



مقاله پژوهشی

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



ارائه روش ترکیبی برای تحلیل هیدرودینامیکی شناور سواث

عقیل دارایی، احمد حاجیوند *

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

*نویسنده مسئول، پست الکترونیک: hajivand@kmsu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۲/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22113/JMST.2019.152341.2213

چکیده

پیش بینی مقاومت کشتی مهمترین بخش طراحی هیدرودینامیکی کشتی است. امروزه روش های محاسباتی به عنوان ابزاری متداول برای این منظور استفاده می شوند. محاسبه مقاومت کل شناور با روش عددی دینامیک سیالات محاسباتی به صورت دوفازی به زمان محاسباتی زیادی نیاز دارد. ایده تقسیم بندی مقاومت کل به مولفه های مختلف بر مبنای عامل فیزیکی ایجاد کننده نیرو از اصول اساسی در هیدرودینامیک کشتی است. در روش ترکیبی ارائه شده بر مبنای اصل تقسیم بندی مقاومت، بخش مربوط به مقاومت موج سازی با کمک انتگرال میشل و بخش ویسکوز با حل معادلات جریان واقعی و روش دو بدنه و به صورت تک فاز در محیط دینامیک سیالات محاسباتی بدست آمده است. محاسبات برای ۱۰ سرعت مختلف در بازه عدد فرود ۰/۰۶ تا ۰/۶۲ انجام و در هر سرعت سهم هر کدام از مولفه های مقاومت تعیین گردیده است. در روش ترکیبی زمان محاسبات به شدت کاهش می یابد. برای مقایسه نتایج، شبیه سازی ها در حالت دوفازی نیز انجام شده است. نتایج به دست آمده از روش ترکیبی و دوفازی به طور متوسط ۷ درصد اختلاف دارند با این حال زمان محاسبات حالت ترکیبی به طور متوسط ۹۷ درصد کمتر از زمان شبیه سازی حالت دوفازی به دست آمده است.

واژگان کلیدی: روش انتگرال میشل، دینامیک سیالات محاسباتی، روش ترکیبی دوبدنه، مقاومت موج سازی، مقاومت ویسکوز.

Copyrights:

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



۱. مقدمه

با الزامی شدن انطباق کشتی‌های نوساز با الزامات شاخص طراحی بهره‌وری انرژی سواز مان بین‌المللی در یانوردی (Energy Efficiency Design Index) اهمیت طراحی بدنه شناور با حداقل مقاومت افزایش پیدا کرده است. همچنین، محاسبه مقاومت شناور از بخش‌های بسیار مهم در روند طراحی شناور بوده که در تعیین توان مورد نیاز، طراحی و بهینه‌سازی بدنه شناور و مشخصات پروانه اهمیت دارد. برای محاسبه مقاومت یک کشتی روش‌های مختلفی وجود دارد که شامل روش‌های تجربی، روش‌های آزمایشگاهی و روش‌های عددی می‌باشد. در دیدگاه آزمایشگاهی مدل شناور در حوضچه کشش آزمایش و با روش‌های تمهیم نتایج مقاومت کشتی تخمین زده می‌شود. ایده این روش اولین بار در قرن ۱۵ میلادی توسط داوینچی ارائه گردید. بعدها در سال ۱۸۶۸ میلادی توسط ویلیام فرود با فرض تقسیم مقاومت کل به مقاومت اصطکاکی و باقیمانده به عنوان روشی کاربردی شناخته شد (Larsson et.al, 2010). کمبود امکانات آزمایشگاهی و محاسباتی در اوایل قرن ۲۰ میلادی موجب ارائه ایده ساخت و آزمایش مدل کشتی به صورت سری‌های سیستماتیک و آماری گردید. نتایج آزمایش این مدل‌ها به صورت روابط، نمودار و جداول مختلف ارائه شده است و می‌توان با مشخص بودن ابعاد و ضرایب بی‌بعد شناور مقاومت آن را به دست آورد. این روابط برای شناورهای با هندسه خاص بدست آمده و برای فرم بدنه‌های امروزی خطای زیادی در نتایج آنها وجود دارد، همچنین امکان مطالعه جریان اطراف کشتی در این روش وجود ندارد.

امروزه استفاده از روش‌های عددی در پیش‌بینی مقاومت یک شناور دریایی امری متداول است (Bertram, 2012). در این روش با حل معادلات حاکم بر جریان اطراف شناور آزمایش کشش شبیه سازی و مقاومت شناور محاسبه می‌شود. اولین روش هیدرودینامیکی عددی برای تخمین مقاومت یک قرن پیش توسط میشل ارائه گردید که بر مبنای حل جریان غیرویسکوز بود (Tuck, 1989). با توسعه امکانات سخت‌افزاری و روش‌های عددی حل معادلات کاربرد این دیدگاه در هیدرودینامیک کشتی به سرعت افزایش پیدا کرد.

روش‌های عددی متعددی مانند حجم محدود، تفاضل محدود و المان محدود برای شبیه‌سازی آزمایش کشش ارائه شده است (Raven, 2008, Larsson, 2010, Wang, 2012). در تمام این روش‌ها شبیه‌سازی آزمایش کشش به صورت عددی یک مساله دوفازی می‌باشد که باید با روش‌های عددی غیردائمی ضمنی و یا صریح حل شود و زمان مورد نیاز برای حل معادلات متوسط زمانی نوابراستوکس با روش حجم محدود با یک شبکه بندی قابل قبول برای یک سیستم سخت‌افزاری در دسترس به طور متوسط بیش از ۱۲ ساعت است (Molland, 2011). این زمان برای طراحی بهینه بدنه زمان زیادی محسوب می‌شود. چرا که در این طراحی‌ها نیاز به تولید صدها بدنه با مشخصات هندسی مختلف است. کاهش زمان شبیه‌سازی یکی از دغدغه‌های طراحی هیدرودینامیکی شناورهای مدرن می‌باشد. روش‌های ترکیبی متعددی در دهه اخیر برای کاهش زمان محاسبات ارائه گردیده است. در برخی از این مطالعات مقاومت

ویسکوز با روابط تجربی و مقاومت موجساز با روش‌های المان مرزی محاسبه شده است. در برخی دیگر مقاومت ویسکوز با استفاده از حل معادلات نوابراستوکس و مقاومت موجساز با حل جریان غیرویسکوز به دست آمده است (Rotte, 2008, Raven, 2017, Kim et.al, 2006).

هدف اصلی از ارائه روش‌های ترکیبی محاسبه توان و مقاومت شناور افزایش قابلیت بهینه سازی روش‌های عددی می‌باشد. کاربرد شناورهای دو بدنه با سطح آبخورد کم روز به روز در حال افزایش بوده و دغدغه اصلی طراحی بهینه سازی فرم بدنه آنها می‌باشد (Brizzolara, 2011, 2012). ایده روش ترکیبی اولین بار توسط Raven و Strake در سال (2002) پیشنهاد گردید. آنها حل روش RANS شبکه جریان ویسکوز را با سطح آزاد از پیش محاسبه شده توسط شرط لغزش آزاد (تنش برشی و سرعت عمودی صفر) تطبیق دادند. در سال ۲۰۰۶ کاربرد دیگری از این روش توسط Bathfield و Regnstrom منتشر گردید. آنها اثر موج بر جریان ویسکوز را مطالعه کردند اما اثر جریان ویسکوز بر امواج در نظر گرفته نشد.

در این مطالعه با استفاده از یک روش ترکیبی بر مبنای تقسیم‌بندی مقاومت بدنه شناور سواث به دو بخش ویسکوز و موج‌سازی مقاومت کل شناور محاسبه شده است. برای محاسبه مقاومت ویسکوز از ایده دوبدنه (Double-Body) استفاده شده است که در آن مقاومت ویسکوز بخش زیر آب با قرینه کردن بخش مغرق بدنه در حالت آب عمیق با شبیه‌سازی آزمایش کشش در محیط دینامیک سیالات محاسباتی به دست می‌آید. برای تعیین مقاومت موجساز از روش انتگرال میشل استفاده شده است. هدف اصلی این تحقیق بررسی دقت و سرعت عمل روش ترکیبی با روش متداول شبیه‌سازی آزمایش کشش به صورت دوفازی است. برای این منظور شبیه‌سازی‌ها برای حالت دوفازی نیز انجام گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که زمان محاسبه مقاومت کل با استفاده از روش ترکیبی به شدت کاهش یافته و به طور متوسط در ۱۳ دقیقه شبیه‌سازی می‌توان به نتیجه رسید.

۲. مواد و روش‌ها

ایده اصلی این روش بر این مبنای است که مقاومت کل شناور تابعی از نیروهای ویسکوز (Re) و نیروهای گرانشی (Fn) می‌باشد (رابطه ۱). بخش وابسته به عدد رینولدز مقاومت ویسکوز نامیده می‌شود که شامل مقاومت صفحه تخت معادل و مقاومت ویسکوز فشاری می‌باشد. مقاومت ویسکوز وابستگی بسیار کمی به عدد فرود دارد (این وابستگی ناچیز ناشی از تغییر سطح خیس بدنه کشتی در آب آرام نسبت به ارتفاع موج اطراف کشتی و لایه مرزی ناشی از سطح آزاد است). مقاومت موج‌سازی تابعی از عدد فرود بوده و وابستگی بسیار کمی به لزجت دارد (این وابستگی ناشی از تغییر توزیع فشار در پاشنه کشتی بدلیل لایه مرزی است)، به عبارت دیگر شکل موج اطراف کشتی و ارتفاع آن در دو سیال واقعی و ایده‌آل تقریباً یکسان می‌باشد (رابطه ۲). در نتیجه با توجه به وابستگی ناچیز مقاومت موج‌سازی به عدد رینولدز و مقاومت ویسکوز به عدد فرود، می‌توان

این مولفه‌ها را به صورت جداگانه به ترتیب در جریان ایده‌آل و واقعی محاسبه کرد. برای این منظور روش ترکیبی ارائه گردیده است که در این روش مقاومت ویسکوز شناور با فرض عدم وابستگی به سطح آزاد و با شبیه‌سازی آزمایش کشش دودبند در حالت آب عمیق و به صورت تکفازی و با روش حل عددی دائمی در محیط دینامیک سیالات محاسباتی به دست آمده است. بخش مقاومت موج‌سازی با روش انتگرال میشل و با فرض بدنه لاغر و عدم وابستگی مقاومت موج‌سازی به لزجت سیال به دست آمده است. لازم به ذکر است که صحت درستی فرض عدم وابستگی مقاومت ویسکوز به عدد فرود و عدم وابستگی مقاومت موج‌سازی به عدد رینولدز اثبات شده است (Larsson et al., 2010). مقاومت ویسکوز دو بدنه با حل معادلات واقعی جریان سیال در نرم افزار استارسی سی ام (Star-CCM+) و مقاومت موج‌سازی با حل معادلات جریان پتانسیل برای یک شناور دو بدنه سواث به دست آمده است (شکل ۱). روش ترکیبی زمان محاسبات را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. در این مطالعه برای مقایسه دقت نتایج و زمان محاسبات، شبیه‌سازی‌ها در حالت دوفازی نیز انجام شده است (رابطه ۳).

میشل در سال ۱۸۹۸ روش تحلیلی زیر را برای محاسبه مقاومت شناور ارائه کرد که فرض اساسی آن باریک بودن بدنه شناور و نسبت عرض به طول کوچک بود. که این انتگرال بصورت رابطه ذیل است (Tuck, 1989). که در آن $Y(x,z)$ نیم عرض صفحه آب‌خور در هر مقطع از طول شناور است. با توجه به تئوری کشتی باریک میشل، مقاومت موج‌سازی یک شناور تک بدنه به همراه تابعی از x و z ، $y = \pm Y(x,z)$ از ترکیب سه انتگرال پشت سرهم بدست می‌آید. متغیر x نشان دهنده موقعیت طولی بوده و زاویه θ نیز، بین $\frac{\pi}{2}$ و 0 بوده، معرف انتشار موج در هر لحظه است (رابطه ۴). که در آن: $k = \frac{g}{U^2}$ و انتگرال در جهت Z از انتهای ترین نقطه مقطع میانی تا خط آب‌خور می‌باشد. افست $Y(x,z)$ ، که در اصطلاح نیم عرض نامیده می‌شود، به عنوان داده ورودی استفاده می‌گردد. انتگرال‌های بعدی، در طول پاشنه تا سینه گرفته شد است (رابطه ۵). و نهایتاً از انتگرال (رابطه ۶) میزان نیروی مقاومت موج‌سازی R ، برای امواج در تمام جهات θ بدست می‌آید. که

در این روش کمیت‌های سیال به دو بخش آرام و مغشوش تقسیم‌بندی می‌شوند و بخش آرام از حل دقیق معادلات به دست می‌آید و برای بخش مغشوش از مدل‌های ریاضی جریان استفاده می‌شود. امروزه این روش پرکاربردترین روش در شبیه‌سازی جریان اطراف کشتی است. معادلات متوسط زمانی ناویراستوکس به صورت رابطه (۷) با روش حجم محدود حل می‌شوند (Ferziger, 1996). که U بردار سرعت سیال، ρ چگالی سیال، μ_{eff} لزجت مؤثر سیال که می‌توان آن را به صورت $\mu_{eff} = \mu + \rho \nu_{turb}$ بیان کرد (μ لزجت دینامیک و ν_{turb} لزجت سینماتیک اغتشاش)، p^* فشار، g بردار شتاب گرانش و R بردار موقعیت می‌باشد. مدل اغتشاشی جامعی برای تمام مسائل مکانیک سیالات وجود ندارد. مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ متداول‌ترین مدل اغتشاشی در حل مسائل هیدرودینامیک عددی است (Visonneau, 2005) در این مدل تنش رینولدز به صورت یک لزجت ادی اضافی که مشخصه جریان است در نظر گرفته می‌شود که به صورت رابطه ۸ است. انرژی جنبشی اغتشاشی و نرخ میرایی آن از حل معادلات انتقال به دست آمده می‌آیند (Ferziger, 1996).

شناور شبیه‌سازی شده در این مطالعه شناور بدنه لاغر از نوع سواث دارای هندسه بالشتک‌های مغروق از نوع دایروی و هندسه پایه-های شناور از نوع تک استرات (Strut) است (شکل ۲). مشخصات ابعادی آن در جدول ۱ ارائه شده است. برای شبیه‌سازی شناور روش ترکیبی مورد استفاده قرار گرفته است و در بخش دینامیک سیالات محاسباتی از روش دو بدنه جهت شبیه‌سازی مدل استفاده می‌شود. برای این منظور بدنه زیر آب شناور جدا و به قرینه آن متصل شده است. سپس فرآیند تست کشش روی آن انجام می‌گیرد (شکل ۳).

$$R_T = f(Re, Fn) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$R_T = R_V(Re) + R_W(Fn) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$R_w = \frac{4g^2}{\pi u^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sec^3 \theta \left[\iint \frac{\partial Y}{\partial x} \exp\left[\left(\frac{g}{u^2}\right) \sec^2 \theta (z - ix \cos)\right] dx dz \right]^2 d\theta \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$F(x, \theta) = \int Y(x, z) \exp(kz \sec^2 \theta) dz \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$P(\theta) = \int F(x, \theta) \cos(kx \sec \theta) dx \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$R = c \int_0^{\frac{\pi}{2}} (P^2 + Q^2) \sec^5 \theta d\theta$$

$$R = c \int_0^{\frac{\pi}{2}} (P^2 + Q^2) \sec^5 \theta d\theta \quad \text{رابطه (۶)}$$

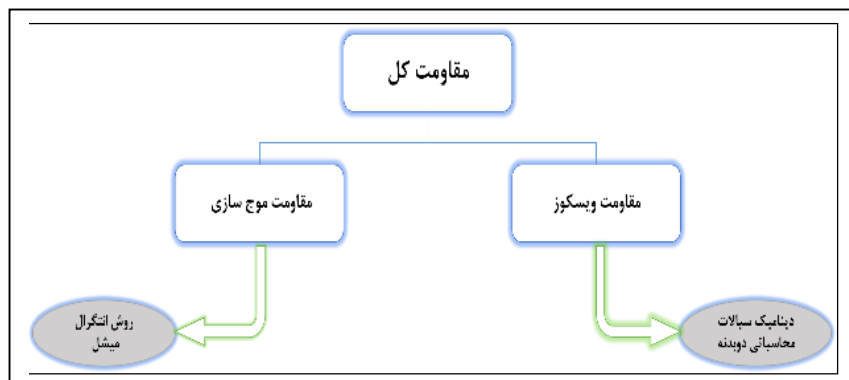
$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad \frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p^* - \mathbf{g} \cdot \mathbf{R} \nabla \rho + \nabla \mathbf{U} \cdot \nabla \mu_{eff} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{رابطه (۸)}$$

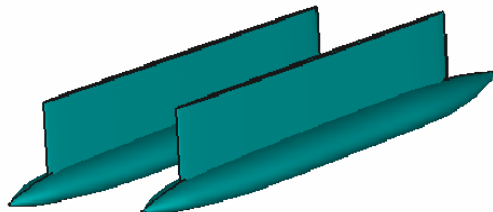
K: انرژی جنبشی اغتشاشی بر واحد جرم
 ε: نرخ میرایی انرژی جنبشی بر واحد جرم
 C_μ: یک ثابت بدون بعد با مقدار متداول ۰٫۰۹

$$R_{vp} = kR_f \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$R_v = R_f + R_{vp} = R_f + kR_f = (1+k)R_f$$



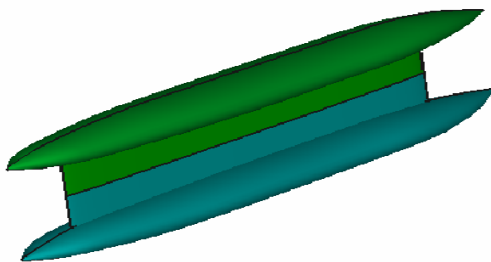
شکل ۱. تقسیم بندی روش ترکیبی



شکل ۲. نمایی از فرم بدنه مورد مطالعه

جدول ۱. مشخصات ابعادی مدل

L (m)	۶/۵۴۱
B (m)	۰/۶۲۴
D (m)	۱
T (m)	۰/۵۹۲



شکل ۳. حالت دوبدنه فرم بدنه مورد مطالعه (دینامیک سیالات محاسباتی)

۳. نتایج

برای شبیه‌سازی عددی آزمایش کشش معادلات متوسط زمانی ناویر-استوکس با استفاده از روش حجم محدود حل شده است. در حالت دوبدنه مساله با روش عددی پایا (Steady) و در حالت دوفازی از روش ناپایای ضمنی (Implicit Unsteady) استفاده شده است. در حالت دوفازی برای مدل‌سازی سطح آزاد روش حجم سیال (Volume of Fluid) به کار رفته است. ابعاد محدوده محاسباتی به گونه‌ای انتخاب شده است که مرزهای آن تأثیرات نامطلوبی مانند اثر دیواره (Fluid Blockage effect)، جریان برگشتی (Reverse flow) و اثر آب کم عمق (Shallow water effect) بر نتایج نداشته باشد. فاصله دیوارهای جانبی از مرکز ۱٫۵ برابر طول مدل، فاصله کف محدوده ۲ برابر طول، فاصله ورودی ۱٫۵ برابر طول و فاصله خروجی ۲٫۵ برابر طول در نظر گرفته شده است. محدوده محاسباتی با روش خودکار بی سازمان تریمر (Trimmer) به المان‌های شش وجهی (Hexahedral) تقسیم شده است. برای افزایش دقت در محدوده لایه مرزی تکنیک لایه‌بندی منشوری (Prism layer) به کار رفته است. در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب نمای شبکه‌بندی محدوده محاسباتی اطراف بدنه در حالت دوبدنه و دوفازی مشاهده می‌شود. در دو حالت برای افزایش دقت نتایج شبکه‌بندی در نواحی‌ای که گرادیان سرعت و فشار بیشتر می‌شود (مانند لایه مرزی اطراف بدنه و سطح آزاد) شبکه‌بندی ریزتر شده است.

ابتدا برای بررسی استقلال نتایج از شبکه در یک سرعت مشخص شبیه‌سازی برای ۴ شبکه انجام و مشاهده گردید ریزتر کردن شبکه-بندی اطراف بدنه تأثیری بر نتایج ندارد و تنها زمان محاسبات را به شدت افزایش می‌دهد. در جدول ۲ و ۳ به ترتیب نتایج نیروی مقاومت دو بدنه و نیروی مقاومت در حالت دوفازی برای شبکه‌های محاسباتی مختلف در عدد فرود ۰٫۴ ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که با ریزتر شدن شبکه محاسباتی تغییرات نتایج کاهش پیدا می‌کند. در حالت دو بدنه خطای بین دو شبکه بندی متوالی از درشت به ریز از ۵ درصد به ۰٫۶ درصد و در حالت دو بدنه از ۲٫۵ درصد به ۱٫۶ درصد کاهش پیدا می‌کند که نشان دهنده همگرایی و استقلال نتایج از شبکه‌بندی است. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی آزمایش مدل در محیط دینامیک سیالات محاسباتی در حالات تک‌فازی و دوفازی و نتایج روش انتگرال میشل ارائه گردیده است. این نتایج مربوط به شبیه‌سازی آزمایش کشش برای شناور سواث در سرعت‌های مختلف حرکت شناور می‌باشد. در روش ترکیبی مقاومت موج‌سازی از روش انتگرال میشل و

مقاومت ویسکوز در محیط نرم‌افزار استار سی سی ام+ به صورت تک فاز انجام و در هر سرعت مقادیر نیروی مقاومت وارد به شناور پس از همگرایی قابل قبول محاسبه گردید و همچنین برای مقایسه، شبیه‌سازی در حالت دوفازی دینامیک سیالات محاسباتی نیز در سرعت‌های مختلف انجام شده است.

یکی از مهم‌ترین ملاک‌های سنجش همگرایی یک شبیه‌سازی عددی دینامیک سیالات محاسباتی همگرایی در کمیت‌های باقیمانده معادلات ناویر-استوکس، پیوستگی، آشفتگی و سطح آزاد می‌باشد. در واقع همگرایی مقادیر این کمیت‌ها به سمت صفر نشان دهنده ارضای معادلات بقا و آشفتگی است. در شکل (۶) نمونه‌ای از نمودار باقیمانده شبیه‌سازی ارائه شده است که مشاهده می‌شود در حالت نهایی نتایج همگرا می‌شوند.

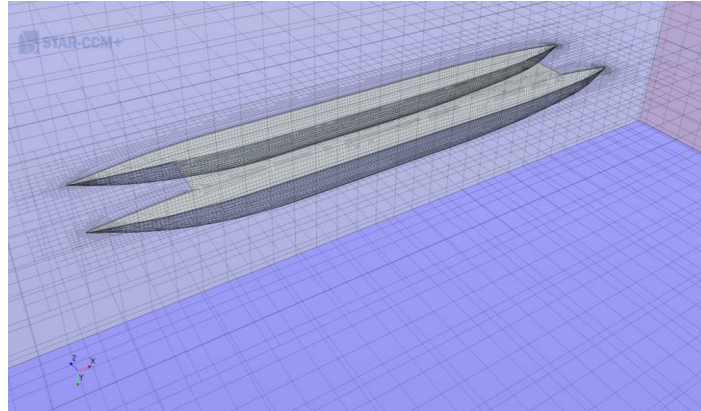
دقت مدل‌سازی جریان لایه مرزی اطراف بدنه تأثیر بسیار زیادی در تخمین مقاومت اصطکاکی جسم دارد. توابع لگاریتمی دیواره دقیق-ترین مدل موجود برای مدل‌سازی پروفیل سرعت درون لایه مرزی جریان آشفتگی می‌باشد. برای برقراری معادلات لایه مرزی لگاریتمی و در واقع قوانین چهارگانه دیواره لایه مرزی می‌بایست مقدار کمیت y^+ روی بدنه بیشتر از ۳۰ باشد.

در شکل ۷ مشاهده می‌گردد که توزیع این کمیت روی بدنه در شبیه‌سازی در محدوده مورد نظر قرار دارد. در هر سرعت با توجه به تغییر سرعت شناور ضخامت لایه مرزی و پروفیل سرعت درون آن تغییر می‌کند. مقاومت به دست آمده از حالت تک‌فازی و به صورت دو بدنه مولفه ویسکوز (R_v) مقاومت کل بدنه را شامل می‌شود. مقاومت ویسکوز خود از دو بخش اصطکاکی (R_f) و ویسکوز فشاری (R_{vp}) تشکیل می‌شود. که بخش اول از انتگرال‌گیری تنش برشی روی سطح جسم در راستای حرکت جسم به دست می‌آید و مقاومت ویسکوز فشاری ناشی از تغییر فشار در اطراف بدنه به دلیل لایه مرزی است و با انتگرال‌گیری از تنش فشاری روی سطح جسم در راستای حرکت جسم به دست می‌آید.

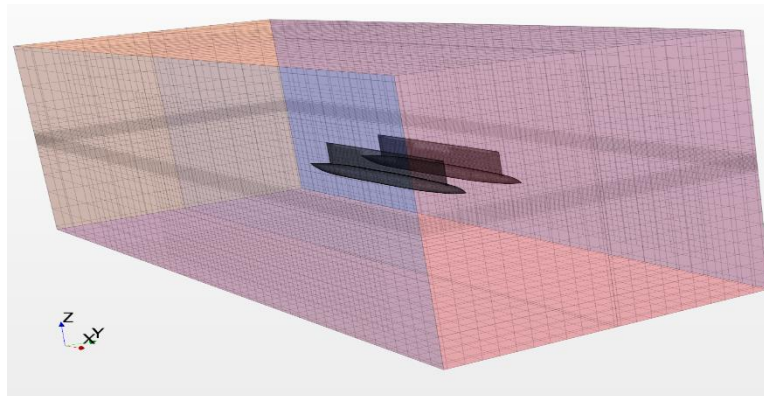
در شکل ۸ مودار مقاومت اصطکاکی، ویسکوز فشاری و ویسکوز بر حسب عدد فرود برای شناور سواث در حالت دو بدنه ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که مقدار مقاومت ویسکوز فشاری در تمامی سرعت‌ها سهم کوچکی از مقاومت کل را شامل می‌شود و این به دلیل هندسه لاغر و استوانه‌ای بدنه است که در راستای حرکت جریان گرادیان فشار قابل ملاحظه‌ای ایجاد نمی‌کند. مقاومت ویسکوز فشاری و اصطکاکی

پیدا می‌کند و دلیل آن افزایش تغییرات فشار در پاشنه بدنه است. مقدار متوسط فاکتور بدنه برای شناور سواث ۱,۰۸ است که نشان می‌دهد مقاومت ویسکوز فشاری ۸ درصد مقاومت اصطکاکی شناور است. مقاومت موجسازی با استفاده از حل عددی انتگرال میشل به دست آمده است.

از طریق فاکتور بدنه به صورت (۱۲) با هم ارتباط دارند (رابطه ۹) که $(1+k)$ فاکتور بدنه است و به هندسه شناور بستگی دارد و وابستگی ناچیزی به سرعت دارد. در شکل ۹ فاکتور بدنه در عدد فرودهای مختلف به دست آمده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت مقدار آن افزایش ناچیزی



شکل ۴. شبکه‌بندی محدوده محاسباتی در حالت دو بدنه



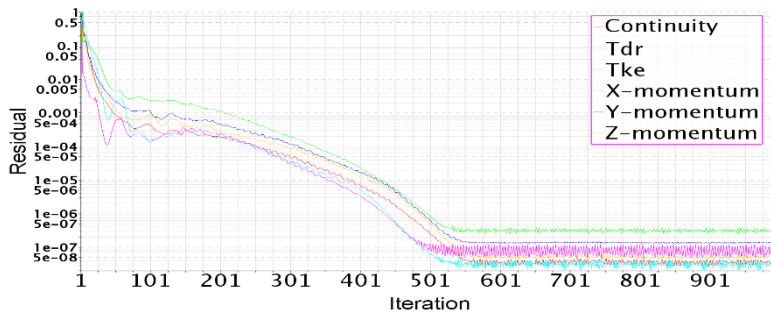
شکل ۵. شبکه‌بندی محدوده محاسباتی در حالت دو فازی

جدول ۲. نتایج مطالعه شبکه در حالت دو بدنه

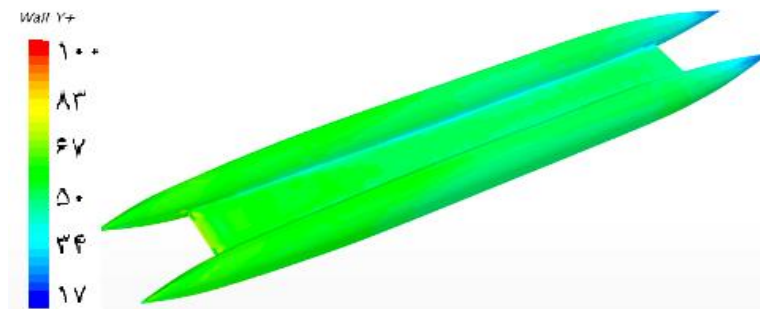
تعداد شبکه محاسباتی	نیروی مقاومت (N)	درصد خطا (%)
۱۸۰۳۵۸	۵۴۲	
۳۵۵۶۰۳	۵۷۱	۵
۴۶۰۲۵۴	۵۸۹	۳
۶۸۰۱۲۴	۵۹۳	۰/۶

جدول ۳. نتایج مطالعه شبکه در حالت دو فازی

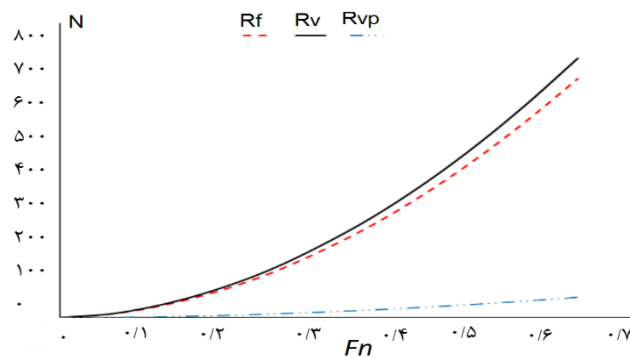
تعداد شبکه محاسباتی	نیروی مقاومت (N)	درصد خطا (%)
۴۳۵۰۳۲	۸۸۴	
۵۴۷۸۶۸	۹۰۶	۲/۵
۸۴۵۹۲۱	۹۳۰	۲/۵
۱۲۶۵۴۰۳	۹۴۵	۱/۶



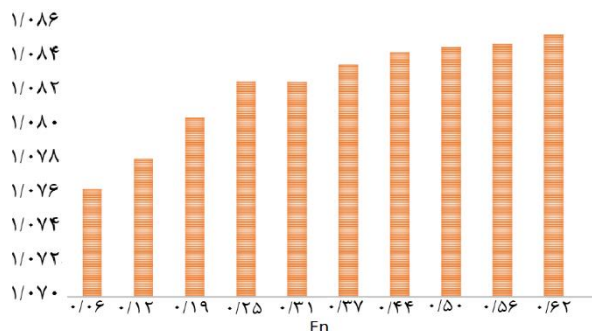
شکل ۶. نمودار باقی مانده مدل در سرعت ۵ متر بر ثانیه (حالت تک فاز)



شکل ۷. نمایش توزیع y^+ بر روی بدنه مدل در سرعت ۵ متر بر ثانیه (حالت تک فاز)



شکل ۸. نمودار ویسکوز، ویسکوز فشاری، اصطکاکی بر حسب عدد فرود



شکل ۹. نمودار مقاومت موج سازی بر حسب عدد فرود (خروجی نتایج میشل)

در هر شبیه‌سازی مقادیر نیروی مقاومت وارد به شناور در حالت دوفاز، در طی تکرارهای حل مسئله پس از همگرایی قابل قبول محاسبه که به صورت جدول ۴ در عدد فرودهای مختلف ارائه شده است. در شکل ۱۸ و جدول ۵ نمودار نیروی مقاومت شناور سواث به دست آمده از دو روش ترکیبی و دوفازی مقایسه گردیده است. مشاهده می‌شود جز در نواحی مربوط به تداخل غیرهم‌فاز نتایج به دست آمده از دو روش تطابق قابل قبولی دارند و در حالت هم‌فاز این اختلاف بیشتر می‌شود. این اختلاف به طور متوسط ۷ درصد است. در شکل ۱۹ زمان محاسباتی دو روش ترکیبی و دوفازی در سرعت‌های مختلف شبیه‌سازی مقایسه شده است. شبیه‌سازی‌ها در دو روش با استفاده از یک سیستم کامپیوتری چهار هسته‌ای با مشخصات ذیل انجام شده است: CPU: intel(R) core(TM) RAM: 8 GB و i7-3632QM @ 2.20 GHz. نتایج نشان می‌دهد که زمان محاسبات در روش ترکیبی به طور متوسط ۹۷ درصد کاهش پیدا کرده است.

۴. نتیجه‌گیری

روشی ترکیبی برای تخمین مقاومت یک شناور با بدنه لاغر ارائه گردید. در این روش مقاومت موج‌سازی با حل عددی انتگرال میشل و مقاومت ویسکوز با روش دوبنده در آب عمیق و با کمک دینامیک سیالات محاسباتی محاسبه گردید. مقاومت محاسبه شده با روش ترکیبی اختلاف ناچیزی با نتایج معتبرشده دوفازی دارد و به طور متوسط در سرعت‌های مختلف ۷ درصد اختلاف را نشان می‌دهد. این اختلاف در عدد فرودهایی که مقاومت موج‌سازی در آنها افزایش ناگهانی پیدا می‌کند (هامپ) بیشتر است چرا که مقاومت موج‌سازی در روش ترکیبی با روش انتگرال میشل که مبتنی بر تئوری پتانسیل می‌باشد بدست آمده و نتیجه این روش به دلیل صرف نظر کردن از اصطکاک همواره بیشتر از حالت واقعی است. زمان تخمین مقاومت شناور در یک سرعت با کمک روش ترکیبی بسیار کمتر از روش دوفازی می‌باشد و نتایج به طور متوسط ۹۷ درصد کاهش زمان محاسبات را نشان می‌دهد. روش ترکیبی با توجه به دقت کافی و هزینه محاسباتی کم ایده مناسبی برای پیش‌بینی مقاومت شناور در

در شکل ۱۰ مقاومت موج‌سازی بر حسب عدد فرود رسم شده است. نتایج حاصل نشان دهنده این است که این منحنی کاملاً نوسانی است و از فرورفتگی و برآمدگی متعددی تشکیل شده است این امر به دلیل تداخل هم‌فاز و غیرهم‌فاز امواج است. شناور مورد مطالعه در عدد فرود ۰.۵۵ بیشترین مقاومت موج و در عدد فرود ۰.۳۴ کم‌ترین مقاومت موج را دارد. عدد فرود ۰.۵۵ تداخل نامطلوب اصلی (Main hump) و عدد فرود ۰.۳۴ تداخل مطلوب اصلی (Main hollow) است. بنابراین بهتر است که این شناور در عدد فرود ۰.۳۴ طراحی گردد. بنابراین می‌توان با انتخاب طول و سرعت مناسب، کشتی را به گونه‌ای طراحی کرد که مقاومت موج‌سازی کمتری داشته باشد.

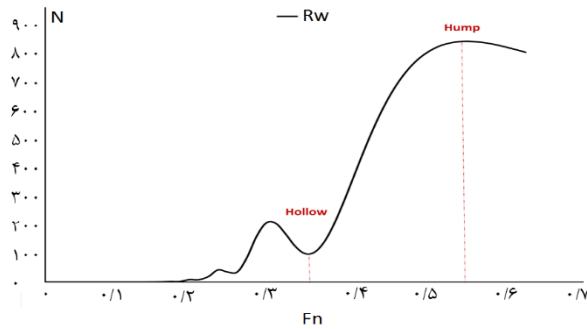
در شکل ۱۱ درصد مقاومت موج‌سازی و ویسکوز از مقاومت کل نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، با افزایش عدد فرود سهم مقاومت موج افزایش پیدا می‌کند. به گونه‌ای که در سرعت‌های پایین سهم مقاومت موج‌سازی بسیار ناچیز است. دلیل این امر این است که مقاومت موج‌سازی با توان ششم سرعت متناسب است ولی مقاومت ویسکوز با توان دوم سرعت تناسب دارد. اکسترم‌های نسبی در نمودار به دلیل تداخل‌های مطلوب و نامطلوب امواج سینه و پاشنه است. در شکل ۱۲ نمودار مقاومت کل، مقاومت ویسکوز و موج‌سازی به دست آمده از روش ترکیبی رسم شده است.

به منظور صحت‌سنجی نتایج روش ترکیبی و همچنین تخمین کاهش زمان محاسبات، شبیه‌سازی آزمایش کشش در حالت دوفازی در سرعت‌های مختلف انجام و نتایج آن ارائه شده است. در حالت دوفازی علاوه بر معادلات بقا جرم و مومنتوم معادلات سطح آزاد نیز باید ارضا شود. در نرم‌افزار روش متداول حجم سیال مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۱۳ توزیع کمیت γ^+ روی بدنه شناور در حالت دوفازی در بخش زیر آب ارائه شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر این کمیت در محدوده قابل قبول بین ۳۰ تا ۱۰۰ است.

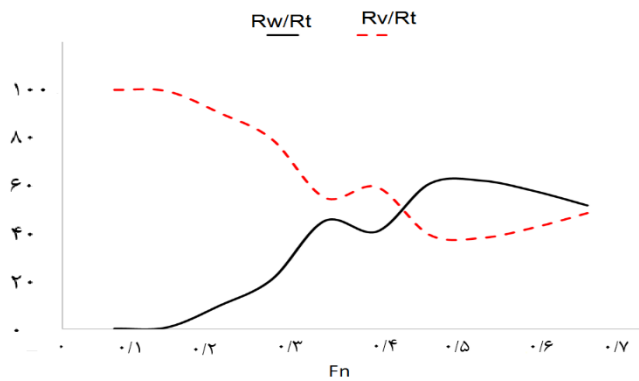
در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ الگوی موج تشکیل شده در اطراف بدنه مشاهده می‌گردد. با افزایش سرعت شناور طبق رابطه $\lambda = 2\pi V^2/g$ طول موج تشکیل شده افزایش می‌یابد.

بالای محاسبات در روش ترکیبی قابلیت استفاده از این روش در طراحی فرم بدنه‌های بهینه را افزایش می‌دهد.

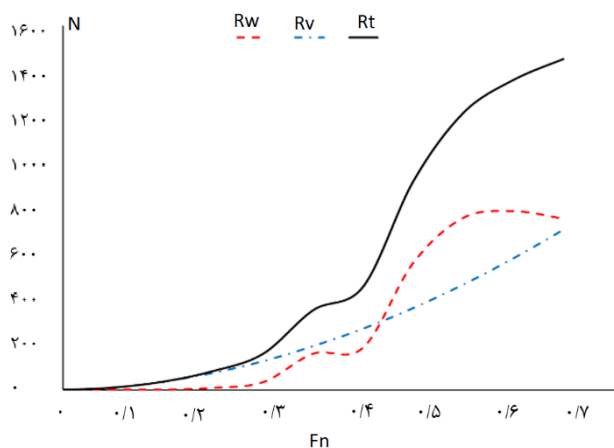
مراحل اولیه طراحی می‌باشد. با استفاده از روش ترکیبی برای انواع مختلف شناور می‌تواند دقت این روش را مورد ارزیابی قرار داد. سرعت



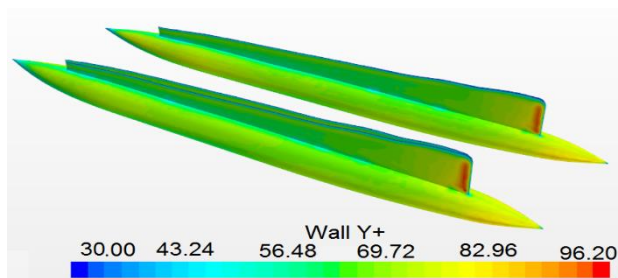
شکل ۱۰. نمودار مقاومت موج سازی بر حسب عدد فرود



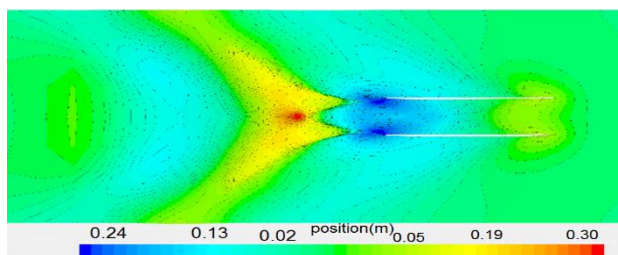
شکل ۱۱. نمودار درصد سهم مقاومت ویسکوز و موج از مقاومت کل در عدد فرود مختلف



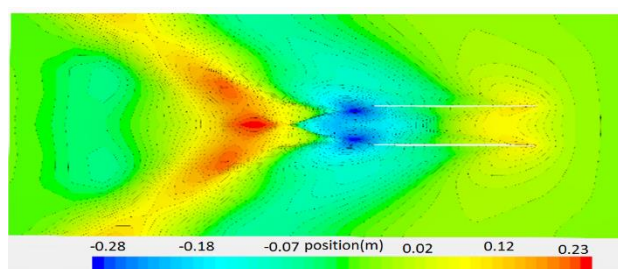
شکل ۱۲. نمودار مقاومت کل، ویسکوز، موج سازی



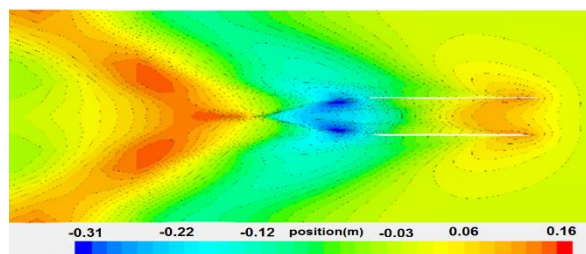
شکل ۱۳. نمایش توزیع Y^+ بر روی بدنه مدل در سرعت ۵ متر بر ثانیه (حالت دو فاز)



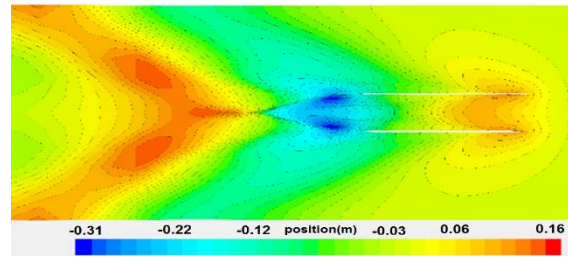
شکل ۱۴. نمایش الگوی موج مدل در سرعت ۳/۵ متر بر ثانیه (حالت دو فاز)



شکل ۱۵. نمایش الگوی موج مدل در سرعت ۴ متر بر ثانیه (حالت دو فاز)



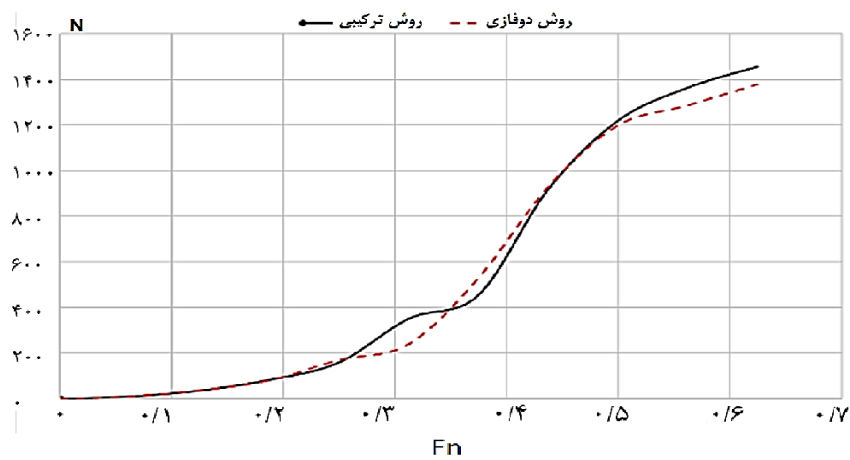
شکل ۱۶. نمایش الگوی موج مدل در سرعت ۴/۵ متر بر ثانیه (حالت دو فاز)



شکل ۱۷. نمایش الگوی موج مدل در سرعت ۵ متر برثانیه (حالت دو فاز)

جدول ۴ مقاومت بدنه با روش دوفازی

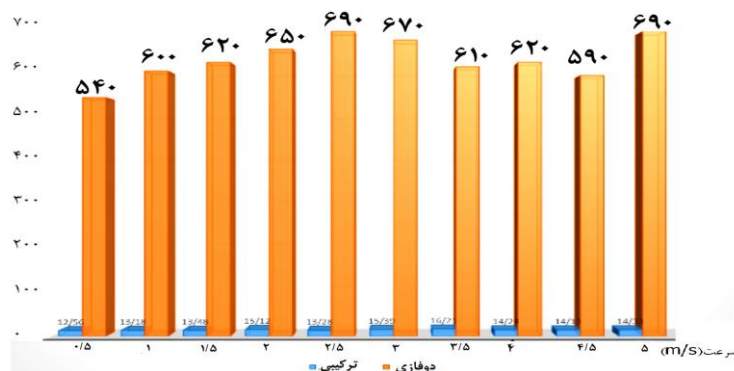
عدد فرود	مقاومت کل (N) (روش دوفاز)
۰/۰۶	۱۰
۰/۱۲	۳۷
۰/۱۹	۸۱
۰/۲۵	۱۷۰
۰/۳۱	۲۴۰
۰/۳۷	۵۳۰
۰/۴۴	۹۳۰
۰/۵۰	۱۲۰۰
۰/۵۶	۱۲۸۸
۰/۶۲	۱۳۸۰



شکل ۱۸. نمودار مقاومت کل، دوفاز و ترکیبی

جدول ۵. مقایسه نتایج روش ترکیبی و دوفازی

درصد اختلاف ترکیبی و دوفاز	مقاومت کل دوفاز	مقاومت کل ترکیبی	عدد فرود	سرعت
۰/۵	۰/۰۶	۱۰/۱	۱۰	۱/۳
۱	۰/۱۲	۳۶/۱	۳۷	۲/۵
۱/۵	۰/۱۹	۸۲/۹	۸۱	۲/۳
۲	۰/۲۵	۱۵۹/۲	۱۷۰	۶/۴
۲/۵	۰/۳۱	۳۵۱	۲۴۰	۳۱/۶
۳	۰/۳۷	۴۵۴/۹	۵۳۰	۱۴/۲
۳/۵	۰/۴۴	۹۱۸/۳	۹۳۰	۱/۳
۴	۰/۵۰	۱۲۱۹/۲	۱۲۰۰	۱/۶
۴/۵	۰/۵۶	۱۳۶۴/۱	۱۲۸۸	۵/۶
۵	۰/۶۲	۱۴۵۶/۱	۱۳۸۰	۵/۲



شکل ۱۹. مدت زمان شبیه سازی در سرعت‌های مختلف در حالت تک‌فاز و دوفاز

References:

- Bertram, V. 2012. *Practical Ship Hydrodynamics*. Butterworth-Heinemann.
- Brizzolara, S, Curtin, T, Bovio, M, Vernengo, G. 2012. Concept design and hydrodynamic optimization of an innovative SWATH USV by CFD methods. *Ocean Dynamics*. 62: 227–237.
- Brizzolara, S, Vernengo, G. 2011. Automatic Optimization Computational Method for Unconventional SWATH Ships Resistance. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*. 5(5): 882-889.
- Ferziger, J. H. and Peric, M. 1996. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlin etc., Springer-Verlag.
- Kim, J., Kwang-Soo, K., Gun-Do, K., Il-Ryong, P. and Suak-Ho, V. 2006. Hybrid RANS and Potential Based Numerical Simulation for Self-Propulsion Performances of the Practical Container Ship. *Journal of Ship and Ocean Technology*. 10(4): 1-11.
- Larsson, L., Raven, H. C. and Paulling, J. R. 2010. *Ship resistance and flow*. Jersey City, N.J. Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Larsson, L., Stern, K. and Visonneau, M. 2011. CFD in Ship Hydrodynamics—Results of the Gothenburg 2010 Workshop. IV International Conference on Computational Methods in Marine Engineering.
- Molland, A. F., Turnock, S. R. and Hudson, D. A. 2011. *Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power*. Cambridge, GB, Cambridge University Press.
- Raven, H. C. and Starke, A. R. 2002. Efficient methods to compute ship viscous flow with a free surface. In *24th Symposium on Naval Hydrodynamics*. Fukuoka, Japan.
- Raven, A, Ploeg, A., Strake, A. R. 2008. Towards a CFD-Based prediction of ship performance progress in predicting full-scale resistance and scale effects. *RINA MARINE CFD conference*.

- Raven H. C. 2017. Numerical and Hybrid Prediction Methods for Ship Resistance and Propulsion. Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering.
- Regnström, B. and Bathfi eld, N. 2006. Drag and wake prediction for ships with appendages using an overlapping grid method. 26th Symposium on Naval Hydrodynamics (pp. 243–258). Rome, Italy.
- Rotte, G. M. 2015. Analysis of a Hybrid RaNS-BEM Method for Predicting Ship Power. MSc Thesis Delft University.
- STAR CCM+ Programm Help. 2013.
- Tuck, E, O, 1989. The wave resistance formula of J.H. Michell and Its significance to recent research in ship hydrodynamics. J. Austral. Math. Soc. Ser. B. 30(1989): 365-377.
- Visonneau, M. 2005. A Step Towards the Numerical Simulation of Viscous Flows Around Ships at Full Scale Recent Achievements Within the European Union Project Effort. Marine CFD, Southampton, UK.
- Wang, T., Sun, W. and Yao, X. M. 2012. Numerical Simulation of Flow Field around Amphibious Vehicle Based on CFD. *Applied Mechanics and Materials*. 138-139: 99-103.



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



A Hybrid Method for the Hydrodynamic Analysis of SWATH Vessel

Aghil Daraie, Ahmad Hajivand *

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

* Corresponding Author E-mail: hajivand@kmsu.ac.ir

Received: 15 October 2018

Revised: 12 May 2019

Accepted: 20 May 2019

DOI: 10.22113/JMST.2019.152341.2213

Abstract

The prediction of ship resistance is the most important part of the ship's hydrodynamic design. Nowadays, computational methods are used as a common tool for this purpose. Ship total resistance calculation by using two phase numerical method based on the Reynolds-averaged Naiver–Stokes solution requires high computational power. The idea of total resistance decomposition based on the physical cause is a basic principle in the ship hydrodynamic. In the proposed hybrid method, wave making resistance part is calculated by using Michell Integral and viscous part is computed by numerical solution of one phase viscous flow for double body condition. Computations are performed for 10 velocities from $F_n = 0.06-0.62$ and at each velocity the percentage of every component calculated. Hybrid method reduce computational time. To investigate the results, tow phase simulations are performed for a SWATH vessel. On average, there are 7% difference between the results obtained from hybrid and two phase method and computational time in hybrid method is 97% less than two phase method.

Key Words: Michell Integral method, Computational Fluid Dynamics, Double body hybrid method, Wave making resistance, Viscous resistance.

Copyrights:

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

