frac{R_P}{0{\cdot}5\rho AU^2} \qquad (۱۳)$$

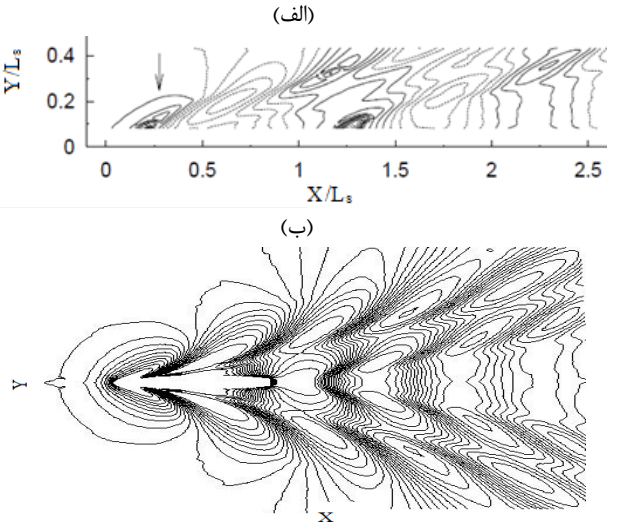
در شکل ۷ ارتفاع قله موج بدرستی در فرود ۰/۲۸ شناسایی شده است. امّا روش عددی مورد استفاده تغییرات ارتفاع موج روی بدنه شناور را کمتر و ارتفاع موج در پاشنه شناور را بیشتر از مقدار تجربی محاسبه کرده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

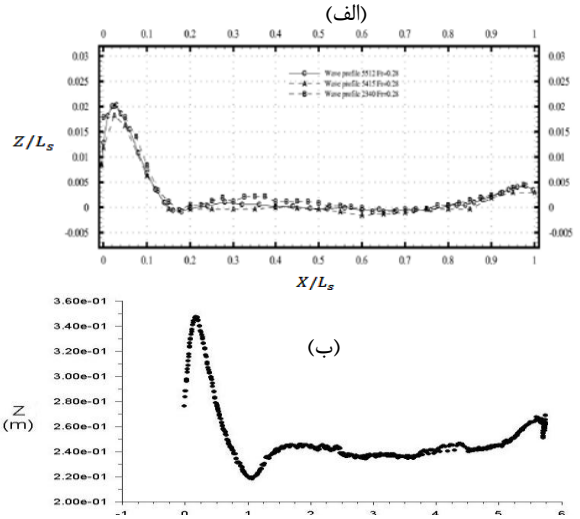
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.9.4]



شکل۵- مقایسه انتشار موج مدل‌سازی شده در سطح آزاد شناور ۵۴۱۵ با مقادیر تجربی فرود ۰/۲۸،(الف): موج تجربی ، (ب): موج عددی

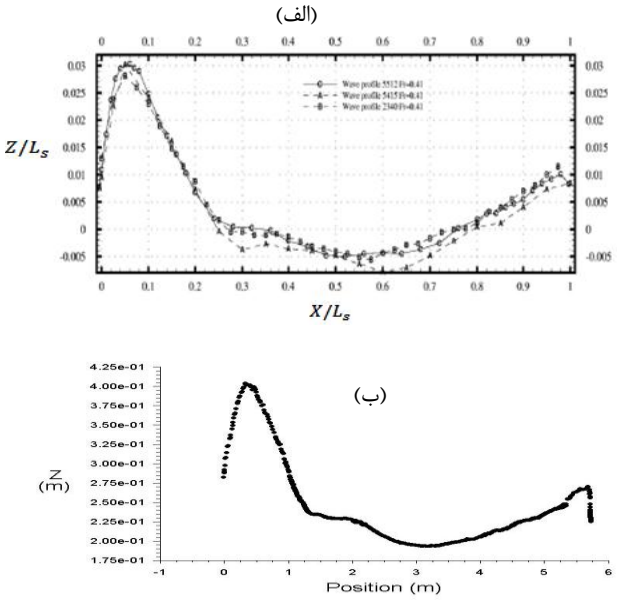


شکل۶- مقایسه انتشار موج مدل‌سازی شده در سطح آزاد شناور ۵۴۱۵ با مقادیر تجربی در فرود ۰/۴۱،(الف): موج تجربی، (ب): موج عددی



شکل۷- معتبر سازی پروفایل موج روی سطح بدنه شناور در فرود ۰/۲۸، (الف): موج تجربی، (ب): موج عددی

با مقایسه پروفایل موج عددی در فرود ۰/۴۱ در شکل ۸ با نتایج تجربی می‌توان دریافت که روش عددی ارتفاع قله موج در سینه شناور را بطور دقیق پیش‌بینی نموده است. همچنین تغییرات ارتفاع موج روی بدنه شناور مدل نیز در این سرعت منطبق بر مقادیر تجربی است امّا ارتفاع موج در پاشنه شناور کمی کمتر از مقدار تجربی آن می باشد.



شکل۸- معتبر سازی پروفایل موج روی سطح بدنه شناور در فرود ۰/۴۱، (الف): موج تجربی، (ب): موج عددی

۷- مدل‌سازی اثر فولینگ‌های دریایی

در این بخش به مدلسازی فولینگهای دریایی و میزان افزایش نیروی درگ ناشی از آنها پرداخته می شود. رژیمهای زبری رخ داده و اثر فولینگها بر افزایش و یا کاهش ارتفاع موج در قسمتهای مختلف کشتی به همراه تغییرات در اجزاء نیروی درگ مورد مطالعه و گزارش می گردد. به منظور مدل‌سازی زبری از یک شرط مرزی اصلاح شده که همان ارتفاع زبری معادل ماسه می‌باشد، استفاده گردید. به دلیل رویش خزه‌های دریایی تا قسمت آبخور شناور، محدودیتی برای شرط مرزی اصلاح شده اعمال می‌گردد تا تنها قسمت‌های زیر آبخور شناور تحت تأثیر قرار بگیرند. در این تحقیق زبری معادل دانه‌های ماسه یکنواخت فرض شده و مقدار $C_s = 0.5$ برای مدل‌سازی زبری استفاده شده است. محاسبه نرخ فولینگها براساس دستورالعمل اجرایی کشتیهای نیروی دریایی امریکا انجام گردیده [۲۰] و مقدار زبری معادل آنها نیز بر اساس ارتفاع زبری معادل ماسه و میانگین زبری پوشش اندازه‌گیری شده در مطالعه شولتز در نظر گرفته شده است[۶]. زبری بدنه شناور در چهار حالتِ لجن و گل‌ولای کم و شدید و همچنین خزه گرفتگی آهکی کم و شدید زبری در عدد فرود ۰/۴۱ شبیه‌سازی و نتایج در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.9.4]

جدول ۳ نشان داده شده است. در این جدول در ستون اول مقدار زبری معادل فولینگ‌ها و در ستون دوم نتایج تجربی بدست آمده از تست حوضچه کشش ارائه شده است. سپس مقدار افزایش در نیروی درگ به دلیل رشد فولینگ بر بدنه کشتی مدل DTMB5415 محاسبه و با مقادیر تجربی مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان می دهند که دقت و توانایی روش استفاده شده در مدل‌سازی زبری سطح بدنه کشتی بسیار خوب بوده و نتایج به‌دست‌آمده به مقادیر تجربی بسیار نزدیک است.

وجود یک لایه نازک از لجن وگل‌ولای کم موجب افزایش ۴/۵۸ درصدی نیروی درگ کل در فرود ۰/۴۱ می‌شود. حال آنکه خزه‌زدگی آهکی شدید نیروی درگ را تا ۳۹/۲ درصد افزایش می‌دهد که این مقدار تنها ۳/۸ درصد خطا با مقدار آزمایشگاهی دارد.

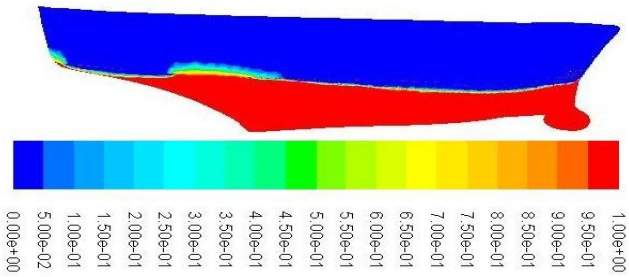
جدول۳- درصد افزایش نیروی درگ به دلیل فولینگ‌ها بر حسب زبری معادل آنها در فرود ۰/۴۱

مشخصه	k_s (μm) [۶]	فرود ۰/۴۱		
		EXP [۲۷]	CFD	درصد خطا
لجن و گل ولای کم	۱۰۰	٪ ۷	٪ ۴/۵۸	٪ ۲/۴۲
لجن و گل ولای شدید	۳۰۰	٪ ۱۲	٪ ۱۳/۵	٪ ۱/۵
خزه‌زدگی آهکی کم	۱۰۰۰	٪ ۱۹	٪ ۲۴/۷	٪ ۵/۷
خزه‌زدگی آهکی شدید	۱۰۰۰۰	٪ ۴۳	٪ ۳۹/۲	٪ ۳/۸

براساس نتایج بدست آمده، افزایش زبری بدنه کشتی حتی به میزان اندک نیز باعث افزایش قابل توجهی در نیروی درگ وارد بر کشتی شده و با افزایش مقدار k^+ به قابلیت مدل $k-\varepsilon$ در تسخیر فیزیک جریان افزوده می‌شود. نتایج نشان می دهد که در سرعت‌های بالا دقت این مدل در محاسبه نیروی درگ وارد بر سطوح صاف و زبر بسیار بالا می باشد. بعلاوه مقدار نیروی درگ عددی بدست آمده برای کشتی با صفحهٔ زبر دارای خطای کمتر و به تبع آن بیشتر به نتایج تجربی نزدیک است؛ لذا به نظر می‌رسد که دقت مدلهای آشفتگی هر چه که به شرایط صفحات واقعی نزدیک‌تر می‌شود (شرایطی که در آن زبری هر چند به میزان اندک وجود دارد) بالاتر می رود.

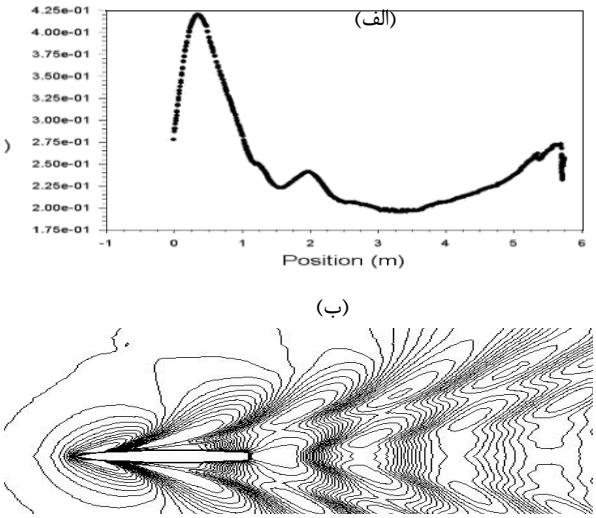
در تحلیل عددی انجام شده اثرات دو رژیم زبری گذرا و رژیم کاملاً زبر در جریان اطراف شناور به دلیل رشد فولینگها بر روی بدنه شناور دیده می‌شود. همچنین نتایج نشان می دهد در رسوب گرفتگی آهکی کم و شدید، رژیم کاملاً زبر و در سایر شرایط رژیم زبری گذرا اتفاق می افتاد. در رژیم زبری گذرا حساسیت جریان به مقدار y+ بسیار بیشتر، زمان همگرایی بیشتر و دقت کمتری در مقایسه با رژیم کاملاً زبر مشاهده می‌شود.

ناوشکن سطحی ۵۴۱۵ در حالت طبیعی دارای یک پاشنه کاملاً خشک بوده و مدل شبیه‌سازی شده آن نیز دارای همین ویژگی می‌باشد و تغییرات زبری سطح، اثری بر روی تر شدن پاشنه شناور نداشته و نوع رژیم در پاشنه را تغییر نمی‌دهد. تصویر ۹ بیان کننده این موضوع می‌باشد.



شکل۹- رژیم خشک در پاشنه شناور مدل ۵۴۱۵

زبری سطح موجب همگرایی سریع‌تر شکل موج در سطح آزاد شده امّا شکل موج در سطح آزاد را تغییر نمی‌دهد. خزه گرفتگی موجب تغییر پروفایل موج روی سطح بدنه شناور شده و ارتفاع قله موج در سینه شناور افزایش می‌یابد. امّا ارتفاع موج در پاشنه شناور ثابت می‌ماند. این تغییرات در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



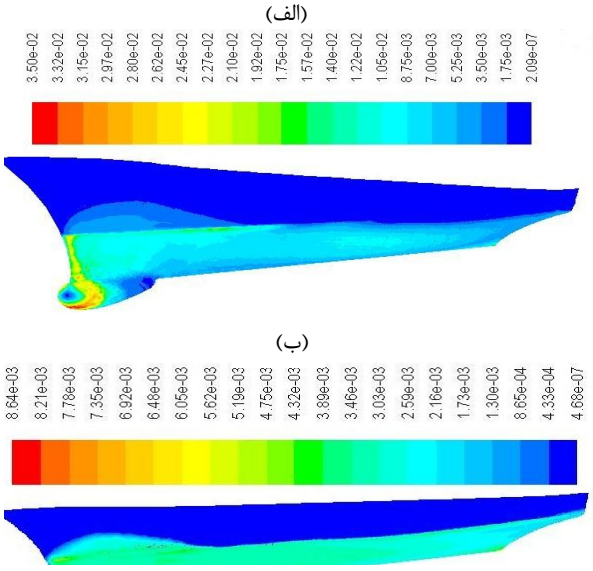
شکل۱۰ - مقایسه تغییرات امواج روی سطح آزاد و بدنه شناور در حالت خزه گرفتگی آهکی کم در فرود ۰/۴۱، (الف): پروفایل موج روی بدنه، (ب): انتشار موج در سطح آزاد

فولینگها موجب افزایش شدید نیروی درگ اصطکاکی می‌شوند. همانگونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است تغییرات ضریب درگ اصطکاکی در طول شناور بشدت افزایش یافته که این تغییرات در دماغه و سینه شناور شدیدتر است. امّا تغییرات ضریب درگ فشاری با رشد فولینگها بر بدنه کشتی ثابت باقی می‌ماند. شکل ۱۲ به مقایسه تغییرات ضریب درگ فشاری شناور در حالتهای مختلف پرداخته است. افزایش و یا کاهش ارتفاع زبری

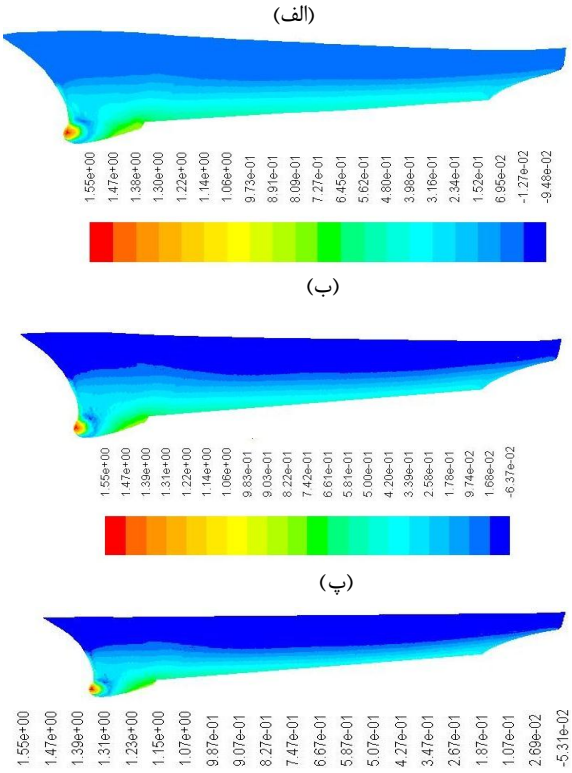
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.9.4]

سطح در یک سرعت معین رابطه مستقیمی با نیروی درگ اصطکاکی وارد بر بدنه شناور دارد و موجب تغییرات شدیدتری بر روی دماغه و سینه کشتی می‌شود. امّا نیروی درگ فشاری، الگوی شکل موج و پروفایل موج روی بدنه کشتی با افزایش ارتفاع زبری تغییری نمی‌یابد.

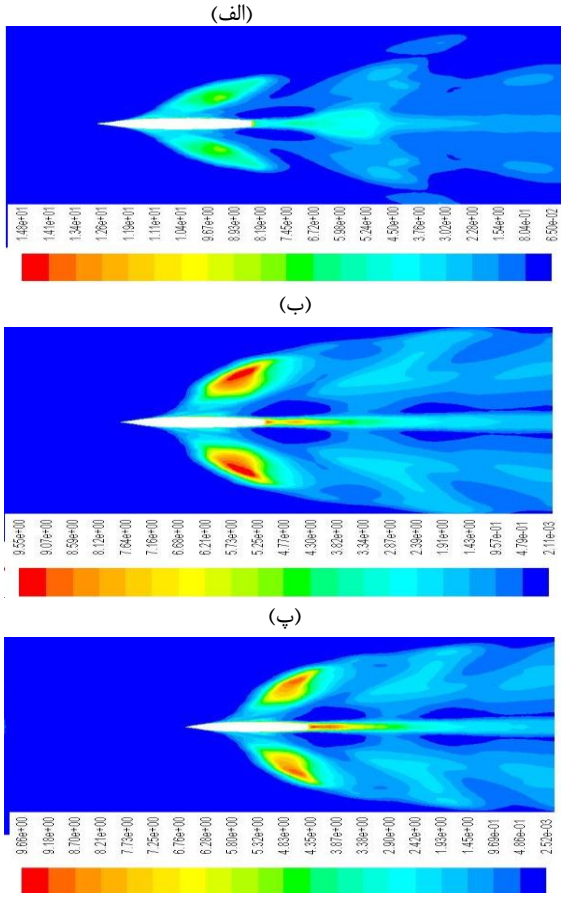


شکل۱۱ – مقایسه تغییرات ضریب درگ اصطکاکی شناور در فرود ۰/۴۱، (الف): شناور صیقلی، (ب): شناور در حالت خزه گرفتگی آهکی شدید



شکل۱۲ – مقایسه تغییرات ضریب درگ فشاری شناور در فرود ۰/۴۱، (الف): شناور صیقلی، (ب): شناور در حالت لجن وگل ولای شدید، (پ): شناور در حالت خزه گرفتگی آهکی شدید

ناحیه پرفشار در دماغه (سینه) و قسمت انتهایی کشتی به خوبی توسط روش عددی شناسایی شده است که بیشترین مقدار ضریب فشار در نقطه سکون روی سونار(کلاهه ردیاب) جایی که سرعت سیال به صفر می رسد مشاهده می شود. در این ناحیه اثرات نقطه سکون بر الگوی جریان چیره بوده و سرعت و فشار را تحت تأثیر خود قرار می دهد. افزایش سرعت جریان به ترتیب موجب افزایش و کاهش، بیشترین و کمترین مقدار ضریب درگ فشاری می‌شود. زبری ناشی از فولینگها موجب افزایش شدت توربولانسی جریان حول شناور مدل شده و لذا باعث افزایش نیروی درگ می‌شود. شکل ۱۳ تغییرات شدت آشفتگی جریان در سطح آزاد شناور در حالتهای خزه گرفتگی آهکی کم و لجن و گل‌ولای کم را نشان می دهد. همانگونه که شکل ۱۳ نشان می دهد، با افزایش شدت زبری شدت توربولانسی جریان در سطح آزاد نیز افزایش یافته بطوریکه ماکزیمم مقدار شدت توربولانسی در دامنه حل به بیش از دو برابر مقدار شدت توربولانسی شناور با سطح صیقلی می رسد.



شکل۱۳ – مقایسه تغییرات شدت آشفتگی در سطح آزاد در فرود ۰/۴۱، (الف): شناور صیقلی، (ب): شناور در حالت لجن وگل ولای کم، (پ): شناور در حالت خزه گرفتگی آهکی کم

۸- پوشش‌های نوین ضدخزه

امروزه تحقیقات در سطوح گسترده‌ای برای دستیابی به پوشش‌هایی پاک و با طول عمر بالا در حال انجام است. تمامی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

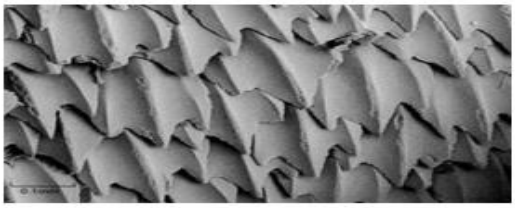
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.9.4]

سطوحی که در آب قرار می‌گیرند تحت پدیده خزه بستن قرار می‌گیرند، اما برخی موجودات دریایی مانند درشت جلبک‌ها، اسفنج‌ها، جانوران مرجانی و غیره قادر به تولید موادی با خاصیت ضدخزه از خود می باشند[۲۱].

هرچه عمق زبری بیشتر باشد، مساحت سطح برای چسبندگی ارگانیزم‌ها بیشتر می شود. استفاده از ترکیب نانو لوله‌های کربنی با پلیمرها، نانو ذرات فلزی، مولکول‌های زیستی و اکسیدهای فلزی موجب افزایش خواص ضدخزه و مقاومت در برابر چسبیدن رسوب به سطح می‌شود. نانو لوله‌های کربنی به‌صورت طبیعی به سبب ساختار سوزن مانند و ابعاد نانومتری، به داخل دیواره سلولی نفوذ کرده و موجب خاصیت زیست‌کشی می شود[۲۲-۲۳].

پوشش با ساختار مشابه پوست کوسه نیز یکی دیگر از پوشش‌هایی است که توجه زیادی را بخود جلب کرده است. این پوشش بر پایه نانو سیلیکون ساخته‌شده و بسیار مقاوم در برابر ضربه، سایش و اشعه ماوراءبنفش است.

تحمل نوسانات دمایی بین ۵۵- تا ۷۰ درجه سانتی گراد نیز از دیگر ویژگی‌های این پوشش برای استفاده در شناورهایی با سرعت بالا است. این پوشش با الهام گرفتن از پوست کوسه ساخته‌شده است. تصویر شماره ۱۴ ساختار پوست بدن کوسه را نشان می‌دهد که شیارهای روی آن با هدایت جریان موجب تقویت جریان شده و با افزایش سرعت، شدت توربولانسی و تولید ورتکس کاهش می‌یابد. در این صورت نرخ تغییرات سرعت و تنش برشی نیز کاهش می‌یابد. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این پوشش موجب کاهش مصرف سوخت شناور کانتینربر معمولی تا ۲۰۰۰ تن در سال می‌شود[۲۴].



شکل۱۴ - ساختار پوست کوسه[۲۴]

گروه تحقیقاتی AMBIO در بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ میلادی به تحقیق بر روی پوششهای نانو ساختار که مانع از چسبیدن موجودات دریایی به بدنه شناور می‌شوند پرداخت. هدف از این تحقیقات دستیابی به پوششی با بیشترین کاهش در نیروی درگ به همراه جلوگیری از چسبیدن موجودات دریایی بود[۲۵]. در این تحقیق، طیف وسیعی از پوششها مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت پوششهای AKZO19 و AKZO20 بر پایه سیلیکون و فلوئوروپلیمر و AKZO21 بر پایه سیلیکون و AKZO28 بر پایه سیلیکون و نانو تیوب بعنوان مناسب‌ترین پوشش معرفی گردیدند[۲۶].

۹- مدل‌سازی کاهش درگ بدلیل استفاده از آنتی فولینگ‌ها

در تحقیق حاضر شبیه‌سازی عددی اثرات آنتی فولینگها در جلوگیری از رشد خزه بر روی بدنه کشتی با استفاده از نتایج تحقیقات شولتز بر روی پوششهای سیلیکونی نوع اول و کوپلیمر مسی خود ساینده انجام گردید[۶]. به این منظور ابتدا مقدار زبری معادل تمامی پوششها محاسبه گردیده و سپس نیروی درگ ناشی از آنتی فولینگها در شرایطی که سطح آنها دچار خزه گرفتگی باشد مورد محاسبه قرار گرفت.

بر اساس نتایج بدست آمده استفاده از پوششهای ضدخزه باعث کاهش نیروی مقاومت کل وارد بر ناوشکن سطحی مورد مطالعه در تا ۳۷٪ در فرود ۰/۴۱ می گردد. همچنین نتایج نشان می دهد که تحت پایین‌ترین سطح از خزه زدگی (لجن و گل‌ولای کم) نیز استفاده از پوششهای ضدخزه، موجب کاهش ۳ درصدی نیروی درگ می‌شود.

جدول۴- درصد تغییرات نیروی درگ ناشی از آنتی فولینگ‌ها در شرایط خزه گرفتگی در فرود ۰/۴۱

مشخصه پوشش	k_s^* (μm)	$Fr = 0 \cdot 41$ نیروی درگ(N)	EXP [۲۷]	CFD
سیلیکون	۳۰	۱۵۰/۲۲	٪ ۳	٪ ۱/۶۲
کوپلیمر مسی خودساینده	۱۱/۵	۱۴۹/۳۶	-	٪ ۲/۱۸

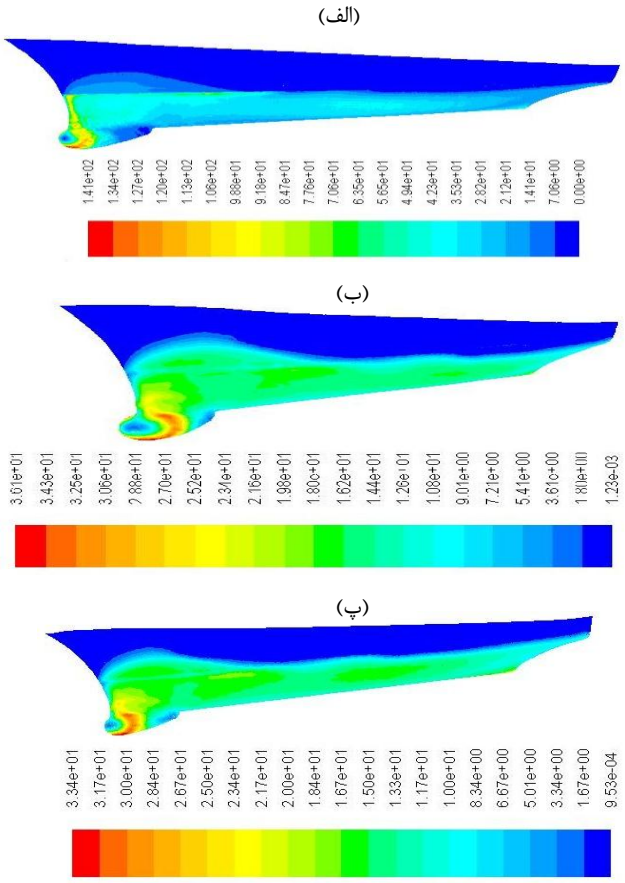
با مقایسه نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر تجربی شولتز و همکاران می‌توان صحت و دقت نتایج را مورد بررسی قرار داد[۲۷]. بررسی‌ها نشان می دهد در فرود ۰/۴۱ دقت نتایج بسیار خوب بوده و نزدیک به مقادیر حوضچه کشش است. در این سرعت پوشش خزه رهاساز سیلیکونی به دلیل داشتن زبری سطح بیشتر نسبت به پوشش خود صیقل دهنده مسی، موجب افزایش بیشتری در نیروی مقاومت می‌شود (جدول ۴). پیش‌بینی کمتر نیروی درگ شناور صیقلی در روش عددی موجب می‌شود تا درصد افزایش در نیروی درگ بدلیل بکار بردن پوشش سیلیکونی ضمن داشتن مقدار زبری معادل بیشتر نسبت به پوشش مسی خودساینده، کاهش یابد. در این پوششها رژیم جریان از نظر هیدرودینامیکی کاملاً صاف می باشد و لذا کوچک بودن مقدار زبری هر دو پوشش، تغییرات ملموسی را در ضرایب درگ روی بدنه شناور، الگوی موج در سطح آزاد و پروفیل موج روی بدنه شناور نسبت به بدنه صیقلی ایجاد نخواهد نمود. بعلاوه ارتفاع قله موج نیز تغییری نسبت به بدنه صیقلی نداشته و ثابت باقی می‌ماند. امّا هر دو پوشش با داشتن

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.9.4]

اندک زبری، نیروی درگ وارد بر شناور را نسبت به سطح کاملا صیقلی افزایش می‌دهند.

استفاده از آنتی فولینگ‌ها موجب کاهش شدید تنش برشی وارد بر بدنه شناور می‌شود. همانگونه که در شکل ۱۵نمایان است استفاده از این پوشش‌ها، تنش برشی وارد بر بدنه شناور بدلیل رویش فولینگ‌ها را بسیار کاهش می‌دهد. پوشش‌های ضد خزه با زبری سطح بیشتر نیز، موجب کاهش کمتر نیروی درگ ناشی از فولینگ‌ها می‌شوند.



شکل۱۵ – مقایسه تنش برشی وارد بر بدنه شناور با سرعت جریان آزاد ۳/۰۷۱ m/s در فرود ۰/۴۱ ، (الف): شناور در حالت خزه گرفتگی آهکی شدید، (ب): شناور با پوشش سیلیکونی، (پ):شناور با پوشش کوپلیمرمسی

۱۰- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق بررسی تاثیر فولینگها یا خزه‌های دریایی بر روی عملکرد سطح یک شناور و همچنین مطالعه بکارگیری روشهای نوین و کاربردی در کاهش نیروی درگ ناشی از آنها است. برای این منظور ابتدا شناور صیقلی توسط مدل $k-\varepsilon$ در سرعتهای مختلف شبیه‌سازی و با نتایج تجربی معتبرسازی گردید. مطالعات نشان می دهد که پیش‌بینی مدل $k-\varepsilon$ از ضریب درگ فشاری تنها ۲ درصد با مقدار تجربی اختلاف دارد و دقت این مدل با افزایش سرعت جریان افزایش می‌یابد.

شبیه‌سازی اثرات زبری سطح ناشی از فولینگها بر عملکرد شناور مدل در شرایط مختلف خزه‌زدگی انجام گرفت. نتایج نشان دادند که وجود یک‌لایه بسیار نازک از لجن و گل‌ولای باعث افزایش ۵ درصدی نیروی درگ وارد بر شناور می‌شود. در خزه زدگی آهکی شدید نیروی درگ شناور تا ۴۰ درصد، در فرود ۰/۴۱ افزایش می‌یابد که به دلیل وجود بارناکل‌ها بر سطح بدنه کشتی است..

با مقایسه تغییرات فشار و الگوی موج روی بدنه کشتی کاملاً صاف، مشخص گردید که وجود زبری سطح علاوه بر افزایش نیروی درگ باعث افزایش ارتفاع موج روی سینه کشتی می‌شود در حالی که زبری تاثیر بسیار ناچیزی بر تغییرات ضریب درگ فشاری دارد. مطالعه نشان می دهد زبری ناشی از فولینگها موجب افزایش شدت توربولانسی جریان حول شناور مدل می‌شود که این امر نیز خود باعث افزایش نیروی درگ می‌شود. بعلاوه نتایج نشان دادند که تغییرات زبری سطح، اثری بر روی تر شدن پاشنه شناور نداشته و رژیم خشک روی پاشنه شناور را تغییر نمی‌دهد.

در انتها استفاده از پوششهای ضدخزه و خزه رهاساز به عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌های جلوگیری از افزایش نیروی درگ به وسیله فولینگهای دریایی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان می دهد با بکار بردن پوشش سیلیکونی بر پایه دی متیل سیلوکسان نیروی درگ ناشی از فولینگ‌های دریایی بین ٪۳ تا ٪۳۷ کاهش می‌یابد. پوشش خود صیقل دهنده مسی به دلیل داشتن سطحی با زبری کمتر باعث کاهش نیروی درگ بیشتری می‌شود. در این پوششها رژیم جریان ازنظر هیدرودینامیکی کاملاً صاف است. همچنین نتایج تحقیق نشان می دهد کوچک بودن مقدار زبری هر دو پوشش، تغییرات ملموسی را در ضرایب درگ روی بدنه شناور، الگوی موج در سطح آزاد و پروفیل موج روی بدنه شناور نسبت به بدنه صیقلی ایجاد نخواهد کرد.

۱۱- تشکر و قدردانی

بدینوسیله مولفین مراتب تشکر و قدردانی خود را از حمایت های مالی دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار و همچنین گروه صنایع شهید محمدرضا صفایی, شیراز اعلام می‌نماید.

کلید واژگان

1- David Taylor Model Basin
2- Pressure Staggering Option

فهرست علائم

U_p	سرعت جریان متوسط در نقطه p در نزدیکی دیوار	k_p	انرژی جنبشی توربولانسی در نقطه p
k	انرژی جنبشی آشفتگی	C_s	ثابت زبری
ΔB	ترم انتقال زبری	k_s^+	عدد رینولدز زبری
k_s	زبری معادل ذرات ماسه	ε	اتلاف آشفتگی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.9.4]

لزجت توربولانسی	μ_t	سرعت اصطکاکی	U_τ
دانسیته	ρ	فاصله نقطه p در نزدیکی دیواره تا دیوار	y_p
طول کشتی	L_s	سرعت کشتی	U_s
ضریب درگ اصطکاکی	C_F	مقاومت اصطکاکی	R_F
مقاومت فشاری	R_p	ضریب مقاومت فشاری	C_p
عدد فرود	Fr	عدد رینولدز	Re

۱۲- مراجع

1- Mieno, H. and Masuda, H., (2013), *Friction increase due to roughness of ship hull paint*, Marine Engineering, Vol.48, p.300-307.

2- Mcentee, W., (1916), *Variation of frictional resistance of ships with condition of wetted surface*, Journal of the American Society for Naval Engineers, Vol.28, p.311–314.

3- Schultz, M.P. and Swain, G.W., (1999), *the effect of biofilms on turbulent boundary layers*, Journal of Fluids Engineering, Vol.121, p.44-51.

4- Nikuradse, J., (1933), *Laws of flow in rough pipes*, by Francis R. Hama, NACA Technical Memorandum, Vol.4.

5- Hama, F.R., (1954), *Boundary layer characteristics for smooth and rough surface*, Society of Naval Architects Marine Engineers (SNAME), Vol.62.

6- Schultz, M.P., (2004), *Frictional resistance of antifouling coating systems*, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol.126, p.1039–1047.

7- Schultz, M.P., (2007), *Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering*, Biofouling, Vol.23, p.331-341.

8- Khor, Y.S. and Xiao, Q. (2011), *CFD simulations of the effects of fouling and antifouling*, Ocean Engineering, Vol.38, p.1065-1079.

9- Usta, O. and Korkut, E. (2013), *A Study for the effect of surface roughness on resistance characteristic of flat plates*, Marine Coatings, London, United Kingdom.

10- Demirel, Y.K., Khorasanchi, M., Turan, O. and Incecik, A. (2013b), *on the importance of antifouling coatings regarding ship resistance and powering*. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Technologies, Operations, Logistics and Modeling for Low Carbon Shipping, London, United Kingdom.

11- Demirel, Y.K., Khorasanchi, M., Turan, O., Incecik, A. and Schultz, M.P., (2014), A CFD model for the frictional resistance prediction of antifouling coatings, Ocean Engineering, Vol.89, p.21–31.

12- Woo Yang, J., Park, H., Hwan Chun, H., Ceccio, S. L., Perlin, M. and Lee, I. (2014), *Development and performance at high Reynolds number of a skin-friction reducing marine paint using polymer additives*, Ocean Engineering, vol.84, p.183-193.

13-Saniee-nejad, M., (2009), *Fundamentals of Turbulent Flows and Their Modeling*, Daneshnegar Publication, 1st Edition, (In Persian)

14- Schlichting, H. and Gersten, K., (1979), *Boundary-layer theory* Spriger.

15- Cebeci, T. and Bradshaw, P., (1977), *Momentum Transfer in Boundary Layers*, New York, McGraw-Hill Book Co.

16- Jones, D.A. and Clarke, D.B., (2010), *FLUENT Code simulation of flow around a naval hull: the DTMB 5415*, Maritime Platforms Division DSTO Defence Science and Technology Organisation.

17- Wu, J.Y. and Lee, R., (1997), *The Advantages of triangular and tetrahedral edge elements for electromagnetic modeling with the finite-element method*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.45, p.1431-1437.

18- FLUENT., (2005), *Fluent Manual, Manual and user guide of Fluent Software.*

19- Olivieri, A., Pistani. F., Avanzini, A., Stern, F. and Penna, R., (2001), *Towing tank experiments of resistance, sinkage and trim, boundary layer, wake and free surface flow around a naval combatant INSEAN 2340 model*, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, IIHR Report.

20- NSTM., (2002), *Waterbourne underwater hull cleaning of Navy ships*, Naval Ships' Technical Manual 31, Chapter 081.

21- Silkina, A., Bazes, A., Mouget, J.L. and Bourgougnon, N., (2012), *Comparative efficiency of macroalgal extracts and booster biocides as antifouling agents to control growth of three diatom species*, Marine Pollution Bulletin, Vol.64, p.2039-2046.

22- Brady, A.S., Kang, S. and Elimelech, M., (2008), A Single walled carbon nanotube filter for removal of viral and bacterial pathogens. *Small*, Vol.4, p.481-484.

23- Kwaadsteniet, M., Botes, M. and Cloete, T.E., (2011), *Application of nanotechnology in antimicrobial coatings in the water industry*, Nano, Vol.06, p.395-407.

24- IFAM,. (2011), *Coating that reduces drag and UV damage, and has other properties*, Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Applied Materials Research.

25- Callow, J.A., (2005-2010), Advanced nanostructured surface for the control of biofouling, *AMBIO*.

26- Ünal, B., Ünal, U.O. and Atlar, M. (2012), *Turbulent Boundary layer measurements over flat surfaces coated by nanostructured marine antifoulings*, Journal of Experiments in Fluids, Vol.52, p.1431-1448.

27- Schultz, M.P., Bendick, J.A., Holm, E.R. and Hertel, W.M.,(2011), *Economic impact of biofouling on a naval surface ship*, Journal of Biofouling, Vol.27, p.87-98.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.9.4]