

تخمین نیروی پسا و مقاومت اصطکاکی یک کشتی با استفاده از مدل‌سازی عددی و نتایج ارزیابی آزمایشگاهی

هومن حکیمزاده^۱، مسعود ترابی آزاد^{۲*}، محمد علی بدری^۳، فرهود آذرینا^۴، مجتبی عظام^۵

h.hakimzadeh@srbiau.ac.ir

^۱ دانشجوی دکتری فیزیک دریا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

m_azad@iau-tnb.ac.ir

^{۲*} نویسنده مسئول، دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران

malbdr@cc.iut.ac.ir

^۳ استادیار، پژوهشکده علوم و فناوری زیر دریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

farhoodazi@gmail.com

^۴ استادیار، گروه صنایع دریایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

ezam@srbiau.ac.ir

^۵ استادیار، گروه فیزیک دریا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

تاریخ پذیرش: ۹۷/۷/۲۵

تاریخ دریافت: ۹۷/۳/۲۳

چکیده

به دلیل قیمت بسیار بالای سوخت کشتی و با هدف رعایت مقررات زیست محیطی دریا، شناسایی مقادیر نیروی پسای کشتی درون آب اولین و اساسی‌ترین قدم در کنترل مصرف بهینه سوخت محسوب می‌شود. از طریق روش عددی و با استفاده از نرم‌افزار سی اف ایکس، برای اولین بار نیروی پسا و مقاومت اصطکاکی مدل مقیاس شده بک کشتی نفت کش غول پیکر به طول ۲/۷۴ متر، عرض ۰/۵ متر و آب‌خور ۰/۱۷ متر محاسبه شده است. حل عددی نیروی پسای مدل برای ۵ سرعت مختلف از ۰/۶۵ تا ۰/۸۵ متر بر ثانیه انجام شده است. تفاوت این پژوهش با سایر تحقیقات، انتخاب سرعت‌ها و آب‌خورهای مدل بر اساس شرایط واقعی سرویس دهی کشتی است. به منظور اعتبارسنجی، نتایج آزمون‌های انجام شده بر روی مدل این کشتی در حوضچه کشتی با نتایج مدل عددی مقایسه شده است. بر اساس راستی آزمایی‌های انجام شده، در آب‌خورهای میانگین ۸ و ۱۶/۵ سانتی‌متر، اختلاف مقادیر نیروی پسای به دست آمده از مدل آزمایشگاهی و مدل عددی در اعداد فرود ۰/۱۳ تا ۰/۱۶، حداقل ۳/۵٪ و حداکثر ۱۵/۴٪ و نسبت مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل کشتی حداقل ۸۵٪ و حداکثر ۹۳٪ است. نتایج به دست آمده از این پژوهش جهت تخمین اثر عوامل فیزیکی محیط دریا بر مقاومت اصطکاکی، سرعت و مصرف سوخت کشتی در شرایط واقعی دریا مورد استفاده قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: نرم‌افزار سی اف ایکس، کشتی نفت کش، شبیه‌سازی آزمایشگاهی، نیروی پسای کشتی

۱. مقدمه

نیروی پسای کل کشتی عبارت است از نیروهای ویسکوز و موج ایجاد شده اطراف کشتی و نیروی ناشی از هوا که در خلاف جهت حرکت کشتی، با سرعتی ثابت و در یک خط مستقیم در آب راکد بر آن وارد می شود. مقاومت اصطکاکی بزرگ ترین مؤلفه از مقاومت کل یا همان نیروی پسای کشتی است. ترکیب شرایط محیطی دریا و کیفیت پوشش بدنه کشتی ها باعث تغییر مقادیر مقاومت اصطکاکی کشتی می شود. افزایش مقاومت اصطکاکی باعث کاهش سرعت کشتی در آب می شود. یکی از روش های جبران کاهش ناخواسته سرعت کشتی، افزایش نیروی موتور و در نتیجه افزایش مصرف سوخت کشتی است. استفاده از این روش علاوه بر تحمیل هزینه های ناشی از قیمت بسیار بالای سوخت کشتی، باعث افزایش آلاینده های زیست محیطی می گردد. بنابراین شناسایی و کاهش مقاومت اصطکاکی بدنه کشتی ها با استفاده از روش های علمی نقش بسیار مهمی در کاهش هزینه های ذکر شده خواهد داشت. مطابق دستورالعمل های ارائه شده در استاندارد نوپای ۱۹۰۳۰، که به صورت پیوسته در حال توسعه و روزآوری است، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای تخمین مقاومت کشتی در آب خورهای مختلف مورد توجه می باشد [۱]. روش های عددی که با استفاده از نرم افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی انجام می شود، جزئیات بیشتری از نتایج شبیه سازی ارائه می کند؛ اما در این روش ها به دلیل دقت کمتر نتایج و با هدف راستی آزمایی، می بایست نتایج مدل عددی با نتایج حاصل از روش شبیه سازی آزمایشگاهی مقایسه شود. هم اکنون یکی از مشکلات موجود برای شناسایی نیروی پسای بدنه کشتی ها، مقیاس سازی رسوبات کوچک مقیاس بدنه کشتی، متناسب با ابعاد واقعی آن است. در سال های اخیر روش شبیه سازی عددی مستقیم (دی ان اس) به عنوان روش قابل اعتماد از لحاظ علمی برای درک نحوه قرارگیری فیزیک جریان بر روی دیواره های بدنه کشتی بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. البته این روش فقط در مقیاس محدودی از عددهای رینولدز قابلیت اجرا دارد.

اکبری و همکاران با بررسی چند نمونه پوشش دریایی بدنه کشتی، نمونه مناسبی جهت بهره برداری در بدنه شناور

تشخیص دادند و نشان دادند که نوع پوشش بدنه بر مقاومت اصطکاکی تأثیر گذار است [۲]. میر عابدینی و همکاران اثر ۳ نمونه پوشش دریایی بدنه بر مقاومت اصطکاکی یک شناور را بررسی نمودند و یک نمونه از این پوشش ها به نام الاستومر سیلیکونی را به عنوان بهترین پوشش معرفی نمودند [۳]. این پوشش در سرعت های مختلف ۱۰ تا ۲۱ درصد موجب کاهش مقاومت اصطکاکی و جذب کمتر رسوبات دریایی می گردد. قاسمی و موسوی زادگان، روش های محاسبه مقاومت افزوده شناور در امواج را ارائه نمودند [۴]. نتایج تحقیقات آن ها نشان داده است که در طول موج های خیلی بزرگ تر و خیلی کوچک تر از طول کشتی مقدار مقاومت اضافی شناور به سمت صفر میل می کند. علی اکبری و همکاران مقاومت وارده بر یک یدک کش را در سرعت های مختلف با استفاده از مدل آزمایشگاهی بررسی و مقدار قدرت موتور انتخابی برای این یدک کش را پیشنهاد نمودند [۵]. احمدزاده طلا تپه و موسوی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی اثر خزه های دریایی سطح شناورها بر مقاومت کل را بررسی و نشان دادند که لایه نازک رسوبی بر روی بدنه شناورها حدود ۴/۵۸ درصد نیروی پسا را افزایش می دهد [۶]. هیمن با استفاده از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی نحوه مقاومت بدنه کشتی در برابر موج را مورد بررسی قرار داد و مدل بهینه بدنه کشتی را بهبود بخشید [۷]. هاگان و همکاران مقاومت مدل یک کشتی را محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند [۸]. سوجی موتو و همکاران روشی برای محاسبه مقاومت افزوده در امواج و روشی برای تخمین مصرف سوخت با استفاده از شاخص سوخت ارائه و نتایج را با داده های مدل آزمایشگاهی و کشتی مقایسه کردند. این مقایسه نشان داد که روش پیشنهادی آن ها برای محاسبه مقاومت افزوده در امواج قابلیت نسبتاً مناسب تری نسبت به سایر روش ها دارد [۹]. بنکز و همکاران به صورت عددی، مؤلفه های مقاومت یک کشتی کانیتینر بر را با دینامیک سیالات محاسبه و نتایج به دست آمده را با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه نمودند [۱۰]. کیم و همکاران با استفاده از روش شبکه بندی تفکیک شده، شبیه سازی را به وسیله دینامیک سیالات محاسباتی برای پیش بینی مقاومت افزوده در یک کشتی کانیتینر بر انجام دادند. نتایج مقایسه ای

آخرین یافته‌های تحقیقاتی آی.تی.تی.سی^۱ در سال ۲۰۱۷ شامل موارد زیر است:

۱. شناسایی رویکردهای جدید آزمایشگاهی جهت جمع‌آوری و پایش رشد و شکل‌گیری رسوب بدنه و ارزیابی اثر آن‌ها بر خصوصیات مقاومت اصطکاکی؛
۲. ارائه پیشنهادهایی در خصوص مقاومت و دستورالعمل‌های محاسبه مقاومت هنگام استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی؛
۳. تحقیق و بررسی اثرات زبری سطح مدل کشتی بر نتایج اندازه‌گیری مقاومت در حوضچه کشتی؛
۴. بازنگری روش‌های نوین شبیه‌سازی تلاطم در حوضچه کشتی.

هدف از این پژوهش محاسبه نیروی پسای یک کشتی نفت‌کش در آب ساکن است. در ادامه کارهای پژوهشی آتی با استفاده از مقادیر محاسبه‌شده، مقادیر واقعی افزایش مصرف سوخت و کاهش سرعت ناخواسته کشتی در اثر افزایش مقاومت اصطکاکی، ناشی از تغییرات زبری بدنه و پروانه و شرایط فیزیکی محیط دریا بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد ۱۹۰۳۰ در حین سرویس‌دهی محاسبه می‌شود. در ادامه این مطالعه، دو روش "نیروی پسای یک کشتی نفت‌کش" با مشخصات ارائه‌شده در جدول ۱ و شکل ۱ در حالت‌های پر و خالی مورد ارزیابی قرار گرفته است. جهت اعتبارسنجی نیز، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و مدل آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند مقدمه‌ای بر آغاز تحقیقات علمی پژوهشگران در خصوص شبیه‌سازی عددی اثر فیزیکی محیط دریا بر قدرت مانور، موتور، حرکات بدنه و برهمکنش اثر محموله و مخازن بار یک کشتی نفت‌کش در شرایط نامساعد دریا باشد.

۲. مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی این نفت‌کش با مقیاس ۱:۱۰۰ و مطابق با دستورالعمل‌های آی.تی.تی.سی ساخته شده است. مشخصات مدل در جدول (۱) و شکل (۱) ارائه شده است.

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار سی اف ایکس یک شبکه یکپارچه بی‌ساختار در کل میدان حل ایجاد شده است.

تحقیق آن‌ها با نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی، به‌استثنای فرکانس‌های تشدید شده، مشابه است [۱۱]. دمیرال و همکاران روش آزمایشگاهی نوین برای پیش‌بینی مقاومت افزوده در اثر رسوبات آهکی ارائه نمودند. اساس رویکرد آن‌ها بر آزمایش‌های گسترده‌ای بود که در حوضچه کشتی، اثر درصد پوشش و محل قرارگیری رسوبات را در اعداد رینولدز گوناگون بر روی یک صفحه صاف به‌صورت مصنوعی بررسی می‌کرد. لی و همکاران خصوصیات زبری یک لایه کشت شده در شرایط محیطی کنترل‌شده را ارزیابی و اثر آن را بر مقاومت اصطکاکی بررسی کردند. ساویو و همکاران با استفاده از اسکنر سه بعدی با وضوح بالا مشخصات زبری یک صفحه را اندازه‌گیری نمودند. مونت و همکاران نیروی پسای یک صفحه زبر با زبری ماسه‌ای معادل ۳۲۵ میکرون را در تونل باد اندازه‌گیری نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داده است که برای یک کشتی تندرو تا ۵۹٪ و برای یک نفت‌کش غول‌پیکر تا ۳۴٪ مقادیر پسای کل در سرعت‌های مختلف (در صورت عدم اثرگذاری مقاومت باقی‌مانده) افزایش خواهد یافت. توران و همکاران پسای یک صفحه صاف با پوشش ۵٪ تا ۲۰٪ رسوب سخت را در حوضچه کشتی مطالعه کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داده است که اصطکاکی یک کشتی گازبر از ۳۷٪ تا ۹۸٪ و نیروی پسای آن از ۲۳٪ تا ۶۰٪ هنگامی که پوش بدنه بین ۵٪ تا ۲۰٪ رسوب سخت گرفته باشد افزایش خواهد یافت. اسپرینگر و همکاران یک پایگاه داده‌ها که قادر بود عملیات کشتی در آب و هوای نامناسب را ارزیابی نماید برقرار ساختند. به‌عنوان بخشی از پروژه شوپرا، ۱۳۰۰ آزمون مدل بر روی بدنه ۳ کشتی در ۴ آزمایشگاه در اروپا انجام شد. مقاومت افزوده و نیروی انحراف از مسیر ارزیابی شده و توسط آن‌ها مشخص گردید، نسبت حرکت کشتی به دامنه موج برای مقاومت افزوده در طول موج‌های نسبتاً کوتاه افزایش می‌یابد. راون و همکاران برای تعیین اثر آب کم‌عمق بر مقاومت موجی، با استفاده از یک کد، شرایط مرزی سطح آزاد کاملاً غیرخطی را در نظر گرفتند. محاسبات برای ۶ نوع کشتی در چندین سرعت انجام شد. نتایج نشان داد که در اعداد فرود عمق کوچک‌تر از ۰/۶۵ به‌طور کلی، مقاومت موجی افزایش نخواهد یافت.

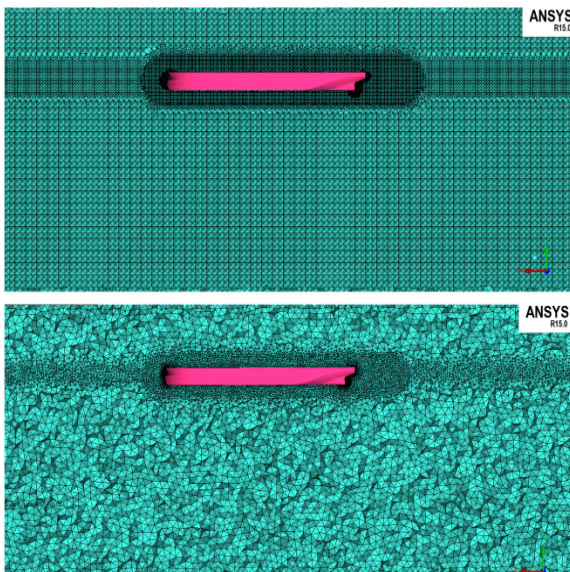
استفاده می‌کند. این مدل یکی از پرکاربردترین و مناسب‌ترین مدل‌های دو معادله‌ای است که علاوه بر دقت کافی، برای مدل‌سازی نیز پایداری مناسبی دارد و به دلیل هزینه محاسباتی کم، یکی از پرکاربردترین مدل‌های اغتشاشی محسوب می‌شود. در این مدل فرض بر این است که جریان به شدت اغتشاشی بوده و تأثیر لزجت گردابه‌ای از لزجت مولکولی بیشتر است. در بیشترین سرعت واقعی کشتی، سرعت معادل مدل ۰/۸۵ متر بر ثانیه و عدد بدون بعد رینولدز معادل $2/672 \times 10^6$ است. برای محاسبه ضخامت اولین لایه از رابطه تجربی (۳) استفاده شده است [۱۳].

$$\Delta y = 8.6L_y + R_e^{-13/14} \quad (3)$$

در این رابطه L طول، y^+ ارتفاع بدون بعد اولین لایه و Δy ضخامت یا بعد اولین لایه درون لایه‌های مرزی می‌باشند.

۲-۳. ایجاد شبکه

شبکه محاسباتی مورد نیاز در تحقیق حاضر با استفاده از الگوی شبکه اکتری^۲ و اجرای الگوی شبکه دلانی^۳ بر روی آن ایجاد شده است. (ترکیب دو رویکرد تولید شبکه). (شکل ۲ و جدول ۲). سپس با ارتقاء کیفیت و افزایش وضوح، شبکه لایه‌مرزی بر روی شبکه هموار تولید شده است.

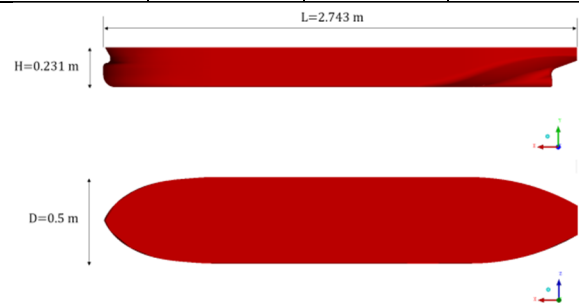


شکل ۲. برش شبکه Octree (بالا) و شبکه Delaunay (پایین) در صفحه عمود بر z

پس از تهیه فایل سه‌بعدی مختصات کشتی و ورود آن به نرم‌افزار، اصلاحات مورد نیاز بر روی هندسه کشتی انجام شده و از کیفیت هندسه تهیه شده اطمینان حاصل شده است. مراحل بعدی شامل ایجاد میدان‌های حل، ایجاد شبکه محاسباتی و ارتقاء کیفیت آن، وارد کردن شبکه محاسباتی آماده شده به بخش پردازش جهت مدل‌سازی و در نهایت استخراج نتایج در بخش پس پردازش است.

جدول ۱. ابعاد مدل آزمایشگاهی کشتی

| طول (میلی‌متر) | عرض (میلی‌متر) | ارتفاع (میلی‌متر) | آبخور (میلی‌متر) |
|-------------------|-------------------|----------------------|---------------------|
| ۲۷۴۱ | ۵۰۰ | ۲۳۰ | ۱۷۰ |



شکل ۱. ابعاد مدل کشتی در نرم‌افزار سی اف ایکس

۳. تئوری و محاسبات

۳-۱. معادلات

معادلات حاکم بر میدان جریان سیال همان معادلات ناویر استوکس هستند. در تحلیل جریان‌های تلاطمی به علت اثر حرکت‌های اغتشاشی حل آن‌ها به طور مستقیم بسیار دشوار است. به همین دلیل از شکل متوسط‌گیری شده معادلات ناویر استوکس (RANS) به صورت رابطه‌های ۱ و ۲ استفاده شده است [۱۲]:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

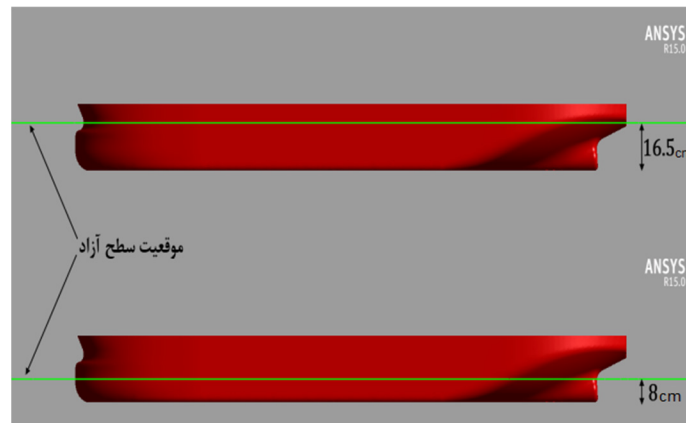
$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ v \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \right\} - \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} + f_i \quad (2)$$

در این معادلات، عبارت تنش رینولدز $(\bar{U}_i \bar{U}_j)$ به معادلات افزوده شده است. در این تحقیق از مدل تلاطمی k-ε جهت مدل‌سازی تنش‌های رینولدز در معادلات متوسط‌گیری شده ناویر استوکس استفاده شده است. مدل اغتشاشی k-ε از توابع تجربی جهت مدل‌سازی لایه‌های نزدیک به مرز دیواره

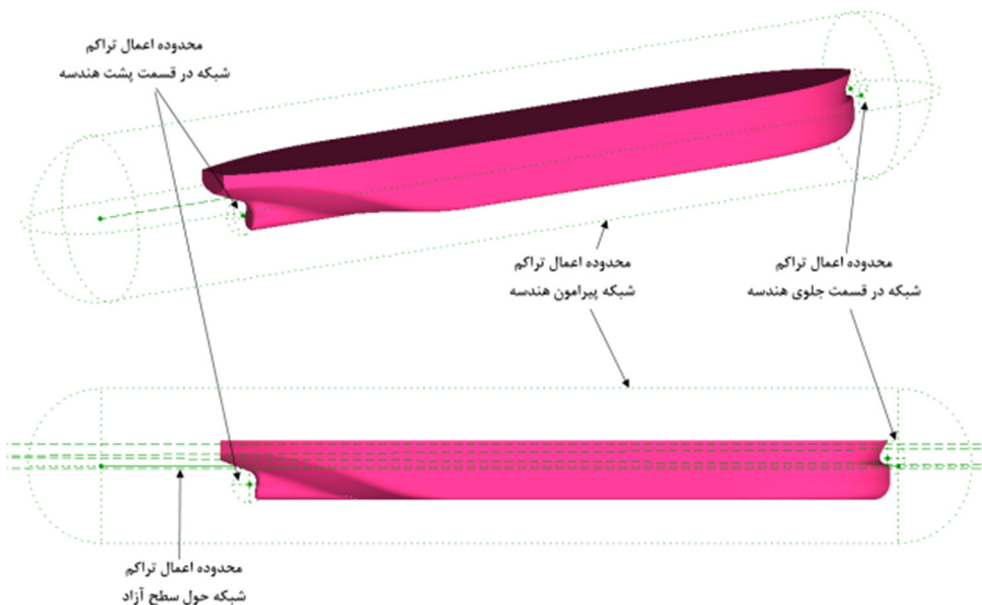
به دلیل نیاز به بررسی دقیق‌تر سطح آزاد، در هر یک از دو آب‌خور ۸ و ۱۶/۵ سانتی‌متر، همچنین پیچیدگی‌های هندسی و تغییرات شدید متغیرهای جریان در برخی نواحی از دامنه محاسباتی مانند بخش سینه و پاشنه کشتی، ابعاد شبکه حل پیرامون سطح آزاد به میزان کافی کوچک شده است. (شکل‌های ۳ و ۴)

جدول ۲. مشخصات شبکه محاسباتی

| وضعیت میدان حل | آب‌خور (سانتی‌متر) | ساختار شبکه | تعداد کل المان‌ها | تعداد کل گره‌ها |
|----------------|--------------------|-------------|-------------------|-----------------|
| کل میدان | ۸ | بی ساختار | ۴۶۶۷۰۶۴ | ۹۳۳۸۷۶ |
| کل میدان | ۱۶/۵ | بی ساختار | ۴۶۵۷۸۶۰ | ۹۲۹۶۵۳ |



شکل ۳. موقعیت سطح آزاد و آب‌خور کشتی در دو حالت مورد نظر ۸ و ۱۶/۵ سانتی‌متر



شکل ۴. محدوده‌های اعمال تراکم شبکه

۳-۳. تولید میدان حل

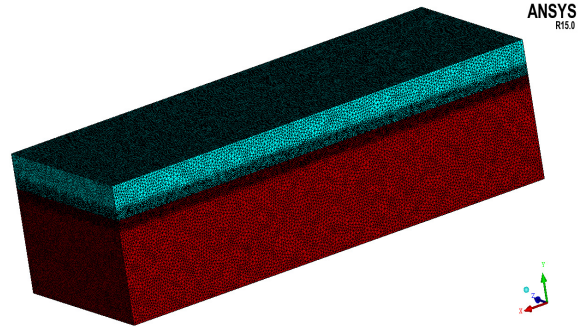
نامنظم و تحلیل عددی استفاده شده است. مزیت استفاده از این رویکرد، یکپارچگی شبکه و افزایش میزان پایداری حل است. (شکل‌های ۵ و ۶).

در تحلیل مسائل با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، ساخت و کیفیت شبکه محاسباتی ایجاد شده پیرامون مدل، تأثیر بسیار زیادی بر همگرایی، صحت و دقت نتایج دارد. در تحلیل حاضر از یک میدان حل منفرد جهت تولید شبکه

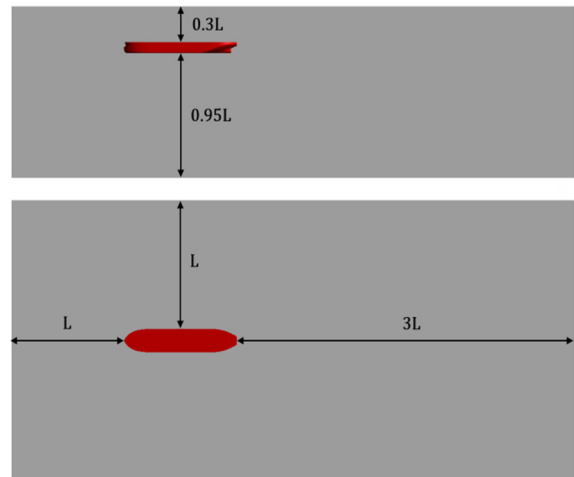
۴-۳. شرایط مرزی

ابتدا شبکه حل در بخش پیش پردازش نرم افزار فراخوانی شده است. شرایط مرزی بر روی شبکه اعمال شده و مسئله برای حل آماده شده است. برای مرز ورود از شرط جریان یکنواخت به عنوان شرط مرزی معادلات مومنوم استفاده شده است. شرط مرزی در خروجی شبکه از نوع جریان خروجی در نظر گرفته شد. به عبارتی از توزیع فشار هیدرواستاتیک برای فاز آب و از فشار ثابت اتمسفر برای فاز هوا به عنوان شرط مرزی خروجی معادلات مومنوم استفاده گردید.

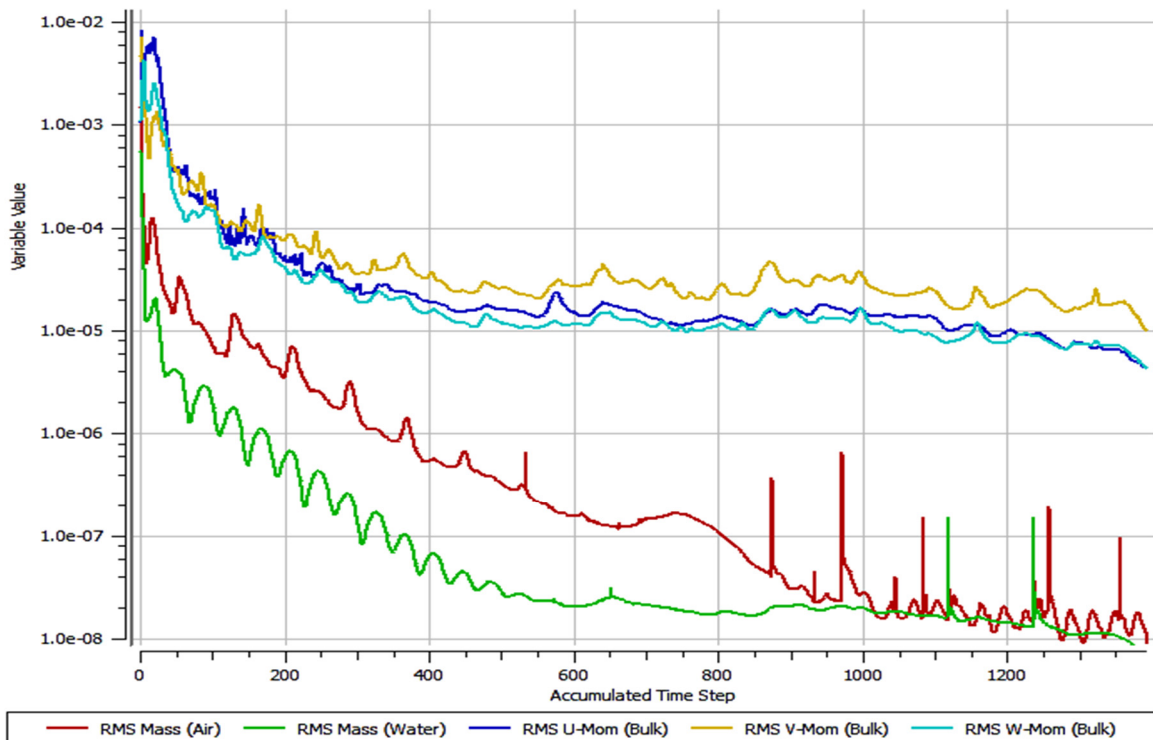
در مرز خروجی همانند مرز ورودی از پروفیل کسر حجمی مشابه استفاده شده است. برای معادلات تلاطمی نیز از شرط توسعه یافتگی (گرادیان صفر) استفاده به عمل آمد. برای دیواره های جانبی میدان حل، مرز فوقانی و تحتانی از شرط لغزش آزاد که تنش برشی بر روی آن صفر است استفاده شد. در این شرایط سرعت عمود بر سطح صفر و سرعت مماسی دقیقاً معادل مقدار محاسبه شده در اولین گره بعد از دیوار است. در بخش حل کننده نرم افزار، گام زمانی برای جریان آزاد بر اساس نسبت مقیاس طول (طول کشتی) به مقیاس سرعت انتخاب شده است.



شکل ۵. نمایی از شبکه محاسباتی در کل میدان حل



شکل ۶. موقعیت مرزهای میدان حل نسبت به کشتی



شکل ۷. منحنی مقادیر باقی مانده برای معادلات بقاء و مومنوم و برقراری معیار همگرایی 10^{-5}

تعیین سناریوی اجرای آزمون، آماده‌سازی مدل جهت انجام آزمایش، قلق‌گیری سیستم اندازه‌گیری نیرو، نصب مدل به ارابه کشش، انجام آزمون‌ها با توجه به سناریوی تعیین شده و استخراج داده‌ها از سیستم، تحلیل داده‌ها و ارائه نتایج، صورت گرفته است. برای اجرای آزمون‌های کشش بر روی مدل مقیاس شده نفت کش سالینا از حوضچه کشش پژوهشکده علوم و فناوری زیردریا در دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده شده است. (شکل ۸). طول این حوضچه ۱۰۸ متر، عرض آن ۳ متر و عمق آن ۲/۲ متر است.



شکل ۸. مدل مقیاس شده نفت کش سالینا در حوضچه کشش دانشگاه صنعتی اصفهان

مطابق جدول ۳، اجرای آزمون‌های کشش مدل در آب‌خورهای میانگین ۸ و ۱۶/۵ سانتی متر در پنج سرعت متفاوت انجام شد. مقادیر به دست آمده در هر آزمون به صورت رایانه‌ای ثبت شده است.

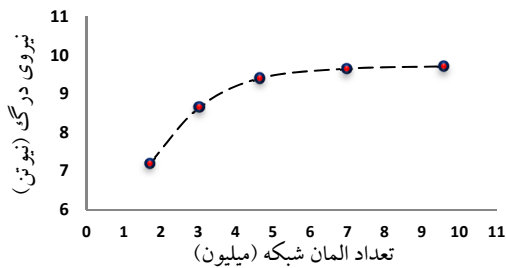
مقادیر باقی مانده یکی از اساسی‌ترین شاخص‌ها در همگرایی محاسبات عددی تکرارشونده است که به طور مستقیم میزان خطا را در حل دستگاه معادلات تعیین می‌کند. به این منظور توازن محاسباتی و همگرایی مقدار نیروی پسای کشتی به عنوان یک کمیت انتگرالی با اهمیت برای تمامی محاسبات، پایش شده است. در طی مدت حل معادلات، در همه محاسبات عددی، شاخص همگرایی 10^{-4} در نظر گرفته شده است. به عنوان نمونه، اطلاعات مربوط به همگرایی مربوط به آب‌خور ۰/۱۶۵ متر و سرعت ۱/۵۵ گره (معادل ۰/۷۹۷۴ متر بر ثانیه) در شکل ۷ ارائه شده است.

۳-۵. شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی

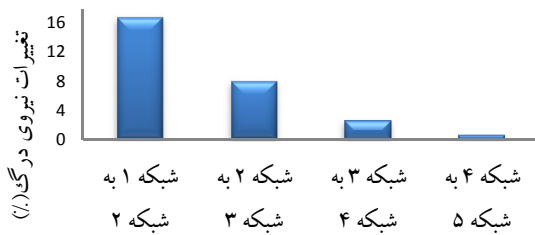
هدف از انجام آزمون‌های مدل در حوضچه کشش، تعیین مقادیر پسای کشتی و مقایسه آن با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی است. به این منظور، مدل این نفت کش با مقیاس ۱:۱۰۰ و با دقت هندسی ۰/۰۵ میلی متر به طول ۲/۷۴ متر، عرض ۰/۵ متر، آب‌خور ۰/۱۷ متر و ارتفاع ۰/۲۳ متر مطابق با استانداردهای آی. تی. تی. سی طراحی و ساخته شده است. آزمون‌های محاسبه نیروی پسای مدل برای ۵ سرعت مختلف از ۰/۶۵ تا ۰/۸۵ متر بر ثانیه (معادل با سرعت‌های واقعی کشتی، ۱۲/۵، ۱۳/۵، ۱۴/۵، ۱۵/۵ و ۱۶/۵ گره) مطابق با مدل عددی در حوضچه کشش انجام شده است. فرایند اجرای آزمون‌های هیدرودینامیک درون حوضچه کشش شامل

جدول ۳. نحوه اجرای آزمون مدل در حوضچه کشش

| تعداد کل آزمونها | تعداد تکرار | تعداد آزمون | سرعت‌های مدل (متر بر ثانیه) | آب‌خور مدل (سانتی متر) |
|------------------|-------------|-------------|-----------------------------|------------------------|
| ۳۰ | ۶ | ۵ | ۰/۶۵ | ۸ |
| | | | ۰/۷۰ | |
| | | | ۰/۷۵ | |
| | | | ۰/۸۰ | |
| | | | ۰/۸۵ | |
| ۳۰ | ۶ | ۵ | ۰/۶۵ | ۱۶/۵ |
| | | | ۰/۷۰ | |
| | | | ۰/۷۵ | |
| | | | ۰/۸۰ | |
| | | | ۰/۸۵ | |



شکل ۹. نمودار تغییرات نیروی پسا کشتی و کیفیت شبکه حل



شکل ۱۰. نمودار درصد تغییرات نیروی پسا کشتی با تغییر نوع شبکه

۴-۲. نتایج حاصل از آزمون‌های مدل در حوضچه کشتی

مطابق نتایج حاصل از آزمایش مدل کشتی در حوضچه کشتی، در آبخور میانگین ۸ سانتی متر، میانگین بیشترین نیروی پسا در سرعت ۰/۸۵ متر بر ثانیه برابر با ۵/۹۲ نیوتن و کمترین مقدار این نیرو در سرعت ۰/۶۵ متر بر ثانیه برابر با ۴/۱۴ نیوتن مشاهده شده است. در آبخور میانگین ۱۶/۵ سانتی متر، میانگین بیشترین نیروی پسا در سرعت ۰/۸۵ متر بر ثانیه برابر با ۱۰/۷۹ نیوتن و کمترین مقدار آن در سرعت ۰/۶۵ متر بر ثانیه برابر با ۶ نیوتن حاصل شده است. در مجموع طبق محاسبات انجام شده در خصوص عدم قطعیت، در سرعت‌های منتخب ۰/۶۵، ۰/۷، ۰/۷۵، ۰/۸ و ۰/۸۵ متر بر ثانیه، بیشترین عدم قطعیت مقاومت اندازه‌گیری شده مدل در آبخور ۸ سانتی متر برابر با ۰/۸۹ درصد و در آبخور ۱۶/۵ سانتی متر برابر با ۰/۷۷ درصد محاسبه شده است.

۴-۳. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی

مطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مدل کشتی که با استفاده از نرم‌افزار سی اف ایکس انجام شد، در آبخور میانگین ۸ سانتی متر، میانگین بیشترین نیروی پسا کل در سرعت ۰/۸۵ متر بر ثانیه برابر با ۶/۸۹ نیوتن و کمترین مقدار آن در سرعت ۰/۶۵ متر بر ثانیه برابر با ۴/۲۹ نیوتن است. در

فرایند یکسان‌سازی و حذف اطلاعات به دست آمده ناقص در هر آزمون لحاظ شد. با استفاده از مقادیر به دست آمده، ضریب مقاومت کل مدل محاسبه گردید. با کسر ضریب مقاومت اصطکاکی و مقاومت هوا از روش ارائه شده به وسیله آی. تی. تی. سی، ضریب مقاومت موج مدل که برابر با ضریب مقاومت موج کشتی نیز می‌باشد، محاسبه شده است. با افزودن ضریب مقاومت اصطکاکی و ضریب مقاومت هوا، همچنین مقادیر تصحیح ناشی از اختلاف زبری سطح پوشش مدل و کشتی به ضریب مقاومت موج کشتی، ضریب مقاومت کل کشتی و از آنجا نیروی پسا کل کشتی در سرعت‌های مورد نظر به دست آمده است.

۴. یافته‌ها

۴-۱. بررسی استقلال نتایج از شبکه حل

به منظور بررسی استقلال نتایج شبیه‌سازی از شبکه محاسباتی، پنج شبکه با مشخصات مندرج در جدول ۴ در نظر گرفته شده است.

جدول ۴. مشخصات شبکه‌های محاسباتی جهت ارزیابی شبکه

| کیفیت شبکه | تعداد کل المان‌ها | y^+ |
|------------|-------------------|-------|
| شبکه ۱ | ۱۶۹۸۵۲۸ | ۶۰ |
| شبکه ۲ | ۳۰۲۶۵۶۲ | ۶۰ |
| شبکه ۳ | ۴۶۵۷۸۶۰ | ۶۰ |
| شبکه ۴ | ۶۹۸۲۷۷۴ | ۶۰ |
| شبکه ۵ | ۹۵۸۶۳۲۲ | ۶۰ |

جهت بررسی استقلال نتایج عددی از شبکه محاسباتی در بحرانی‌ترین حالت شبیه‌سازی یعنی آبخور ۰/۱۶۵ متر و سرعت ۱/۵۵ گره (معادل ۰/۷۹۷۴ متر بر ثانیه)، نیروی پسا برای هر یک از حالت‌های ارائه شده در جدول ۴ استخراج و نتایج در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است.

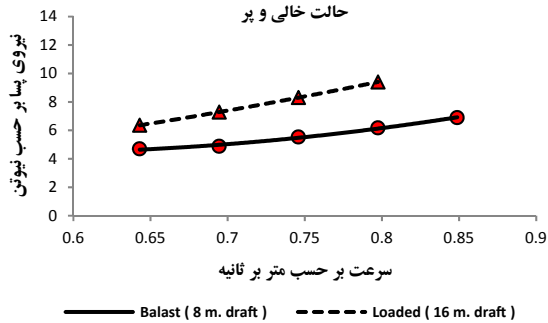
همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، مقدار این نیرو با تغییر شبکه از حالت ۱ به ۲، ۱۶/۸ درصد و از حالت ۲ به ۳ حدود ۸ درصد تغییر کرده است. در صورتی که با تغییر شبکه از حالت ۳ به ۴ و ۴ به ۵ به ترتیب ۲/۵ و ۰/۶ درصد تغییر می‌کند. با توجه به حجم بالای شبکه در حالت ۵ و تغییر ۲/۵ درصدی شبکه ۳ نسبت به شبکه‌بندی حالت ۴، از شبکه ۳ به عنوان شبکه بهینه در تحلیل‌ها استفاده شده است.

جدول ۵. مقادیر نیروی پسای کشتی

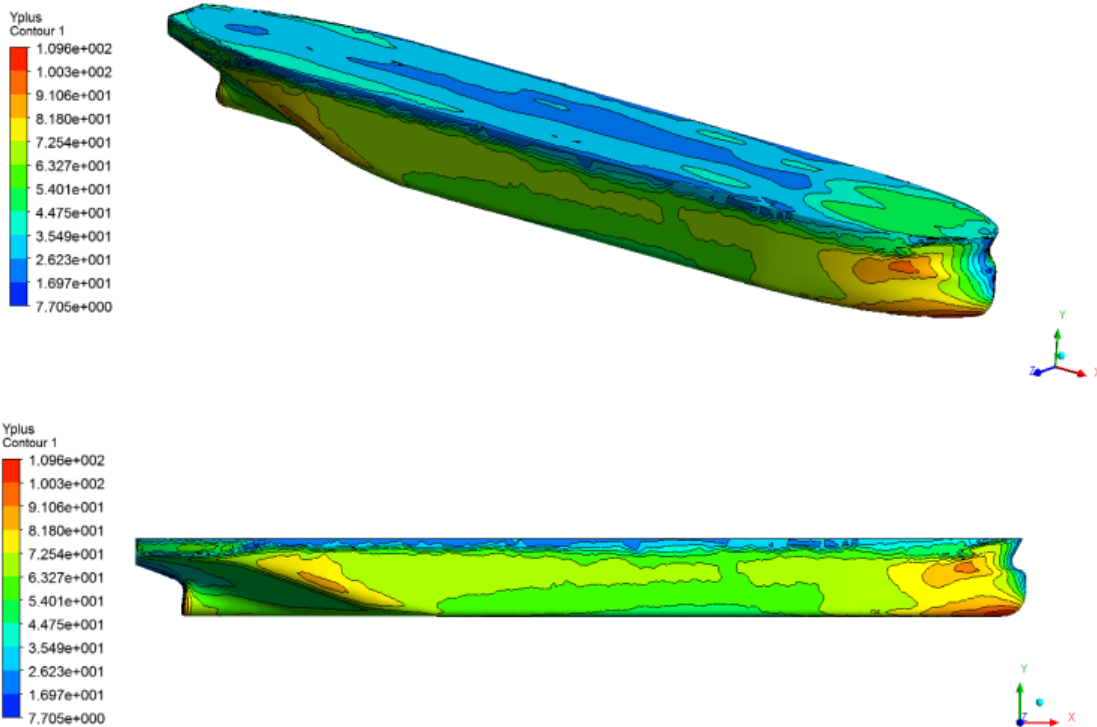
در سرعت‌های موردنظر - در دو حالت خالی و پر

| آبخور ۸ سانتی متر | سرعت کشتی (متر بر ثانیه) | نیروی پسا (نیوتن) | آبخور ۱۶/۵ سانتی متر | سرعت کشتی (متر بر ثانیه) | |
|-------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|------|
| | ۰/۶۴ | ۴/۲۹ | | ۰/۶۴ | ۶/۳۶ |
| ۰/۶۹ | ۴/۸۷ | ۰/۶۹ | ۷/۲۸ | | |
| ۰/۷۴ | ۵/۵۳ | ۰/۷۴ | ۸/۳۱ | | |
| ۰/۷۹ | ۶/۱۷ | ۰/۷۹ | ۹/۴ | | |
| ۰/۸۴ | ۶/۸۹ | ۰/۸۴ | محاسبه نشده | | |

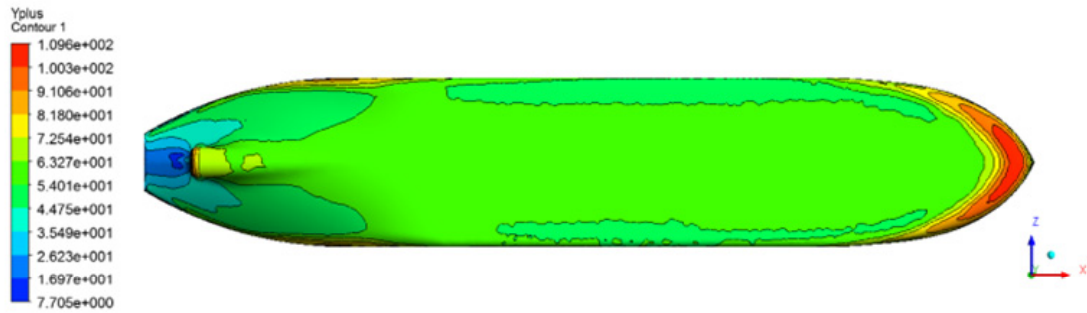
نتایج محاسبه نیروی پسای کل نفکش سالیبا در مدل عددی در حالت خالی و پر



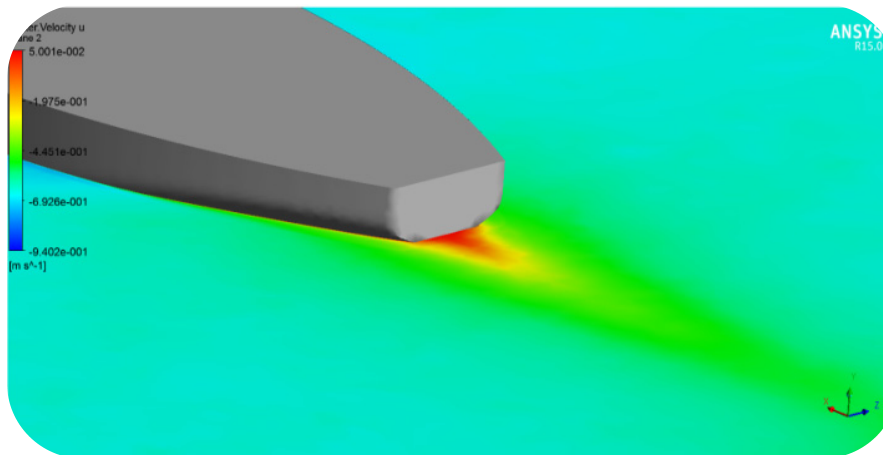
شکل ۱۱. تغییرات نیروی پسا با سرعت و آبخور



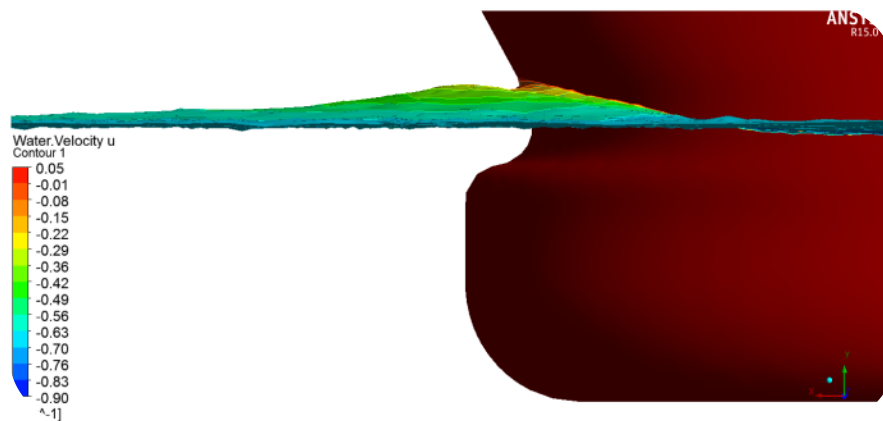
شکل ۱۲. توزیع $Y+$ در سه نمای مختلف بر روی بدنه کشتی در آبخور ۱۶/۵ سانتی متری و سرعت ۱/۵۵ گره



شکل ۱۲. (ادامه) توزیع y^+ در سه نمای مختلف بر روی بدنه کشتی در آب‌خور $16/5$ سانتی‌متری و سرعت $1/55$ گره



شکل ۱۳. توزیع سرعت محوری در پشت کشتی در آب‌خور $16/5$ سانتی‌متر و سرعت $1/25$ گره



شکل ۱۴. توزیع سرعت محوری بر روی پروفیل موج شکل گرفته شده در جلوی کشتی در آب‌خور $16/5$ سانتی‌متر و سرعت $1/25$ گره

وزن‌های متفاوت در محدوده قابل قبول 10% قرار دارد [۱۶]. روند نتایج تحقیقات پیشین در خصوص یک کشتی فله‌بر نشان داده است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت^۴ و نتایج مدل آزمایشگاهی کشتی، در سرعت‌های پایین تا 5% و در سرعت‌های بالاتر تا 13% اختلاف داشته است. ضمن اینکه همواره نیروی پسا به دست آمده از مدل عددی بیشتر از مقادیر به دست آمده از مدل آزمایشگاهی کشتی فله‌بر بوده است [۱۷].

۵. بحث

از مقایسه تحقیقات پیشین انجام شده در خصوص پیش‌بینی مقادیر عددی و آزمایشگاهی نیروی مقاومت کشتی، مشخص شد که نیروی پسا محاسبه شده بدنه کشتی در حوضچه کشتی، شامل مقاومت اصطکاکی، مقاومت موجی و مقاومت هوا، تخمین واقع بینانه تری ارائه می‌نماید. [۱۴-۱۵] خطای محاسباتی این روش برای بخش وسیعی از کشتی‌ها، با

سانتی‌متر تا ۱۵٪ نیز مشاهده شده است. دلیل این خطا ممکن است مرتبط با ضعف نرم‌افزار سی اف ایکس هنگام شبیه‌سازی مقاومت موجی مدل در سرعت‌های بالاتر باشد. زیرا در سرعت‌های پایین‌تر اختلاف نتایج کمتری مشاهده گردیده است.

جدول ۶ مقایسه نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که مطابق با تحقیقات پیشین است. در آب‌خور ۱۶/۵ سانتی‌متر اختلاف نیروی پسا مدل عددی و مدل آزمایشگاهی در بیشترین حالت حدود ۷٪ است. در حالی که این تفاوت در آب‌خور ۸

جدول ۶. اختلاف نیروی پسا محاسبه شده در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی

| | سرعت (متر بر ثانیه) | | | | | |
|-----------------------|---------------------|-------|------|------|------|------|
| | ۰/۶۴ | ۰/۶۹ | ۰/۷۵ | ۰/۸۰ | ۰/۸۵ | |
| آب‌خور ۱۶/۵ سانتی‌متر | مدل آزمایشگاهی | ۱۰/۷۹ | ۸/۸۷ | ۷/۷۹ | ۶/۷۶ | ۶ |
| | مدل عددی | ۹/۴ | ۸/۳۱ | ۷/۲۸ | ۶/۳۶ | ۶/۳۶ |
| اختلاف (درصد) | ۵/۶ | ۶/۳ | ۷/۱ | ۵/۷ | | |
| آب‌خور ۸ سانتی‌متر | مدل آزمایشگاهی | ۵/۹۲ | ۵/۴۹ | ۴/۶۸ | ۴/۶۲ | ۴/۱۴ |
| | مدل عددی | ۶/۸۹ | ۶/۱۷ | ۵/۵۳ | ۴/۸۷ | ۴/۲۹ |
| اختلاف (درصد) | ۱۴/۱ | ۱۱ | ۱۵/۴ | ۵/۱ | ۳/۵ | |

بیشتر مشاهده می‌شد نیز کاسته شده است. به همین دلیل روند نتایج به دست آمده از آزمون‌های مدل آزمایشگاهی و شبیه‌سازی رایانه‌ای در آب‌خور ۱۶/۵ متر تناسب بیشتری نسبت به روند نتایج به دست آمده در آب‌خور ۸ متر نشان داده است.

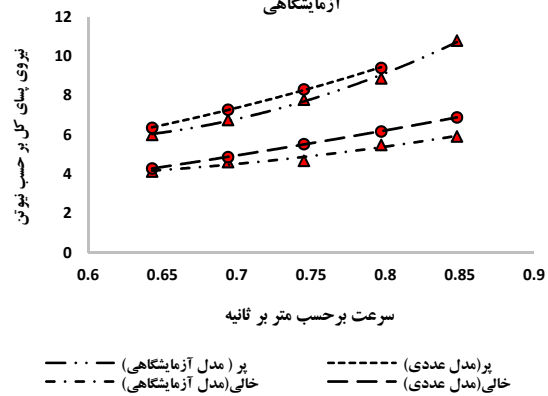
توجه به ارتباط بین مقاومت اصطکاکی و مقاومت کل کشتی روش مناسبی جهت اعتباردهی به نتایج محاسبات عددی و آزمایشگاهی محسوب می‌شود. مطابق نتایج لکنبی مقاومت اصطکاکی کشتی‌های بزرگ که با سرعت آهسته حرکت می‌کنند حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد مقاومت کل است [۱۸]. همچنین نتایج تحقیقات باراس در خصوص نفت کش‌های غول‌پیکر نشان می‌دهد که نسبت مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل حدود ۹۰ درصد است. رابطه (۴) [۱۹].

$$\frac{R_f}{R_t} = \%90 \quad (4)$$

با بررسی نتایج این پژوهش در خصوص مقایسه نسبت مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل کشتی در اعداد فرود بین ۰/۱۳ تا ۰/۱۶ یعنی در سرعت‌های واقعی کشتی بین ۱۲/۵ تا ۱۶/۵ گره در آب ساکن مشخص شده است که:

(الف) در مدل آزمایشگاهی، نسبت مقاومت اصطکاکی به

نمودار مقایسه نیروی پسا محاسبه شده مدل عددی و مدل آزمایشگاهی



شکل ۱۵. مقایسه نیروی پسا محاسبه شده کشتی به وسیله نرم‌افزار و مدل آزمایشگاهی

شکل ۱۵ نشان می‌دهد که در هر دو آب‌خور، نیروی پسا به دست آمده از مدل عددی همواره بیشتر از مقادیر به دست آمده از مدل آزمایشگاهی است. همچنین، مطابق جدول ۸ با افزایش آب‌خور مدل کشتی به ۱۶/۵ سانتی‌متر نسبت مقادیر مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل افزایش یافته است. به عبارتی مقادیر مقاومت موجی کاهش یافته و با کاهش مقاومت موجی در آب‌خور ۱۶/۵ سانتی‌متر، از اثر خطای حاصل از مقاومت موجی که در آب‌خور ۸ سانتی‌متر

جدول ۸. مقادیر مقاومت کل و مقاومت اصطکاکی در مدل آزمایشگاهی

| آبخور ۱۶/۵ سانتی متر | | | | | | |
|----------------------|--|-----------------------------|----------------------------------|-------------|--------------------------|----------------------|
| مقاومت کل کشتی (%) | نسبت مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل کشتی (کیلو نیوتن) | مقاومت کل کشتی (کیلو نیوتن) | مقاومت اصطکاکی کشتی (کیلو نیوتن) | مدل (نیوتن) | نیروی پسی کل (متر ثانیه) | سرعت مدل (متر ثانیه) |
| ۰/۸۹ | ۵۱۸۲/۹ | ۴۵۹۷/۶ | ۶ | ۰/۶۴۳ | | |
| ۰/۸۸ | ۵۸۲۷/۳ | ۵۱۵۱/۸ | ۶/۷۶ | ۰/۶۹۴ | | |
| ۰/۸۹ | ۶۷۴۱/۳ | ۵۹۶۹/۴ | ۷/۷۹ | ۰/۷۴۵ | | |
| ۰/۸۹ | ۷۶۹۶/۴ | ۶۸۲۰/۱ | ۸/۸۷ | ۰/۷۹۷ | | |
| ۰/۹۰ | ۹۵۰۸/۶ | ۸۵۲۳/۹ | ۱۰/۷۹ | ۰/۸۴۸ | | |
| سانتی متر آبخور ۸ | | | | | | |
| مقاومت کل کشتی (%) | نسبت مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل کشتی (کیلو نیوتن) | مقاومت کل کشتی (کیلو نیوتن) | مقاومت اصطکاکی کشتی (کیلو نیوتن) | مدل (نیوتن) | نیروی پسی کل (متر ثانیه) | سرعت مدل (متر ثانیه) |
| ۰/۸۸ | ۳۵۳۹/۶ | ۳۱۱۳/۹ | ۴/۱۴ | ۰/۶۴۳ | | |
| ۰/۸۸ | ۳۹۳۳/۶ | ۳۴۴۲/۳ | ۴/۶۲ | ۰/۶۹۴ | | |
| ۰/۸۶ | ۳۸۹۱/۸ | ۳۳۳۰/۳ | ۴/۶۸ | ۰/۷۴۵ | | |
| ۰/۸۶ | ۴۶۱۱/۵ | ۳۹۷۴/۱ | ۵/۴۹ | ۰/۷۹۷ | | |
| ۰/۸۵ | ۴۹۳۸/۵ | ۴۲۲۲/۳ | ۵/۹۲ | ۰/۸۴۸ | | |

۶. نتیجه گیری

مقاومت کل کشتی های نفت کش در محیط دریا شامل ۸۰ تا ۹۰٪ مقاومت اصطکاکی و حدود ۱۰ تا ۲۰٪ مقاومت موجی است. در کشتی هایی که سهم سطح بیرون از آب بدنه آنها بیشتر است، مانند کشتی های مسافربری و کانتینر برها، مقاومت اصطکاکی حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد و مقاومت موجی یکی از مؤلفه های اصلی اثرگذار بر تغییر الگوی مصرف سوخت این کشتی ها به شمار می آید. در این پژوهش کاربردی با استفاده از نرم افزار قدرتمند دینامیک سیالات محاسباتی انسیس سی اف ایکس (ANSYS CFX)، مدل عددی یک کشتی نفت کش غول پیکر متعلق به ناوگان شرکت ملی نفت کش ایران جهت محاسبه مقادیر نیروی پسی بدنه کشتی با توجه به بیشترین درصد فراوانی شرایط سرویس دهی واقعی آن در ۴ سال اخیر یعنی در حالت های

مقاومت کل کشتی در کمترین حالت در آبخور ۸ سانتی متر ۸۵ درصد و در بیشترین حالت در آبخور ۱۶/۵ سانتی متر ۹۰ درصد است؛

(ب) در مدل عددی، نسبت مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل کشتی در کمترین حالت در آبخور ۸ سانتی متر ۸۹ درصد و در بیشترین حالت در آبخور ۱۶/۵ سانتی متر ۹۳ درصد است.

با استفاده از نسبت های ارائه شده در الف و ب که در مقایسه با نتایج تحقیقات باراس نیز در محدوده مناسبی قرار گرفته است، استنباط می شود که در کشتی هایی که با سرعت های کم حرکت می کنند، بیشترین اختلاف نسبت مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل در حالت خالی و پر حدود ۵ درصد است. این نکته اهمیت اثر سرعت کشتی را در مقایسه با اثر وزن کشتی بر تغییر مقدار نیروی پسا نشان می دهد. (جدول ۷ و ۸).

جدول ۷. مقادیر مقاومت کل و مقاومت اصطکاکی در مدل عددی

| آبخور ۱۶/۵ سانتی متر | | | | | | |
|----------------------|--|-----------------------------|----------------------------------|-------------|--------------------------|----------------------|
| مقاومت کل کشتی (%) | نسبت مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل کشتی (کیلو نیوتن) | مقاومت کل کشتی (کیلو نیوتن) | مقاومت اصطکاکی کشتی (کیلو نیوتن) | مدل (نیوتن) | نیروی پسی کل (متر ثانیه) | سرعت مدل (متر ثانیه) |
| ۰/۸۹ | ۵۵۵۲ | ۴۹۶۶/۷ | ۶/۳۶ | ۰/۶۴۳ | | |
| ۰/۸۹ | ۶۳۶۰/۵ | ۵۶۸۴/۹ | ۷/۲۸ | ۰/۶۹۴ | | |
| ۰/۸۹ | ۷۲۷۴/۵ | ۶۵۰۲/۶ | ۸/۳۱ | ۰/۷۴۵ | | |
| ۰/۸۹ | ۸۲۳۹/۸ | ۷۳۶۳/۵ | ۹/۴ | ۰/۷۹۷ | | |
| آبخور ۸ سانتی متر | | | | | | |
| مقاومت کل کشتی (%) | نسبت مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل کشتی (کیلو نیوتن) | مقاومت کل کشتی (کیلو نیوتن) | مقاومت اصطکاکی کشتی (کیلو نیوتن) | مدل (نیوتن) | نیروی پسی کل (متر ثانیه) | سرعت مدل (متر ثانیه) |
| ۰/۹۳ | ۳۶۹۳/۴ | ۳۴۵۰/۹ | ۴/۲۹ | ۰/۶۴۳ | | |
| ۰/۹۳ | ۴۱۸۹/۹ | ۳۸۸۷/۴ | ۴/۸۷ | ۰/۶۹۴ | | |
| ۰/۹۲ | ۴۷۶۳/۲ | ۴۳۹۱/۸ | ۵/۵۳ | ۰/۷۴۵ | | |
| ۰/۹۲ | ۵۳۰۸/۶ | ۴۸۵۸/۲ | ۶/۱۷ | ۰/۷۹۷ | | |
| ۰/۹۱ | ۵۹۳۳ | ۵۳۹۳/۹ | ۶/۸۹ | ۰/۸۴۸ | | |

[۵] علی اکبری تقی، مقدس آهنگری علی اصغر، حیدری اسماعیل، وجدی تولون سید سعید. اندازه‌گیری تجربی مقاومت هیدرودینامیکی شناور یک‌کشتی. ارائه شده در: هفدهمین همایش صنایع دریایی؛ ۱۳۹۴ دی ۱-۴؛ جزیره کیش، ایران.

[۶] احمدزاده طلا تپه محمد، موسوی سیدمجید. شبیه‌سازی عددی خزه‌های دریایی چسبیده به بدنه شناورها و به‌کارگیری روش‌های کاربردی و نوین به‌منظور کاهش نیروی درگ ناشی از آن‌ها. نشریه مهندسی دریا. ۱۳۹۵؛ ۱۲(۲۳): ۸۱-۹۲.

[7] Heimann J. CFD Based Optimization of the Wave Making Characteristics of Ship Hulls. Faculty of Mechanical Engineering and Transport Systems of the Technical University Berlin. Mensch & Buch Verlag; 2005.p.189

[8] Özdemir YH, Bayraktar S, Yılmaz T. Computational investigation of a hull. ICMRT 2007. 2nd International Conference on Maritime Research and Transportation; 2007 Jun 28-30; Naples, Italy.

[9] Tsujimoto M, Shibata K, Kuroda M, Takagi K. A practical correction method for added resistance in waves. Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. 2008; 8:177-84.

[10] Banks J, Phillips AB, Turnock S. Free surface CFD prediction of components of Ship Resistance for KCS. In: 13th Numerical Towing Tank Symposium; 2010; Germany.

[11] Kim SO, Ock YB, Heo JK, Park JC, Shin HS, Lee SK. CFD simulation of added resistance of ships in head sea for estimating energy efficiency design index. OCEANS 2014;2014 Sep 14-19; Canada. IEEE Xplore;2015 Jan. p. 1-5.

[12] White F.M., Fluid Mechanics, University of Rhode Island, 8th Edition. McGraw-Hill Education; 2015.p.864

[13] ANSYS CFX Solver Modeling Guide. USA: ANSYS Inc.; 2013. p.626.

[14] Noblesse F, Huang F, Yang C. The Neumann-Michell theory of ship waves. Journal of Engineering Mathematics. 2013; 79(1):51-71.

[15] Huang F, Yang C, Noblesse F. Numerical implementation and validation of the Neumann-Michell theory of ship waves. European Journal of Mechanics-B/Fluids. 2013; 42: 47-68.

خالی و پر (آبخورهای میانگین ۸ و ۱۶/۵ متر) و سرعت‌های ۱۲/۵ تا ۱۶/۵ گره اجرا شده است. جهت اعتبار سنجی، نتایج مدل عددی با نتایج حاصل از اجرای آزمون‌های مدل آزمایشگاهی این نفت کشتی در حوضچه کشتی مقایسه شده است. بر اساس راستی‌آزمایی‌های انجام‌شده، اختلاف مقادیر به‌دست‌آمده نیروی پسا از مدل آزمایشگاهی و مدل عددی در اعداد فرود ۰/۱۳ تا ۰/۱۶، حداقل ۳/۵ و حداکثر ۱۵/۴ درصد است. با توجه به اختلاف نتایج محاسبه‌شده در سایر پژوهش‌ها که از ۵ تا ۱۷ درصد متغیر است، خطای محاسباتی نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش در محدوده مناسبی ارزیابی می‌شود.

در ادامه پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده با استفاده از نتایج این پژوهش و گردآوری اطلاعات بلندمدت محیطی مسیر حرکت کشتی، مقادیر کاهش ناخواسته سرعت و افزایش مصرف سوخت کشتی مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

[1] Park BJ, Shin MS, Ki MS, Lee GJ, Lee SB. Experience in Applying ISO19030 to Field Data. In: Bertram V, editor. HullPIC'17. 2nd Hull Performance & Insight Conference; 2017 Mar27-29; Ulrichshusen.

[۲] اکبری زهرا، میرعابدینی سیدمجیدی، پازکی فر شهلا. اندازه‌گیری درگ زبری پوشش‌های مختلف دریایی با استفاده از دستگاه روتور. ارائه شده در: نهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران؛ ۱۳۸۳ آبان ۱-۲؛ تهران، ایران.

[۳] میرعابدینی سید مجیدی، پازکی فرد شهلا، اکبری زهرا، محسنی محسن، شایلو زاده حسین. اثر پوشش‌های دریایی مختلف بر نیروی مقاومت اصطکاکی وارد بر بدنه شناور. مجله علوم و تکنولوژی پلیمر. ۱۳۸۵؛ ۱۹(۴): ۲۶۵-۲۷۵.

[۴] قاسمی مریم، موسوی زادگان سیدحسین. روش‌های محاسبه مقاومت اضافی شناور در امواج. ارائه شده در: پانزدهمین همایش صنایع دریایی؛ ۱۳۹۲ آبان ۷-۹؛ جزیره کیش، ایران.

پی‌نوشت

1. ITTC. 2017
2. Octree
3. Delaunay
4. ANSYS FLUENT

- [16] Chi YA, Huang F, Noblesse F. Practical evaluation of the drag of a ship for design and optimization. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B.* 2013; 25(5):54-645.
- [17] Ebrahimi A. Numerical Study on Resistance of a Bulk Carrier Vessel Using CFD Method. *Journal of the Persian Gulf.* 2012; 3(10):1-6.
- [18] Lackenby H. Resistance of Ships with Special Reference to skin Friction and Hull Surface Condition. London: Institution of Mechanical Engineers; 1962. p. 981-1014.
- [19] Barrass B. Ship design and performance for masters and mates. 1st Edition. Butterworth-Heinemann; 2004. p.264.