

بررسی اثر حبابی سینه بر نیروی مقاومت یک کشتی کانتینر بر به روش CFD

محمد سعید شمشیری^۱، محمد مونسان^۲

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی معماری کشتی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، m.s.shamshiri@aut.ac.ir

^۲ استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر، m.moonesun@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۱۳

کلمات کلیدی:

کشتی تجاری، حبابی سینه، مقاومت هیدرودینامیکی، KCS، CFD.

در کشتی‌های تجاری، مقاومت موج‌سازی بخشی از مقاومت کل بوده که برای کاهش آن، در سینه شناور حبابی سینه اضافه می‌شود. برای بررسی اثر حبابی سینه، مدل یک کشتی کانتینر در دو حالت با حبابی سینه و بدون آن در سه عدد فرود 0.22، 0.26 و 0.30 شبیه‌سازی شد. در ابتدا، حل عددی اعتبارسنجی شده که نشان می‌دهد نتایج حل معتبرند. مطابق نتایج، وجود حبابی سینه مقاومت اصطکاکی را حداکثر 2% افزایش می‌دهد. در سه عدد فرود مذکور، مقاومت فشاری به ترتیب 17.1، 31.6 و 25.9 درصد کم می‌شود. حبابی سینه مقاومت کل را که مجموع مقاومت فشاری و اصطکاکی است، به ترتیب 1.8، 8.9 و 13.3 درصد کاهش می‌دهد. به علاوه، حبابی سینه ارتفاع موج ساخته شده روی بدنه و همچنین سطح آزاد را کاهش داده است. حبابی سینه در رفتار هیدرودینامیکی شناور اثر مثبت دارد که با افزایش عدد فرود، افزایش می‌یابد.

Investigation of the Bulbous Bow Effect on the Resistance of a Container Ship by CFD Method

Mohamad Saeed Shamshiri¹, Mohamad Moonesun²

¹ Master of Science of Marine Engineering of Amirkabir University of Technology, m.s.shamshiri@aut.ac.ir

² Assistant Professor of Malek Ashtar University of Technology, m.moonesun@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 12 Feb. 2021

Accepted: 03 Jun. 2021

Keywords:

Merchant ship, Bulbous Bow, Hydrodynamic Resistance, KCS, CFD.

ABSTRACT

In commercial ships, wave making resistance is a part of total resistance which to reduce it, a bulbous bow is added to the ship bow. To investigate the effect of bulbous bow on total resistance, a container ship model is simulated with and without the bulbous bow at three Froude Numbers: 0.22, 0.26 and 0.30. Initially, numerical simulation validation has been done, which shows that the results are valid. According to the results, the bulbous bow increases frictional resistance by a maximum of 2%. In these three Froude Numbers, the pressure resistance decreases by 17.1, 31.6 and 25.9%, respectively. At three mentioned Froude Numbers, bulbous bow decreases total resistance by 1.8, 8.9 and 13.3% respectively. In addition, the bulbous bow reduced the height of the wave made on the hull and the free surface. Bulbous bow causes positive effects on the hydrodynamic behavior of the vessel, which increase with increasing Froude Number.

Europa و Bremen در سالهای ۱۹۲۹ و ۱۹۳۰ نصب شد که با مصرف سوخت کمتری به سرعت ۲۷/۹ گره رسیدند که یک رکورد خوب محسوب می‌شد [۱۰] و بدین ترتیب طلسم کار توسط آلمانی‌ها شکسته شد. پس از آن تلاشهای مکرر و پیوسته تا به امروز توسط ژاپنی‌ها، روسها و فرانسوی‌ها انجام شده است که شرح کامل تاریخچه آن در منبع [۱] ذکر شده است.

امروزه با توجه به اهمیت یافتن افزایش بازدهی و کاهش مصرف انرژی، مطالعاتی با موضوع تأثیر حیابی سینه و بهینه سازی آن مطرح شده است. در سال ۲۰۱۶، لو و همکاران [۱۱] با بهینه سازی فرم هندسی حیابی سینه توانستند ۲.۸۵٪ مقاومت کل یک کانتینربر را کاهش دهند. در سال ۲۰۱۷، یلنگ و همکاران [۱۲] مقاومت افزوده یک نفتکش با فرم های متفاوت سینه را در موج کوتاه بررسی کردند. نتایج مطالعات آن ها نشان می دهد که با انتخاب حیابی سینه مناسب، می توان مقاومت افزوده ناشی از موج را تا ۳۰٪ کاهش داد. در سال ۲۰۱۷ یو و همکاران [۱۳] هندسه حیابی سینه یک کشتی فله بر را در آب آرام و موج بهینه سازی کردند و توانستند مقاومت موج سازی را حدود ۱۳٪ و مقاومت افزوده ناشی موج را تا حدود ۱۴٪ کاهش دهند. در سال ۲۰۱۷ هاگ و همکاران [۱۴] حیابی سینه یک کشتی ماهیگیری را در آب آرام بهینه کردند و پس از بهینه سازی، مقاومت کل شناور حدود ۲٪ کاهش یافت. در سال ۲۰۱۹، اثرات فرم حیابی سینه یک کشتی فله بر در آب آرام و موج روی مقاومت آن توسط لی و همکاران [۱۵] بررسی گردید. آن ها دریافتند که در فرم خاصی از سینه، مؤلفه فشاری مقاومت در آب آرام تا حدود ۹٪ و بین ۶.۵٪ تا ۱۳٪ در موج منظم کاهش می یابد.

از بررسی مطالعات پیشین می توان فهمید که با انتخاب فرم مناسب حیابی سینه، پتانسیل کاهش مقاومت کشتی وجود دارد. آنچه باعث شده که تا به امروز، هنوز نکات مبهم زیادی در مورد طراحی حیابی سینه وجود داشته باشد اینست که طراحی حیابی سینه باید متناسب با کشتی انجام شود. در طراحی حیابی سینه، پارامترهای هندسی و مکانی متعددی مطرح هستند که تا کنون به صورت پارامتریک مطالعه نشده اند و اثر آن ها بر هیدرودینامیک شناور مجهول است. علاوه بر این، مطالعه ای که اثر وجود حیابی سینه را به صورت دقیق بررسی کند، یافت نشد. در گذشته، تلاش اصلی بر انجام تست مدل استوار بوده و لذا بدلیل محدودیت هزینه و زمان، نمی توانستند همه حالت های ممکن را ارزیابی کنند ولی امروزه به کمک روش CFD می توان بیشترین حالات ممکن از حیابی سینه را با کمترین هزینه ممکن، مدلسازی و تحلیل کرد. این مقاله تلاشی است جهت بررسی اثرات وجود حیابی سینه بر رفتار هیدرودینامیکی خصوصاً نیروی مقاومت شناور به روش

حیابی سینه^۱ یک برجستگی نسبتاً بزرگ در قسمت سینه می باشد که نقش موثری در کاهش مقاومت موج سازی و در نتیجه کاهش مقاومت کل و مصرف سوخت کشتی دارد [۱]. کشتی های بزرگ دارای حیابی سینه بین ۱۵-۱۲ درصد مصرف سوخت کمتری نسبت به کشتی های معمولی دارند [۲] ولی در کشتی های کوچکتر، این مقدار در حدود ۵ درصد یا کمتر می تولند باشد. همچنین حیابی سینه، یک حجم بویانسی بزرگ در منتهی الیه سینه ایجاد می کند که اثر مثبتی در کاهش حرکات پیچ دارد. حیابی سینه معمولاً در کشتی های مؤثر است که انرژی جنبشی بالایی دارند که متناسب با جرم (جابجایی) کشتی و توان دو سرعت کشتی است. یعنی حیابی سینه برای کشتی های با جرم بزرگ مانند نفتکش های بزرگ و کشتی های دارای سرعت بالا مانند کشتی های کروز مسافری و کانتینربرها مزیت های خوبی ایجاد می کند [۳]. کشتی های دارای تناژ کم (کمتر از ۴۰۰۰ تن dwt) یا دارای سرعت کم (کمتر از ۱۲ گره) هستند دارای مزایای چندانی در نصب حیابی سینه نیستند که علت آن بوجود آمدن گردابه های اطراف حیابی است مانند یدک کش ها و کشتی های صیادی [۳]. همچنین معلوم شده است که حیابی سینه برای کشتی های با دو مشخصه زیر می تواند بیشترین بازدهی را داشته باشد: (۱) طول آبخور بیش از ۱۵ متر باشد [۴] و (۲) حیابی سینه متناسب با سرعت و هندسه بدنه کشتی طراحی و بهینه شده باشد [۵]. از دیدگاه هیدرودینامیکی، حیابی سینه یک منطقه پرفشار بزرگ با قله موج ایجاد می کند که در ادامه با قعر موج می تواند قله موج ایجاد شده ناشی از منطقه پرفشار سینه را خنثی کرده و مقاومت موج سازی را کاهش دهد [۶]. علل هیدرودینامیکی این پدیده به تفصیل در منابع [۷] و [۸] تشریح شده است. یک اتفاق در حدود سال ۱۹۰۰ باعث کشف اثر حیابی سینه شد. در آن زمان از قایق های اژدر افکنی استفاده می شد که در زیر بدنه، یک یا دو اژدر حمل می کردند. گزارش خدمه این قایق ها نشان می داد که وجود اژدرها باعث افزایش سرعت می شود [۵] که البته در ابتدا موضوع عجیبی بود. دیوید تیلور در سالهای قبل از جنگ جهانی دوم، آزمایش هایی در این زمینه را در حوضچه کشتی شروع کرد و وقتی به سمت سرمهندس طراحی نیروی دریایی آمریکا رسید، حیابی سینه را روی کشتی جنگی Delaware طراحی و نصب کرد که البته بدلیل کامل نبودن دانش طراحی حیابی سینه در آن زمان، چندان مزیتی ایجاد نکرد. در جریان جنگ جهانی اول (۱۹۱۴-۱۹۱۸) نیز روی چند کشتی جنگی نصب شد که باز هم اثرات مطلوبی نداشت [۹]. در سال ۱۹۲۰ مطالعات توسط آلمانی ها تکمیل تر شد و حیابی سینه بر روی دو کشتی تجاری بزرگ

3.53 m	LCB	مرکز بویانسی تا عمود پاشنه
3.53 m	LCG	مرکز ثقل تا عمود پاشنه
0.23 m	VCG	مرکز ثقل تا کیل
0.25 L_{BP}	γ_{yy}	نسبت شعاع ژیراسیون حول محور Y
0.26	Fr	عدد فرود (بر مبنای طول بین دو عمود)
$2.196 \frac{m}{s}$	U	سرعت پیشروی
$997.56 \frac{kg}{m^3}$	ρ	چگالی آب
0.003711	C_T	ضریب مقاومت کل

رابطه‌ای که برای محاسبه ضریب مقاومت استفاده می‌شود، عبارت است از:

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2} \rho U^2 S_W} \quad (1)$$

با استفاده از رابطه (۱) نیروی مقاومت کل برابر 84.24 N بدست می‌آید که برای اعتبارسنجی استفاده خواهد شد.

۲-۲- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

میدان محاسباتی و شبکه اطراف مدل در نرم افزار STAR CCM+ ساخته شده و جریان سیال در آن دامنه، تحلیل شده است. ابعاد دامنه باید به قدری بزرگ باشد که بر نتایج تأثیری نگذارد. در این پژوهش، طول دامنه محاسباتی 5 برابر طول کلی شناور در نظر گرفته شده است به طوری که فاصله ابتدای دامنه تا عمود سینه، 1.5 برابر L_{BP} و فاصله عمود پاشنه تا انتهای دامنه، 3.5 برابر طول بین دو عمود می‌باشد. عرض دامنه نیز 2.5 برابر L_{BP} است. ارتفاع دامنه از بالا تا سطح آب برابر L_{BP} و از پایین تا سطح آب نیز 2.5 برابر L_{BP} در نظر گرفته شده است. برای ورودی و خروجی جریان دو شرط مرزی ورودی^۵ و فشار خروجی^۶ اعمال گردید. وقتی از شرط مرزی ورودی استفاده می‌شود، بردار سرعت جریان بالادست و وقتی از شرط مرزی فشار خروجی استفاده می‌شود، مقدار فشار استاتیک تنظیم می‌شود. شرط مرزی روی شناور، دیواره عدم لغزش^۷ خواهد بود. دامنه محاسباتی و شرایط مرزی حل در شکل ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است با توجه به تقارن جریان سیال و هندسه مدل نسبت به صفحه XZ، به جای کل دامنه، نصف آن شبیه سازی شده است و شرط مرزی تقارن^۸ بکار رفته است.

۲-۳- شبکه بندی

اولین مرحله جهت انجام شبیه سازی عددی جریان در داخل یک میدان، که به‌ویژه در مورد جریان‌های دارای لزجت، بایستی به دقت انجام گیرد، شبکه بندی میدان و تبدیل آن از یک محیط پیوسته به محیط گسسته به منظور اعمال روش‌های عددی

CFD بر روی یک کشتی کانتینربر که نتایج تجربی آن موجود است.

۲- شبیه سازی عددی و اعتبارسنجی

در شروع فرایند شبیه سازی عددی و پیش از حل مسئله اصلی، معمولاً شبیه سازی یک آزمایش تجربی که جزئیات و نتایج آن در دسترس است، انجام می‌شود و نتایجی که به دست می‌آید با نتایج آزمایش مقایسه می‌گردد تا میزان خطا و دقت روش حل مشخص شود. این فرایند، اعتبارسنجی نامیده می‌شود. با توجه به اینکه مسئله اصلی، بررسی تأثیر حبابی سینه بر مقاومت موج سازی یک شناور جابه جایی در آب آرام است، برای اعتبارسنجی، یک آزمایش تجربی که در حوضچه کشش انجام شده است، شبیه سازی می‌گردد. هر شبیه سازی عددی به سه مرحله اساسی پیش پردازش^۲، پردازش^۳ و پس پردازش^۴ تقسیم می‌گردد. در این بخش به صحت تنظیمات مربوط به پیش پردازش و پردازش پرداخته می‌شود. تنظیمات مربوط به پیش پردازنده شامل مدل هندسی، دامنه و شبکه محاسباتی و انتخاب حلگرهای مناسب مسئله است.

۲-۱- مدل هندسی، شرایط و نتایج تست

برای اعتبارسنجی، مدل شناور KCS انتخاب شده است. این شناور، یک کشتی کانتینربر مدرن است که حبابی سینه دارد و نتایج آزمایش‌های آن در حوضچه کشش در سال ۱۹۹۱ برای مطالعه فیزیک جریان و اعتبارسنجی شبیه سازی‌های عددی ارائه شده است. مشخصات هندسی و شرایط تست مدل KCS در جدول ۱ بیان شده است. در شبیه سازی عددی، مشابه آزمایش تجربی، سکان شناور نیز وجود دارد. نمای جانبی و نمای مقابل هندسه شناور در شکل ۱ نشان داده شده است. شرایط تست که به توزیع جرمی وابسته است، در این جدول مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه مدل فقط قابلیت چرخش حول محور Y را دارد، مؤلفه γ_{yy} شعاع ژیراسیون اهمیت دارد.

جدول ۱- مشخصات مدل KCS، شرایط و نتایج تست آن [۱۶، ۱۷]

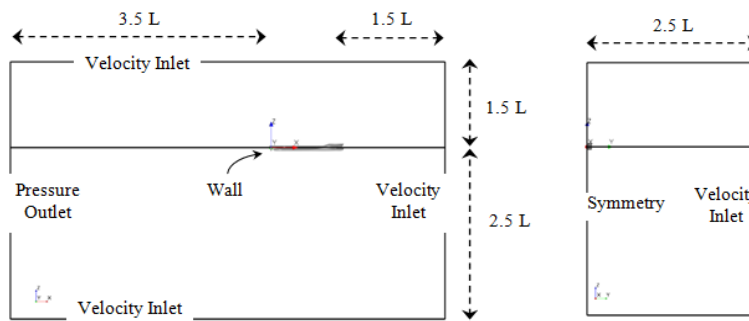
مقدار	نماد	مشخصه
31.60	λ	مقیاس
7.28 m	L_{BP}	طول بین دو عمود
7.36 m	L_{WL}	طول صفحه آبخورد
1.02 m	B_{WL}	بیشینه عرض صفحه آبخورد
0.34 m	T	آبخورد
$1.65 m^3$	∇	حجم جابجایی
$9.438 m^2$	S_W	سطح خیس
0.65	CB	ضریب بلوکی

مش در حجم‌هایی که سیال در آن‌ها وجود ندارد، حذف می‌گردند. شبکه اطراف سطح مدل، مجاورت سطح آزاد و ناحیه‌هایی که پارامترهای جریان تغییرات زیادی دارند باید ریزتر باشد تا حدی که تغییرات به خوبی دیده شوند. از آنجایی که از مدل شبکه تریمر استفاده می‌شود، به کمک ایجاد هندسه‌های غیردامنه‌ای و کنترل حجمی شبکه^{۱۱} ایجاد شبکه با دقت و کنترل بسیار زیادی امکان پذیر است. شکل ۳ تا ۷ شبکه‌بندی دامنه را نشان می‌دهد. مشخصات شبکه استفاده شده در این پژوهش در جدول ۲ موجود است. طبق جدول ۲، تعداد المان‌های محاسباتی حدود 600 هزار می‌باشد. همچنین اولین ردیف المان‌های لایه مرزی در فاصله‌ی بسیار کمی از سطح قرار گرفته است به گونه‌ای که y^+ شبکه محاسباتی مقداری کمتر از 100 دارد (شکل ۸).

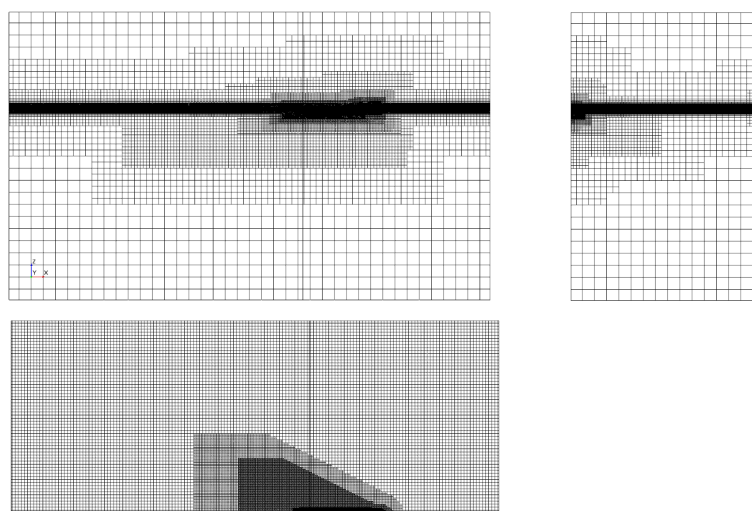
می‌باشد. وجود یک شبکه نامناسب می‌تواند بر همگرایی و پایداری روش عددی تأثیر منفی بگذارد و باعث بدست آمدن پاسخ‌های نامطلوبی در میدان جریان شود. به طور کلی یک شبکه مناسب شبکه‌ای است که اولاً منطبق بر مرز باشد تا بتوان شرایط مرزی را به راحتی بر روی آن اعمال نمود و ثانیاً بتواند پدیده‌های جریان از قبیل نقطه سکون و لایه مرزی را حس نموده و به خوبی نشان دهد که لازمه آن وجود کنترل مناسب بر توزیع نقاط شبکه در داخل میدان می‌باشد. در این پژوهش، از شبکه‌بندی هیبرید استفاده شده است. شبکه در نرم افزار CCM+ SRAR به روش تریمر^۹ تولید شده است. در این روش، تمام حجم هندسه با مش‌های شش وجهی مکعبی به عنوان پس زمینه^{۱۰} پوشانده شده و سپس مش‌ها با سطوح جامد بریده می‌شوند و در نهایت،



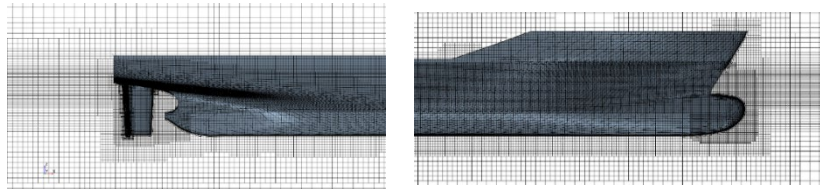
شکل ۱- نمای جانبی و نمای مقابل شناور KCS



شکل ۲- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی



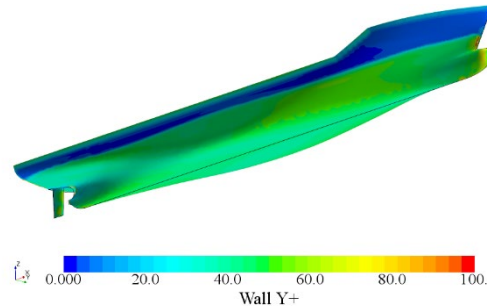
شکل ۳- نمای مقابل، جانبی و بالای شبکه بندی در دامنه محاسباتی



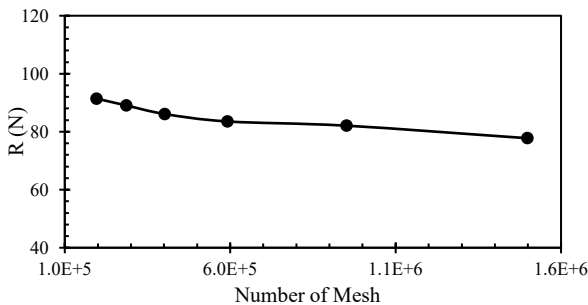
شکل ۴- شبکه بندی در ناحیه سینه و پاشنه شناور شناور

جدول ۲- مشخصات شبکه استفاده شده

تعداد سلولها	592218
ضخامت کل لایه مرزی	0.0126 m
ارتفاع اولین ردیف لایه مرزی (متر)	9.62e-4 m
تعداد ردیفهای لایه مرزی	6



شکل ۵- کانتور Y+ روی بدنه مدل



شکل ۶- نمودار مقاومت برحسب تعداد سلولهای شبکه

۴-۲- تنظیم شرایط شبیه سازی

جهت آنالیز جریان به روش عددی از نرم افزار SRARCCM+ نسخه 12.02 استفاده شده است. جدول ۴ شرایط حل را نشان می‌دهد. این شرایط در تمام شبیه سازی ها استفاده می شود.

جدول ۴- شرایط حل

سه بعدی	فضای حل
گذرا	زمان بندی
چندفاز اوپلری	ماده
کسر حجمی (VOF)	مدل چند فازی
چگالی ثابت	معادله حالت
مغشوش (k-ε Realizable)	رژیم جریان
دو درجه آزادی (هیو و پیچ)	درجات آزادی

۴-۵- اعتبار سنجی شبیه سازی عددی

شرایط حل عددی، دامنه محاسباتی، شبکه بندی و تنظیمات اعمال شده دقیقاً مشابه موارد مذکور در بخش های قبلی است.

اندازه سلولها و به تبع آن تعداد سلولها نیز بعد از مطالعه شبکه^{۱۲} انتخاب شده است. هرچقدر سلولهای شبکه ریزتر شوند، دقت محاسبات و همچنین هزینه محاسبات افزایش می‌یابد؛ بنابراین یافتن شبکه‌ای که از نظر هزینه محاسباتی و دقت در یک نقطه بهینه قرار داشته باشد، بسیار حائز اهمیت است. برای این کار، شبکه محاسباتی تا جایی ریز می‌گردد که نتایج تحلیل (در اینجا نیروی مقاومت)، از ابعاد سلولها مستقل گردد؛ یعنی با رسم نمودار نتایج تحلیل برحسب اندازه سلول (یا تعداد سلولها)، نخستین جایی که نمودار به حالت تقریباً افقی نزدیک می‌شود، همان نقطه بهینه است (شکل‌های ۹). ریز کردن ابعاد سلولها نیز می‌تواند قاعده خاصی داشته باشد؛ در این پژوهش نقطه آغازین نمودار یک مقدار نسبتاً درشت برای اندازه پایه‌ی مش^{۱۳} در نرم افزار CCM+ SRAR بوده و در هر مرحله، اندازه پایه‌ی مش $\frac{1}{\sqrt[3]{2}}$ برابر اندازه قبلی شده است. نتایج نهایی مطالعه شبکه در جدول ۳ آورده شده است. طبق این جدول، اندازه پایه مش 0.1125 متر (با تعداد سلول حدود 600 هزار) اندازه‌ی بهینه می‌باشد.

جدول ۳- نتایج نهایی مطالعه شبکه

R (N)	Mesh Number	Base Size (m)	#
91.415	196505	0.2250	1
89.065	285999	0.1786	2
86.109	402619	0.1417	3
83.505	592218	0.1125	4
82.078	951982	0.0893	5
77.761	1499139	0.0709	6

۳- اثر وجود حبایی سینه

برای بررسی اثر وجود حبایی سینه بر رفتار هیدرودینامیکی مدل شناور، هندسه ناحیه سینه شناور تغییر داده شد و حبایی از آن حذف گردید. در تغییر هندسه سعی شد کمترین تغییرات در فرم بدنه شناور صورت گیرد و در عین حال، فرم خط جریانی و صافی سطوح بدنه حفظ شود (شکل ۷). با توجه به تغییر هندسه مدل، حجم جلبه‌جایی و موقعیت مرکز بویانسی آن تغییر می‌کند. در شبیه سازی ها آب‌خور و تریم هیدرواستاتیکی دو مدل یکسان است که در جدول ۶ ذکر شده است. شبیه سازی در سه عدد فرود انجام شده است. عدد فرود میانی، مربوط به شرایط کارکرد مدل اصلی KCS است و دو عدد فرود دیگر، 15% کمتر و بیشتر از آن هستند انتخاب این دو عدد فرود، به تصادفی است. در جدول ۶، عدد رینولدز جریان نیز ذکر شده است. برای محاسبه عدد فرود و رینولدز، از طول صفحه آب‌خور استفاده می‌شود.

برای تحلیل‌های اصلی نیز همین تنظیمات اعمال خواهد شد. در جدول ۵ نیروی مقاومتی که از ضریب مقاومت تست تجربی محاسبه شده، همچنین نتیجه شبیه‌سازی عددی آورده شده است. خطای مقاومت به کمک رابطه (۲) محاسبه می‌شود. طبق جدول ۵، خطای تخمین مقاومت ناچیز است و مقدار آن کمتر از ۱ درصد می‌باشد. با توجه به این مقدار خطا، دقت شبیه سازی عددی قابل قبول بوده و تنظیمات و شبکه بندی استفاده شده برای این مسئله و مسائل مشابه معتبر هستند.

$$\%E = \left| \frac{\text{مقدار عددی} - \text{مقدار تجربی}}{\text{مقدار تجربی}} \right| \times 100 \quad (2)$$

جدول ۵- مقایسه مقاومت کل در تست تجربی و حل عددی

%E	شبیه‌سازی عددی	تست تجربی	$R_T (N)$
0.88	83.50 N	84.24 N	



شکل ۷- هندسه مدل بدون حبایی سینه

جدول ۶- مشخصات مدل KCS در حالت دارای حبایی سینه و بدون آن

مشخصه	نماد	مدل دارای حبایی سینه	مدل بدون حبایی سینه
آب‌خور	D	0.34 m	0.34 m
طول بین دو عمود	LBP	7.36 m	7.36 m
جابجایی	∇	1.65 m ³	1.63 m ³
مرکز بویانسی تا عمود پاشنه	LCB	3.53 m	3.49 m
مرکز ثقل تا عمود پاشنه	LCG	3.53 m	3.49 m
مرکز ثقل تا کیل	VCG	0.23 m	0.23 m
		0.22	0.22
عدد فرود	Fr	0.26	0.26
		0.30	0.30
		1.53×10^7	1.53×10^7
عدد رینولدز	Re	1.80×10^7	1.80×10^7
		2.10×10^7	2.10×10^7

می‌شود. در این جدول، درصد تغییر مشخصه دلخواه A در مدل دارای حبایی سینه نسبت به مدل بدون آن، با رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

۳-۱- نتایج شبیه سازی دو مدل و مقایسه آن‌ها

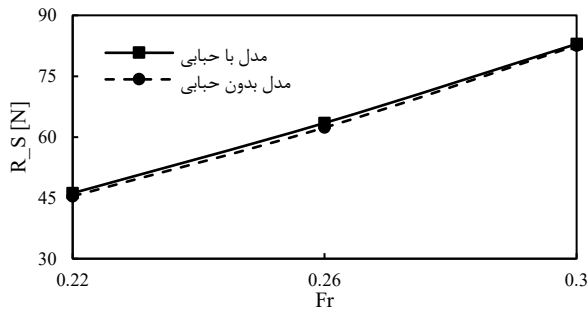
برای بررسی اثر وجود حبایی سینه بر عملکرد هیدرودینامیکی، نتایج دو مدل مذکور مقایسه می‌شوند. نتایج شامل نیروی مقاومت فشاری، مقاومت اصطکاکی مدل‌ها است که در جدول ۷ مشاهده

نمودار نیروهای هیدرودینامیکی و درصد تغییرات آن ها در هر عدد فرود در شکل ۸ تا شکل ۱۳ مشاهده می شود.

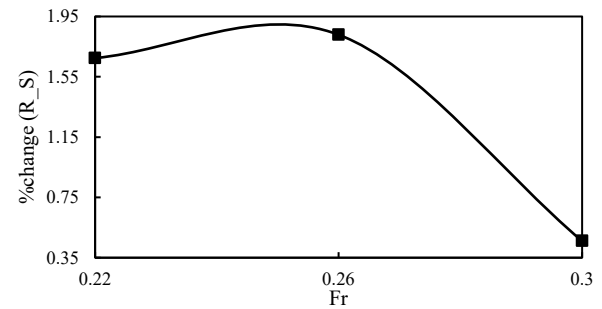
$$\%change (A) = \frac{A_{with\ Bulbosbow} - A_{without\ Bulbosbow}}{A_{without\ Bulbosbow}} \times 100 \quad (۳)$$

جدول ۷- نتایج شبیه سازی مدل KCS در دو حالت دارای حبابی سینه و بدون آن و مقایسه نتایج

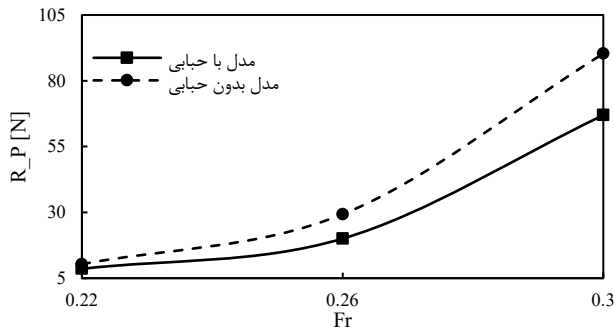
$\%change$	مدل بدون حبابی سینه [N]	مدل با حبابی سینه [N]	Fr	
1.67	45.40	46.16	0.22	
1.83	62.33	63.47	0.26	R_S
0.46	82.56	82.94	0.30	
-17.13	10.33	8.56	0.22	
-31.60	29.30	20.04	0.26	R_P
-25.91	90.32	66.92	0.30	
-1.81	55.73	54.72	0.22	
-8.87	91.63	83.50	0.26	R_T
-13.32	172.88	149.86	0.30	



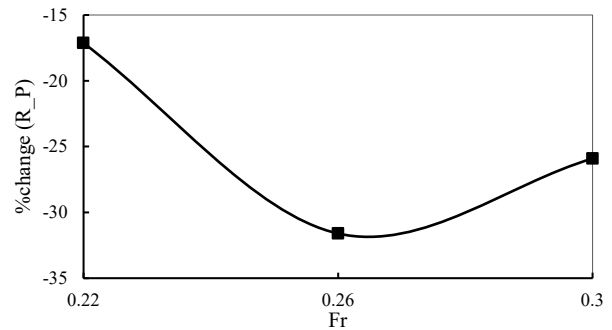
شکل ۹- نمودار مقاومت اصطکاکی مدل ها در سه عدد فرود



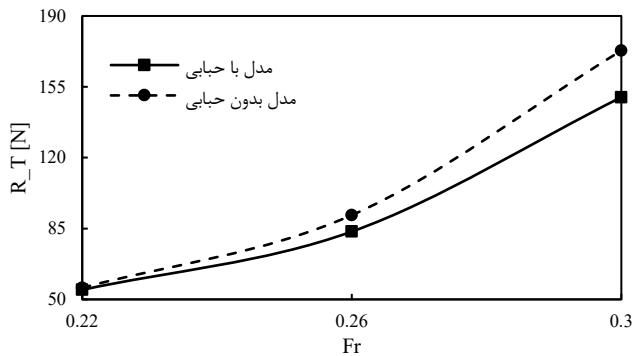
شکل ۸- نمودار درصد تغییرات مقاومت اصطکاکی در سه عدد فرود



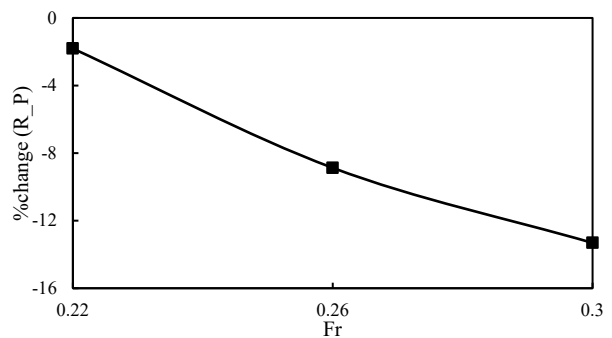
شکل ۱۱- نمودار مقاومت فشاری مدل ها در سه عدد فرود



شکل ۱۰- نمودار درصد تغییرات مقاومت فشاری در سه عدد فرود



شکل ۱۳- نمودار مقاومت کل مدل ها در سه عدد فرود



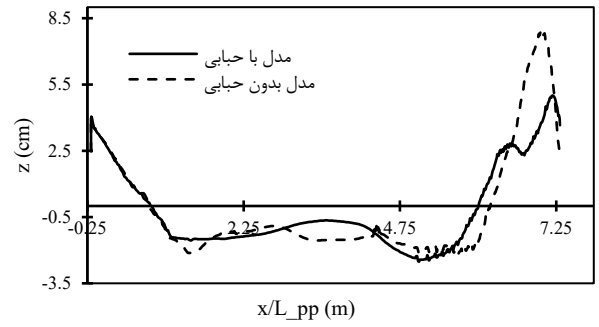
شکل ۱۲- نمودار درصد تغییرات مقاومت کل در سه عدد فرود

کاهش بیشتری خواهد داشت. هرچه عدد فرود بیشتر می شود، اثر حبایی سینه در کاهش مقاومت کل بیشتر خواهد بود. تغییرات فشار روی مدل، باعث ایجاد موج و انتشار آن در سطح آزاد می شود که مقاومت موج سازی را ایجاد می کند. برای بررسی اثر حبایی سینه بر موج سازی مدل، موجی که در اثر حرکت آن روی بدنه و سطح آزاد ایجاد می شود، بررسی می گردد. در شکل ۱۷، کانتور کسر حجمی آب روی بدنه مدل ها مشاهده می شود. برای بررسی بهتر، نمودار پروفیل سطح آزاد روی بدنه در شکل ۱۴ تا شکل ۱۶، ترسیم شده است. مطابق کانتورها و نمودارها، هرچه عدد فرود بیشتر می شود، موج ساخته شده روی بدنه بزرگتر می گردد. وجود حبایی سینه اثر قابل ملاحظه ای در کاهش ارتفاع موج ساخته شده روی بدنه به خصوص اولین قله موج را داشته است.

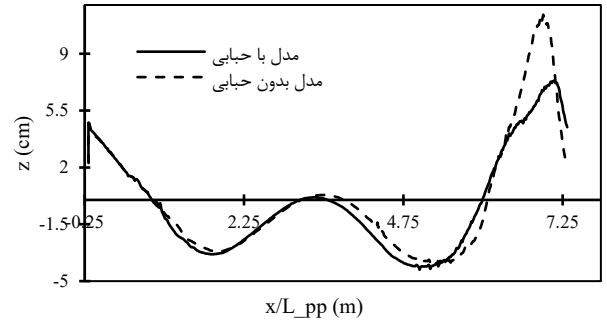
با توجه به نتایجی که در جدول ۷ آورده شده است، در هر سه سرعت، با افزودن حبایی سینه به مدل، مقاومت اصطکاکی مدل حداکثر ۲٪ افزایش می یابد. سطح خیس مدل دارای حبایی سینه، نسبت به مدل دیگر کمی بیشتر است و به همین دلیل در تمامی سرعت ها، مدل دارای حبایی سینه مقاومت اصطکاکی بیشتری دارد. در یک هندسه، مقاومت اصطکاکی تابعی از عدد رینولدز جریان است و با افزایش سرعت، رینولدز جریان افزایش می یابد و مقاومت اصطکاکی نیز بیشتر می شود. در اعداد فرود 0.22، 0.26 و 0.30 مقاومت فشاری به ترتیب 17.13، 31.60 و 25.91 درصد کم می شود. مقاومت کل که مجموع مقاومت فشاری و اصطکاکی است، در اعداد فرود 0.22، 0.26 و 0.30 به ترتیب 1.81، 8.87 و 13.32 درصد کاهش یافته است. با افزایش عدد فرود، سهم مقاومت فشاری در مقاومت کل بیشتر می شود و با کاهش مقاومت فشاری، مقاومت کل

تشکیل موج روی بدنه مشخصاً تابعی از توزیع فشار سیال در مجاورت بدنه است که این مسئله در شکل ۱۸ نشان داده شده است. در این کانتورها، فشار هیدرو استاتیکی روی بدنه حذف شده است. قله موج دقیقاً جایی رخ می دهد که فشار افزایش یابد و در نقاطی که فشار کم است، قعر موج رخ می دهد. هرچه فشار بیشتر شود ارتفاع قله موج بیشتر می گردد. با افزایش عدد فرود، اختلاف بیشینه و کمینه فشار روی بدنه زیاد می شود که در مدل بدون حبایی سینه نسبت به مدل اصلی بیشتر است. مدل دارای حبایی سینه توزیع فشار یکنواخت تری دارد.

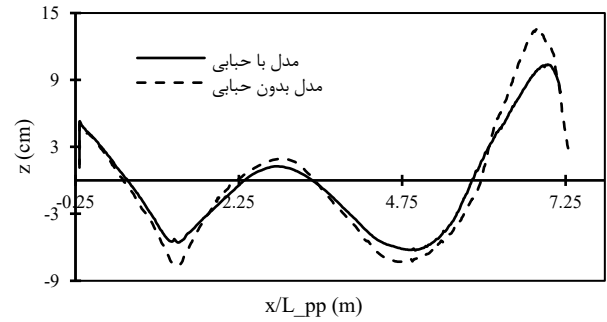
آنچه در مجموع، مقدار مقاومت موج سازی را تحت تاثیر قرار می دهد، علاوه بر ارتفاع موج، انتشار امواج روی سطح آب و نحوه تداخل امواج سینه و پاشنه است. شکل ۱۹ مربوط به کانتور ارتفاع سطح آزاد است که موج ها را اطراف بدنه نشان می دهد. در این کانتورها، الگوی موج کلون به خوبی مشاهده می شود. در تمامی اعداد فرود، موج سازی مدل دارای حبایی سینه بسیار کمتر است. ارتفاع قله ها و عمق قعرهای موجی که مدل دارای حبایی سینه ساخته، بسیار کمتر بوده و سطح آب یکنواخت تر است؛ بدین معنی که با حرکت مدل دارای حبایی سینه، سطح آب کمتر موج می شود.



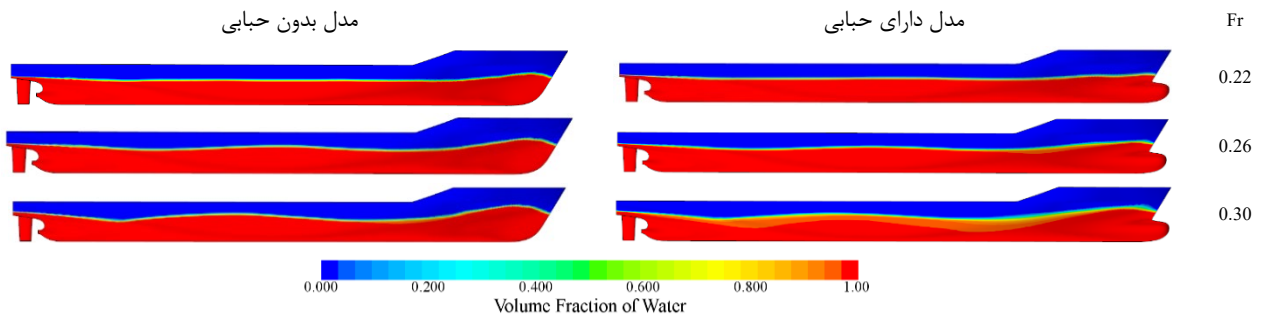
شکل ۱۴- پروفیل موج تشکیل شده روی بدنه مدل ها در $Fr=0.22$



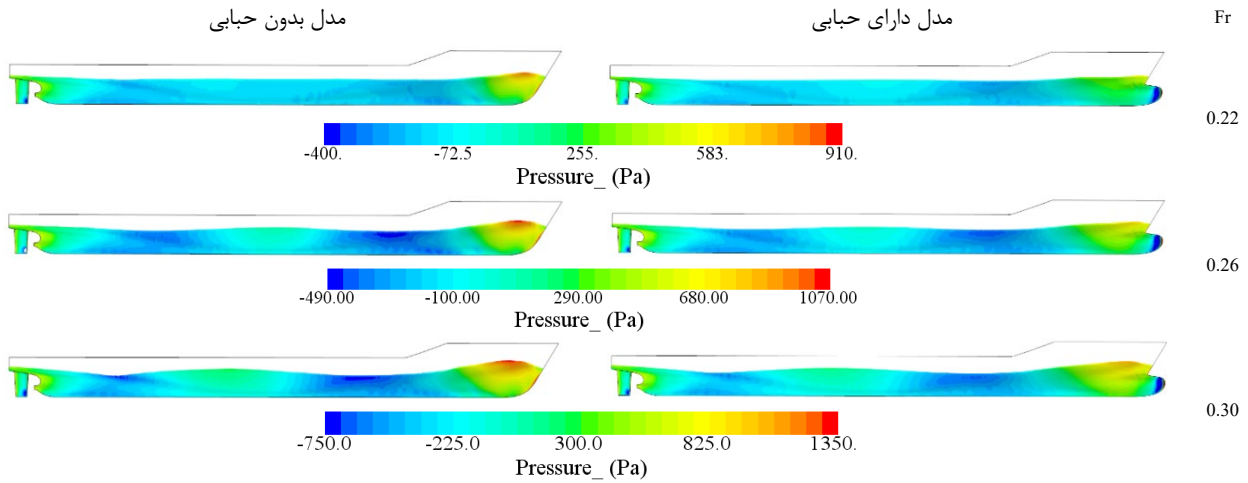
شکل ۱۵- پروفیل موج تشکیل شده روی بدنه مدل ها در $Fr=0.26$



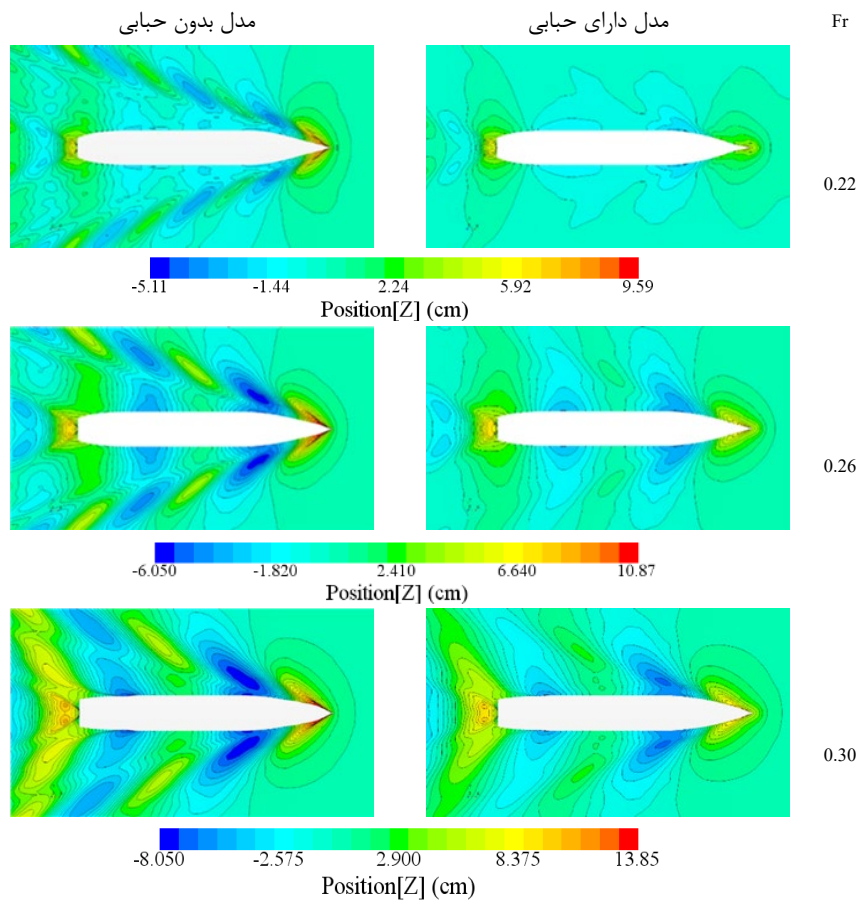
شکل ۱۶- پروفیل موج تشکیل شده روی بدنه مدل ها در $Fr=0.30$



شکل ۱۷- کانتور کسر حجمی آب روی بدنه مدل ها



شکل ۱۸- کانتور فشار روی بدنه مدل ها



شکل ۱۹- کانتور ارتفاع سطح آزاد

۴- جمع بندی

برای بررسی اثر وجود حبایی سینه بر عملکرد هیدرودینامیکی، مقاومت دو مدل شناور کانتینربر KCS در سه عدد فرود (0.22، 0.26 و 0.30) مقایسه شد. در تمامی اعداد فرود، با افزودن حبایی سینه به مدل، مقاومت اصطکاکی به میزان بسیار کمی (حد اکثر 2 درصد) افزایش یافته اما مقاومت فشاری به میزان قابل توجهی کم شد که به عدد فرود بستگی دارد و به ترتیب 17.13، 31.60 و 25.91 کاهش یافت. در اعداد فرود مذکور، حبایی سینه مقاومت

کل را که مجموع دو مقاومت اصطکاکی و فشاری است به ترتیب 1.81، 8.87 و 13.32 درصد کاهش داده است. وجود حبایی سینه ارتفاع موج ساخته شده روی بدنه و همچنین سطح آزاد را کاهش داده است.

در مجموع می توان برای تکمیل دانش طراحی حبایی سینه که امروزه دارای ابهامات بسیاری است، بخوبی از روش CFD استفاده نمود و لزوماً نیازی به روشهای پرهزینه تجربی و آزمایش مدل نمی باشد. تلاش نویسندگان این مقاله در این راستا ادامه دارد.

۵- کلید واژگان

[8] Newman, J.N., (1977) *Marine hydrodynamics*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press. ISBN 978-0-262-14026-3., p. 28.

[9] Friedman, N., (1985) *U.S. Battleships: An Illustrated Design History Annapolis*, Maryland: Naval Institute Press. p. 235. ISBN 978-0-87021-715-9. OCLC 12214729.

[10] Kludas, A., (2000) *Record breakers of the North Atlantic*, Blue Riband Liners 1838-1952. London: Chatham. ISBN 1-86176-141-4.

[11] Lu, Yu, Xin Chang, and An-kang Hu, (2016) *A hydrodynamic optimization design methodology for a ship bulbous bow under multiple operating conditions*, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics 10.1, pp330-345.

[12] Yang, Kyung-Kyu, and Yonghwan Kim., (2017) *Numerical analysis of added resistance on blunt ships with different bow shapes in short wave*, Journal of Marine Science and Technology 22.2, pp 245-258.

[13] Yu, Jin-Won, et al., (2017) *Bow hull-form optimization in waves of a 66,000 DWT bulk carrier*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 9.5 pp 499-508.

[14] Hong, Z. C., et al. (2017) *Self-blending method for hull form modification and optimization*, Ocean Engineering 146, pp 59-69.

[15] Lee, Cheol-Min, et al., (2019) *Effect of bow hull forms on the resistance performance in calm water and waves for 66k DWT bulk carrier*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 11.2, pp723-735.

[16] SIMMAN 2008:16th Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods, 14 April 2008, Copenhagen.
http://www.simman2008.dk/KCS/kcs_geometry.htm

[17] A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics, Tokyo, December 2-4, 2015.
<https://t2015.nmri.go.jp/>

- 1- Bulbous bow
- 2- Pre-Processing
- 3- Processing
- 4- Post-Processing
- 5- Velocity Inlet
- 6- Pressure outlet
- 7- No-slip Wall
- 8- Symmetry
- 9- Trimmer
- 10- Template
- 11- Volumetric Control
- 12- Grid (Mesh) Study
- 13- Base size

۶- مراجع

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Bulbous_bow
- [2] Bray, P., (2004) *Bulbous bows*, http://www.dieselduck.info/library/01%20articles/bulbous_bows.htm, December.
- [3] Barrass, B., (2004) *Ship Design and Performance for Masters and Mates*, Elsevier. ISBN 9780080454948, pp.210.
- [4] Wigley, W.C.S., (1936) *the Theory of the Bulbous Bow and its Practical Application*, Newcastle Tyne.
- [5] Bertram, V. Schneekluth, H., (1998) *Ship Design for Efficiency and Economy*, Elsevier. ISBN 9780080517100.
- [6] Grosenbaugh, M.A. Yeung, R.W., (1989) *Non-linear bow flows—An experimental and theoretical investigation*, Seventeenth Symposium on Naval Hydrodynamics: Wakes, Free Surface Effects, Boundary Layers and Viscous Flows, Two-phase Flow, Propeller/appendage/hull Interaction, Washington, pp. 195–214, ISSN 0082-0849.
- [7] Moonesun, M., (2013) *Handbook of Naval Architecture Engineering 2nd edition*, Kanoon Pazhoohesh publication, pp414-417, In Persian.