

## تأثیر تیغه بدنه دارای توپرکل بر کاهش توان مصرفی شناور کانتینربر در حالت خودران

**چکیده:** با توجه به اهمیت روزافزون انتشارات آلاینده در حمل و نقل دریایی و ضرورت کاهش مصرف سوخت کشتی ها، تلاش هایی به عمل آمده است تا این مسئله مورد توجه قرار گیرد. به تازگی، تیغه بدنه که به عنوان یک دستگاه ذخیره انرژی در ناحیه پاشنه کشتی نصب شده و مقاومت را کاهش می دهد، معرفی شده است. به علاوه، مطالعاتی بر روی استفاده از برآمدگی در لبه حمله هیدروفویل (توبرکل) نیز از موضوعات درحال بررسی است. هدف از این مطالعه ارزیابی تأثیر تیغه بدنه با و بدون توپرکل بر ضریب مقاومت کل و ضرایب پروانه در شرایط خودران است، همچنین تأثیر آنها بر مصرف انرژی کشتی مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج نشان می دهند که برای کشتی ای که دارای تیغه بدنه با لبه حمله صاف است، ضریب مقاومت کل ۱/۷۷٪، ضریب تراست ۲/۸۵۳٪ و ضریب گشتاور ۱/۱۴٪ نسبت به کشتی بدون تیغه بدنه کاهش یافته است. علاوه بر این، برای کشتی ای که دارای تیغه بدنه با توپرکل های لبه حمله است، این ضرایب به ترتیب ۱/۸۵٪، ۳/۴۸۸٪ و ۱/۹۴٪ کاهش یافته اند. علاوه بر این، مصرف انرژی در کشتی دارای تیغه بدنه با توپرکل های لبه حمله نسبت به کشتی دارای تیغه بدنه معمولی ۷۸۹٪ کاهش یافته است.

**واژه های راهنما:** کاهش مصرف سوخت، تیغه بدنه، توپرکل، خودران

حسن صیادی\*  
استاد

حمیدرضا

حمرانی سالمی

کارشناسی ارشد،  
دانشکده مهندسی مکانیک،  
دانشگاه صنعتی شریف، تهران

مقاله علمی پژوهشی  
دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰  
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۰۵  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۱

Hassan Sayyaadi\*  
Professor

Hamidreza  
Hamrani Salemi

MSc. Student,  
Department of  
Mechanical  
Engineering, Sharif  
University of  
Technology, Tehran

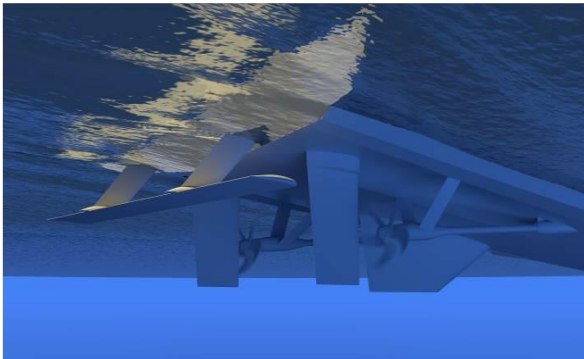
## The effect of hull vane with tubercles on reducing the power consumption of the container ship in self-propulsion mode

**Abstract:** Given the growing importance of emissions in maritime transportation and the need to reduce ship fuel consumption, efforts have been made to address this concern. Recently, the hull vane, serving as an energy storage device, has been introduced to the ship's stern area, reducing resistance. Additionally, recent studies have explored the use of tubercles on hydrofoils. This study aims to assess the impact of hull vane, with and without tubercles, on total resistance and propeller coefficients in self-propulsion conditions, as well as their effect on vessel power consumption. Results show that for a vessel with a smooth leading-edge hull vane, the total resistance coefficient decreased by 1.77%, propeller thrust coefficient by 2.853%, and torque coefficient by 1.14% compared to a vessel without a hull vane. Furthermore, for a vessel with a leading-edge tubercles hull vane, these coefficients decreased by 1.85%, 3.488%, and 1.94% respectively. Additionally, power consumption decreased by 0.789% compared to a vessel with a regular hull vane.

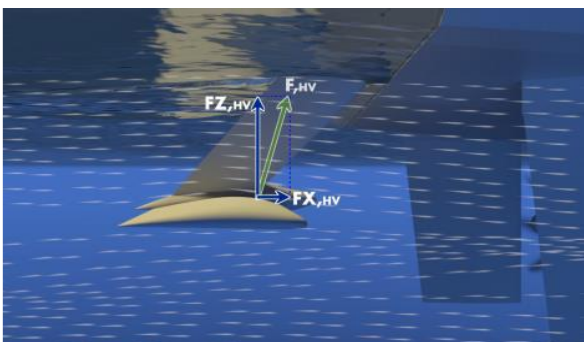
**Keywords:** Emission Reduction, Hull Vane, Tubercles, Self-Propulsion

## ۱- مقدمه

با توضیحات ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که تیغه بدنه یک ابزار کارآمد برای ذخیره انرژی و به تبع آن کاهش مصرف سوخت، و همچنین بهبود کیفیت دریامانی با کاهش حرکت پیچ نیز می‌باشد.



شکل ۱ پیکربندی تیغه بدنه [۱]



شکل ۲ نیروی رانش ایجاد شده از نیروی لیفت زاویه‌دار [۱]

تعدادی از مطالعات در مورد تیغه بدنه نشان می‌دهد که یک ابزار مؤثر برای کاهش قابل توجه مقاومت کشتی است. که برای جابجایی نسبتاً بالا در سرعت‌های عملیاتی گسترده‌تر مناسب است. همچنین مؤثرترین منطقه عدد فرود برای کشتی با تیغه بدنه بین ۰/۲ تا ۰/۷ است [۳]. در زیر این ناحیه سرعت، نقش مؤلفه اصطکاکی یا درگ اضافی پررنگ‌تر خواهد شد. و فراتر از این منطقه سرعت، مؤلفه عمودی لیفت، ممان بسیار بالایی ایجاد می‌کند که سبب افزایش مقاومت کل می‌شود. همچنین شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی CFD نشان می‌دهند که تیغه بدنه اعمال شده در مدل ۱/۵ متری سری AMERCRC منجر به کاهش ۱۴/۳۳، ۱۰/۵۳ و ۸/۰۵ درصد مقاومت برای اعداد فرود به ترتیب ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ می‌شود [۳]. علاوه بر این، تحقیق بر M اساس روش CFD برای تیغه بدنه بر روی ناوشکن DTB ۵۴۱۵ انجام شد [۴]. در این تحقیق نشان داده است که زمانی که سرعت به ترتیب ۱۸، ۲۴ و ۳۰ گره باشد، مقاومت به ترتیب ۱/۱۷٪، ۸/۴٪ و ۶/۷٪ کاهش خواهد

در اواخر دهه هشتاد میلادی سازمان بین‌المللی دریانوردی فعالیت در زمینه کاهش آلودگی هوا توسط کشتی‌ها را آغاز نمود و حاصل آن تصویب ضمیمه شش مارپل و اجباری شدن آن از سال ۲۰۰۵ میلادی می‌باشد. از آن زمان با توجه به افزایش اهمیت میزان انتشار آلاینده‌ها در صنعت حمل‌ونقل دریایی و مقررات سخت‌گیرانه‌تر سازمان بین‌المللی دریانوردی و هزینه بالای سوخت کشتی‌ها، مالکان کشتی به دنبال روش‌های کاهش مصرف سوخت می‌باشند. بدین منظور فعالیت‌های مختلفی در رابطه با کاهش مصرف سوخت کشتی‌ها انجام شد. از این میان استفاده از دستگاه‌های ذخیره انرژی، می‌تواند راهگشا باشد. اخیراً تیغه بدنه به‌عنوان یک فویل ثابت زیر آب که در ناحیه پاشنه کشتی نصب شده است، به‌عنوان یک دستگاه ذخیره انرژی به بازار معرفی شده است، که بیان می‌کند توانایی ذخیره انرژی با کاهش مقاومت را دارد. این وسیله توسط ون اوسانن در سال ۱۹۹۲ اختراع شد [۱].

پس از سال‌ها آزمایش و بهینه‌سازی، در سال ۲۰۱۴ با ادعای کاهش مصرف سوخت به میزان ۲۹٪ به طور موفقیت آمیزی آغاز شد. تیغه بدنه از لحاظ ظاهری مشابه هیدروفویل‌های سنتی است، اما اصل کاهش درگ در تیغه بدنه با هیدروفویل متفاوت است. کاهش مقاومت کلی توسط تیغه بدنه را می‌توان به چهار اثر مجزا تجزیه کرد [۱]:

- ۱- ایجاد مؤلفه رو به جلو در جهت طولی لیفت، باعث ایجاد نیروی اضافی رانشی می‌شود؛
- ۲- مؤلفه عمودی لیفت به طور مؤثر با ایجاد گشتاور، باعث اصلاح تریم کشتی می‌شود؛
- ۳- فشار منفی بر روی قسمت بالایی فویل، بر روی موج و تولید دنباله پاشنه تاثیر گذاشته و آن را کاهش می‌دهد؛
- ۴- در امواج، تیغه حرکات و مقاومت افزوده کشتی را کاهش می‌دهد.

شکل (۱) پیکربندی تیغه بدنه را نشان می‌دهد. به طور کلی می‌شود تیغه بدنه را در دسته‌بندی تجهیزات ذخیره انرژی پس‌چرخش قرار داد، که با توجه به جهت حرکت جریان سیال در پاشنه کشتی، نیرویی مطابق شکل (۲) بوجود می‌آید، که با تجزیه آن به مؤلفه‌های افقی و عمودی، یک نیروی تراست در راستای حرکت شناور و یک نیروی لیفت، عمود بر جهت حرکت ایجاد می‌شود.

درجه در محدوده عدد فرود  $0.6$  تا  $1.3$ ، با بار سرویس  $2$  کیلوگرم انجام شده است. از تجزیه و تحلیل نتایج مدل شبیه‌سازی شده با بارگذاری مختلف نتیجه گرفته شد که فویل در بار  $2$  کیلوگرم، چه با استفاده از فویل در زاویه حمله  $3$  درجه و چه صفر درجه، به‌طور بهینه کار می‌کند. در زاویه حمله  $3$  درجه، کاهش بهینه مقاومت در عدد فرود  $1.1$  تا  $1.3$ ، با کاهش پی‌درپی  $26/26\%$ ،  $21/86\%$  و  $21/45\%$  رخ داد که در عدد فرود  $1.1$  بیش‌ترین کاهش را داشت. درحالی‌که برای زاویه حمله صفر درجه، کاهش بهینه مقاومت در عدد فرود  $0.7$  تا  $0.9$ ، به ترتیب  $79/7\%$ ،  $18/86\%$  و  $26/7\%$  کاهش می‌یابد که در عدد فرود  $0.9$  بیش‌ترین کاهش مقاومت کل را دارد. درباره اثر موقعیت تیغه بر مقامت شناور با استفاده از کد دینامیک سیالات محاسباتی نیز مطالعه‌ای صورت گرفته است [۸]. در این تحقیق فویل استفاده‌شده از نوع  $NACA 2415$  با زاویه حمله  $5$  درجه، طول دهانه  $9/76$  متر و طول وتر  $1/15$  متر بود. این پژوهش برای شش مدل تیغه مختلف انجام شد (در مقاله این شش حالت آورده شده است). نتایج نشان داد که در حالت فویل تکی که در  $50\%$  آبخور یعنی  $2/9$  متر قرار دارد هنگامی که شناور با عدد فرود  $0.342$  در حال حرکت است، مقاومت به‌طور بهینه‌ای کاهش می‌یابد. که این کاهش مقاومت در مقایسه با بدنه بدون تیغه  $20/135\%$  خواهد بود. علاوه بر این، تقلید از طبیعت، یکی از راه‌های کلیدی در افزایش بازدهی مصنوعات ساخته‌شده به دست بشر است. اخیراً مطالعاتی در مورد برآمدگی‌های لبه حمله باله نهنگ گوژپشت انجام شده است (شکل ۳)، که نشان می‌دهد این باله‌ها قدرت مانور نهنگ گوژپشت را در هنگام تعقیب طعمه، با به تأخیر انداختن جدایش جریان در زوایای حمله بزرگ‌تر، به شکل مؤثری افزایش می‌دهند [۹]. در نتیجه این باله‌ها عملکرد هیدرودینامیکی و توانایی این وال‌ها را برای ایجاد حرکات تند باوجود بدن حجیم را افزایش می‌دهند [۱۰]. این نوع از بال‌ها کاربردهای متنوعی را در صنایع مختلف دارا می‌باشند.

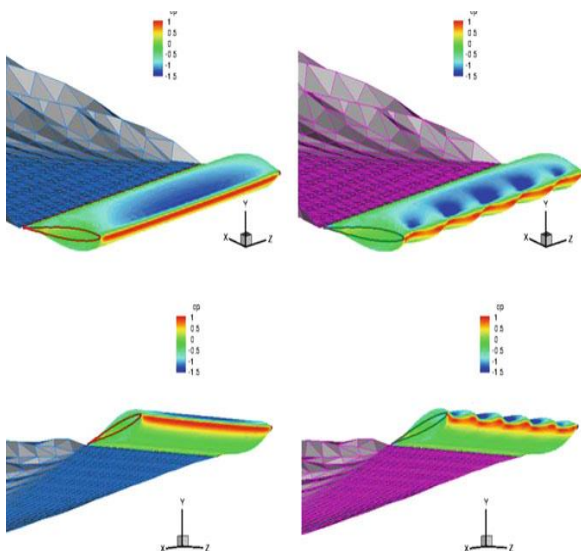


۳ نهنگ گوژپشت [۱۱]

یافت. همچنین ثابت‌شده است که تیغه بدنه قادر به کاهش مقاومت کل به میزان  $15/3\%$  برای  $Holland Class OPV$   $10.8$  متری است [۱].

مطالعه دینامیک سیالات محاسباتی همچنین عملکرد کشتی در امواج را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است، مشاهده شد که استفاده از تیغه بدنه می‌تواند حرکت هیو را به میزان  $4/2\%$ ، پیچ را به میزان  $8/1\%$  مقاومت را به میزان  $4/9\%$  در امواج  $2$  متری کاهش دهد. مطالعه دیگر بر اساس شبیه‌سازی CFD نشان می‌دهد که کاربرد تیغه بدنه بر روی  $13$  AMEREC می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر مقاومت و تریم کشتی در امواج تأثیر بگذارد [۱]. همچنین کاهش مقاومت تا  $32/4\%$  مشاهده می‌شود، کاهش مقاومت به موقعیت عمودی و افقی تیغه بستگی دارد. همچنین اشاره‌شده است که موقعیت طولی پره یا تیغه تأثیر بیشتری بر عملکرد، نسبت به موقعیت عمودی دارد.

علاوه بر این، شبیه‌سازی کد دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی تأثیر فویل پاشنه بر مقاومت کشتی انجام گرفت و آزمایش در حوضچه کشش برای اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی انجام شد. یک مدل از بدنه  $40$  متری  $Orela$  برای این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه مشاهده شد که، ضریب مقاومت کل، وقتی که عدد فرود پایین است، بعد از رسیدن به حداکثر مقدار خود (در مانع مقاومتی)، شروع به کاهش می‌کند. همچنین دریافت شد، مقاومت، برای اعداد فرود کمتر از  $0.45$ ، تا بیش از  $13.9\%$  افزایش می‌یابد و در اعداد فرود بیش از  $0.55$ ، مقاومت تا بیش از  $10\%$  کاهش می‌یابد، این درحالی‌که است که مانع مقاومتی در عدد فرود تقریبی  $0.47$  اتفاق می‌افتد [۵]. مطالعه دیگری در رابطه با تیغه بدنه انجام شد [۶]. در این پژوهش تیغه بدنه در ناحیه پاشنه بر روی شناورهای با ناحیه بیلج گرد نصب شد، برای شکل تیغه از هیدرو فویل  $NACA 4412$  استفاده شد. این کار بر روی شناورهای سری AMECRC و مدل‌های  $3\#$ ،  $4\#$ ،  $8\#$ ،  $11\#$  و  $13\#$  انجام شد. مدل‌های  $8\#$ ،  $11\#$  و  $13\#$  کاهش قابل توجه  $7$  تا  $29$  درصدی در مقاومت را با میانگین کاهش  $17/3\%$  با قرارگیری تیغه بدنه، از خود نشان دادند. این در حالی است که مدل‌های  $3\#$ ،  $4\#$  هیچ بهبود قابل توجهی در مقاومت نشان ندادند. و در واقع مدل  $4\#$  افزایش مقاومت را در هنگام قرار دادن تیغه بدنه از خود نشان داد. همچنین در پژوهشی، به تجزیه و تحلیل کاهش مقاومت در کشتی‌های گشتی با سرعت بالا با استفاده از فویل عقب از طریق مدل شبیه‌سازی پرداخته است [۷]. این مطالعه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و با زاویه حمله  $3$  و  $0$



شکل ۴ روش پانل برای شبیه‌سازی بال با طول دهانه محدود تحت زاویه ۱۰ درجه، با لبه حمله صاف (سمت چپ) و برای لبه حمله دارای برآمدگی (سمت راست)، رنگ قرمز نشان دهنده فشار زیاد و آبی نشان دهنده فشار کم و سبز نشان دهنده فشار متوسط است [۱۵].

شبیه‌سازی RANS نشان داد که فویل با توپرکل، کانتورهای فشار سطحی، خطوط جریان و الگوی جداسازی جریان را در مقایسه با یک بخش فویل با لبه حمله صاف تغییر داده است (شکل ۵). فویل صاف (بدون توپرکل)، جدایش و تلاطم جلوی لبه فرار را در طول فویل نشان داد. از طرفی برای فویل دارای توپرکل، جداسازی تقریباً تا لبه فرار برای نواحی پایین دست تاج توپرکل به تاخیر افتاد. این تغییر در جریان به افزایش فشار در سمت مکش مربوط می‌شود که به طور محلی گرادپان فشار معکوس را کاهش می‌دهد. توپرکل‌ها، گردابه‌های جدا شده و خمیده را در قعرها با زاویه حمله بالا تولید می‌کنند. از آنجا که جریان به طور عمودی به لبه حمله برخورد نمی‌کند، جریان در مرکز فرورفتگی‌ها به اشتراک گذاشته می‌شود. این گرداب‌ها در طول وتر منظم می‌شوند و در طول وتر انتقال پیدا می‌کنند.

این اثرات مانع از جدا شدن لایه مرزی محلی در پایین دست توپرکل‌ها شده و خط واماندگی را به سمت لبه فرار هل می‌دهد. یک آزمایش تجربی از اثر توپرکل با استفاده از یک مدل وال گوژپشت فرضی در تونل باد در آکادمی نیروی دریایی ایالات متحده انجام شد [۱۸]. دو مدل با مقیاس ۱:۴ از بال‌هایی با مقطع NACA ۰۰۲۰ با و بدون توپرکل ساخته شدند. تست‌های استاتیک بر روی طیف وسیعی از زوایای حمله در عدد رینولدز ۵۰۰۰۰۰ اجرا شدند که با سرعتی که تقریباً نصف

بوشنل و مور (۱۹۹۱) اولین کسانی بودند که نشان دادند که توپرکل‌ها می‌توانند در کنترل جریان بر روی باله وال گوژپشت نقش داشته باشند. آن‌ها پیشنهاد کردند که توپرکل‌ها ممکن است درگ را روی باله کاهش بدهند. همچنین این برآمدگی‌ها می‌توانند برای تولید گردابه به عنوان استریک در هواپیماها مورد استفاده قرار گیرند [۱۲]. همچنین توپرکل‌های وال گوژپشت به عنوان استریک به کار رفته در هواپیما در نظر گرفته شده‌اند [۱۲].

استرک‌ها<sup>۱</sup> ژنراتورهای گردابه هستند که ویژگی‌های واماندگی<sup>۲</sup> یک بال را تغییر می‌دهند [۱۳]. همچنین در زوایای حمله بزرگ، استریک‌ها در مقایسه با بال‌های بدون استریک تاخیر ایجاد می‌کنند، اگر چه حداکثر لیفت از تغییرات جریان توسط استریک‌ها افزایش نمی‌یابد [۱۳].

در مرجع [۱۴] با استفاده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی اولین مطالعه مرتبط با طراحی منحصر به فرد بال وال گوژپشت را انجام دادند. یک روش پانل سه‌بعدی غیر لزج برای مدلسازی میدان جریان روی بخش‌های بال، با و بدون توپرکل در زاویه حمله ۱۰ درجه استفاده شد. مشخص شد که تنش برشی کل، بین توپرکل‌ها ۱۰٪ بیشتر از دیگر مکان‌ها در امتداد لبه حمله است (شکل ۴). نتایج تجزیه و تحلیل نشان داد که یک بال با برآمدگی لبه حمله می‌تواند لیفت را افزایش دهد در حالی که درگ القا شده را در مقایسه با بال با لبه حمله صاف کاهش می‌دهد. روش پانل افزایش ۴/۸ درصدی در لیفت، کاهش ۱۰/۹ درصدی در درگ القایی، و افزایش ۱۷/۶ درصدی در نسبت لیفت به درگ برای بخش‌های بال با توپرکل را نشان داد [۱۴]. همچنین فرض بر این است که توپرکل‌ها می‌توانند جدایی لایه مرزی را تغییر داده، به تاخیر انداخته و در نتیجه باعث تاخیر در واماندگی شوند.

شبیه‌سازی غیر دایم<sup>۳</sup> (RANS) برای جریان تراکم ناپذیر توسط جان ریفرنبرگ از دانشگاه کارنگی ملون و اریک پاترسون از دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا انجام شد. تحلیل آن‌ها برای بررسی اثرات توپرکل‌ها بر جداسازی جریان و عملکرد هیدروفویل متقارن برای فویل پایه NACA ۶۳-۰۲۱ در یک زاویه حمله ۱۰ درجه به کار گرفته شد [۱۵]. شرایط شبیه‌سازی برای عدد رینولدز یک میلیون در نظر گرفته شد.

مقایسه بخش‌های بال با و بدون توپرکل، الگوهای جریان متفاوتی را نشان داد که بر عملکرد هیدرودینامیکی تاثیر می‌گذارد [۱۶].

<sup>3</sup> Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes

<sup>1</sup> Strake

<sup>2</sup> Stall

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial (\overline{u_i u_j})}{\partial x_j} \quad (2)$$

در معادلات فوق  $U_i$  و  $\overline{u_i}$  به ترتیب بیان‌گر سرعت متوسط و نوسانات سرعت در راستای محور مختصات  $x_i$ ، فشار  $P$ ، متوسط، چگالی و ویسکوزیته سینماتیکی می‌باشد. علاوه بر این، ترم  $\overline{u_i u_j}$  بیان‌گر تنش رینولدز است، که از معادله زیر محاسبه می‌شود:

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

که در آن  $\nu_t$  ویسکوزیته ادی است، که با توجه به اینکه در این فصل از مدل آشفتگی  $k-\omega$  استفاده می‌شود، به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k}{\omega} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k} \quad (5)$$

که در آن  $C_\mu$  ثابت تجربی و  $k$  انرژی جنبشی و  $\varepsilon$  نرخ اتلاف انرژی جنبشی جریان آشفته است.

به‌منظور شبیه‌سازی جریان اطراف کشتی به‌صورت خودرانش، از مدل آشفتگی دو معادله‌ای  $k-\omega$  استفاده شده است، که روابط آن به شکل زیر است.

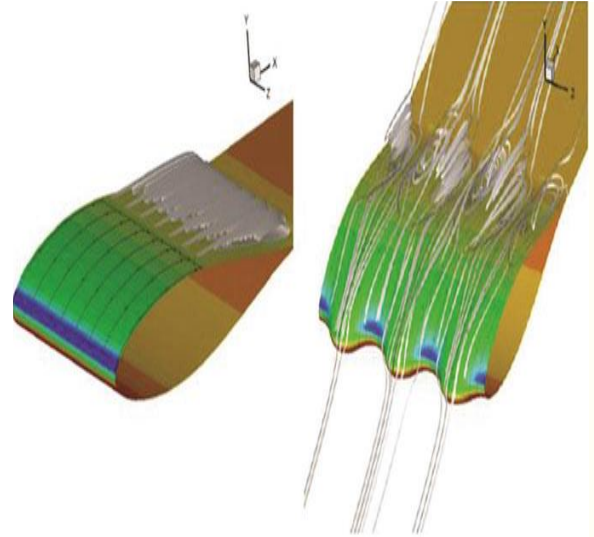
معادله انرژی جنبشی آشفتگی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{u_j k})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k^*} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \beta^* k \omega \quad (6)$$

و سپس معادله  $\omega$  به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{u_j \omega})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega^*} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \rho \beta \omega^2 \quad (7)$$

سرعت یک وال بود (۲/۶ متر بر ثانیه) صورت گرفت. لذا در پژوهش حاضر از مزایای تیغه بدنه و تورکل‌ها به منظور بهبود عملکرد پروانه و کاهش مصرف سوخت بهره برده می‌شود. برای انجام شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار استارسی‌سی‌ام‌پلاس استفاده خواهد شد.



شکل ۵ کانتور فشار و خطوط جریان در زاویه حمله ۱۰ درجه برای مقطع NACA 63-021 با لبه حمله صاف (سمت چپ) و لبه حمله دارای برآمدگی (سمت راست)، که از معادلات ناویر استوکس میانگیری شده رینولدز ناپایا استفاده شده است. خطوط جدایش بر روی بال با لبه حمله صاف مشاهده می‌شوند؛ در حالی که برای بال با لبه حمله دارای برآمدگی گردابه‌های تشکیل شده قابل مشاهده است که خطوط جریان بدون جدایش را نشان می‌دهد [۱۷]

## ۲- روش انجام پژوهش

در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی عددی جهت حل جریان بر پایه معادلات ناویر استوکس میانگیری شده رینولدز ناپایدار<sup>۱</sup> انجام شده است.

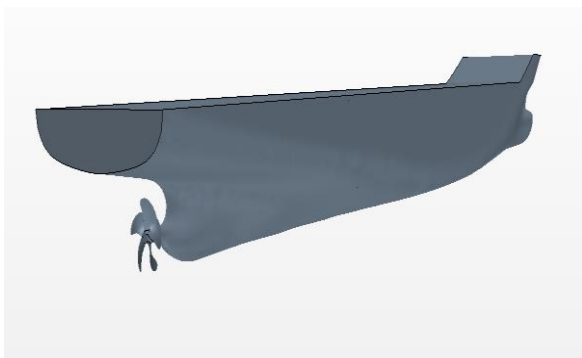
همچنین برای شبیه‌سازی از کد تجاری دینامیک سیالات محاسباتی اسارسی‌سی‌ام‌پلاس<sup>۲</sup> استفاده شده است. از این‌رو معادلات حاکم معادلات بقاء جرم و بقاء ممنتوم برای جریان ناپایدار سه‌بعدی تراکم‌ناپذیر با سرعت متوسط می‌باشد. از این‌رو معادله پیوستگی نیز به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

همچنین معادله ممنتوم نیز به‌صورت زیر خواهد بود:

<sup>2</sup> STAR CCM+

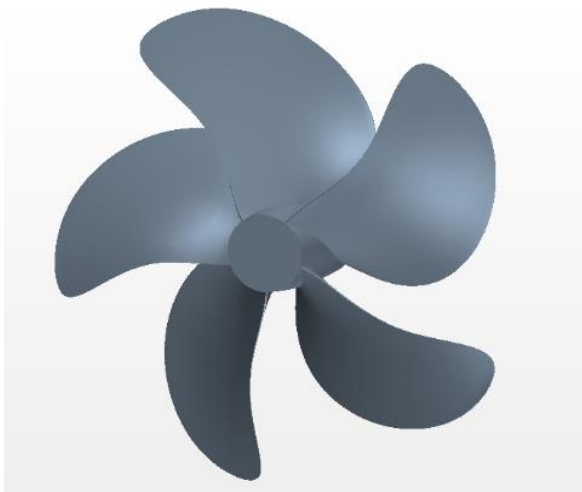
<sup>1</sup> URANS (Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes)



شکل ۶ نماهایی از شناور KCS با حضور پروانه و بدن سکان

جدول ۲ ابعاد و مشخصات کشتی KCS

عنوان	نماد واحد	کشتی اصلی	کشتی مدل
	$\lambda$	۱	۳۱/۶
طول بین دو عمود	$L_{pp}(m)$	۳۲۰	۷/۲۷۸
عرض کلی	$B(m)$	۳۲/۲	۱/۰۱۹
آبخور	$T(m)$	۱۰/۸	۰/۳۴۲
ضریب بلوکی	$C_B$	۰/۶۵	۰/۶۵
سرعت	$V(m/s)$	۱۲/۳۵	۲/۱۹۶
عدد فرود	$F_r$	۰/۲۶	۰/۲۶



شکل ۷ هندسه پروانه KP505

جدول ۳ مشخصات پروانه KP505

قطر	نسبت هاب	نسبت نوع گام	نسبت سطح پره گسترش یافته	تعداد پره	پروفیل پره
۰/۲۵	۰/۱۸	FPP	۰/۵	۵	NACA66

ضرایب موجود در معادلات فوق در جدول (۱) آورده شده است:

جدول ۱ مقادیر مربوط به ضرایب مدل آشفتگی کا-اومگا

ضریب	$\sigma_{\omega}^*$	$\sigma_k^*$	$\beta^*$	$\beta$	$\alpha$
مقدار	۲	۲	۰/۰۹	۰/۰۷۵	۰/۵۵

## ۲-۱- مدل سازی سطح آزاد

جهت مدل سازی سطح آزاد، از روشی به منظور حل جریان دو فازی به نام کسر حجمی سیال استفاده می شود. با تعریف  $\alpha$  به عنوان نسبت حجم سیال ۱ به کل سیال، به منظور تعیین سطح آزاد از معادله زیر استفاده می شود:

$$\phi = \phi_1 \alpha + \phi_2 (1 - \alpha) \quad (۸)$$

در معادله فوق  $\phi$  به عنوان یک خاصیت فیزیکی همانند چگالی، ویسکوزیته و غیره، بیان می شود.

$$\begin{cases} \alpha = 1 & \text{درون سیال ۱} \\ \alpha = 0 & \text{درون سیال ۲} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{مشترک دو سیال} \end{cases} \quad (۹)$$

در معادلات بالا اگر برابر ۰/۵ باشد، بدین معناست که سلول محاسبه شده با ۵۰ درصد آب و ۵۰ درصد هوا پر شده، که موقعیت سطح برخورد بین آب و هوا که موسوم به سطح آزاد است را بیان می کند.

## ۲-۲- مدل هندسی، دامنه حل و شبکه بندی

در پژوهش حاضر شناور مورد استفاده، شناور کانترینر بر KCS است. همچنین پروانه مورد استفاده برای شبیه سازی خودرانش، پروانه KP ۵۰۵ می باشد. مشخصات و ابعاد شناور و پروانه نیز به ترتیب در جداول (۲) و (۳) قابل مشاهده است.

همچنین برای بررسی تأثیر تیغه بدنه با و بدون توپرکل، بر روی مقاومت و ضرایب پروانه مدل هندسی این تیغه به شکل (۸) و (۹) به بدنه شناور متصل شده است که برای کاهش حجم محاسباتی از قرار دادن استراتها اجتناب شده است.

<sup>1</sup> Volume of Fluid (VOF)

انتخاب دامنه حل یا دامنه محاسباتی، متناسب با نوع مسئله، یکی از بخش‌های مهم شبیه‌سازی و تحلیل کشتی می‌باشد. زیرا اگر دامنه محاسباتی مناسب نباشد می‌تواند سبب بروز خطا در حل و یا افزایش هزینه محاسباتی شود. از این رو دامنه محاسباتی و شرایط مرزی متناسب با نوع مسئله به صورت شکل (۱۰) نیز انتخاب گردیده است.

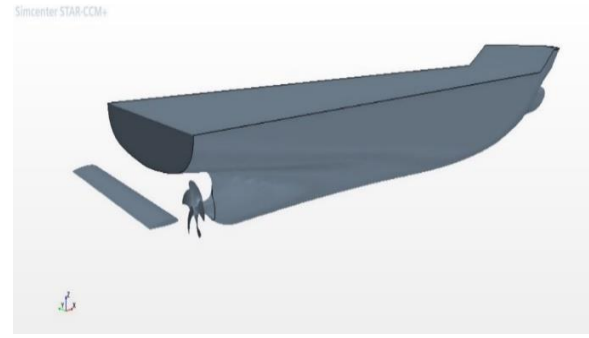
جدول ۴ ابعاد دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

مرزها	موقعیت	شرط مرزی
Inlet	1.5L From FP	Velocity Inlet
Outlet	2.5L From AP	Pressure Outlet
Sides	2.5L From CL	Velocity Inlet
Bottom	2.5L From Free Surface	Velocity Inlet
Top	1.5L From Free Surface	Velocity Inlet
Interface	1.15D (Propeller Diameter)	Internal Interface

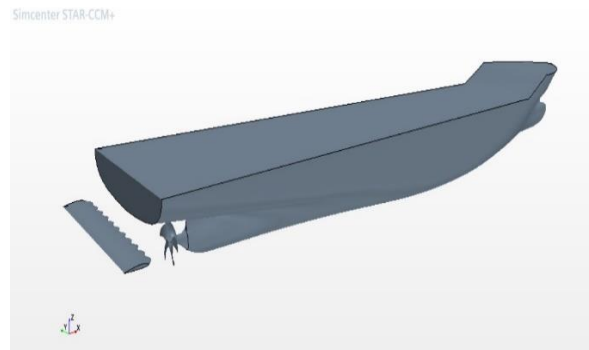
دامنه حل و شرایط مرزی در جدول (۴) نشان داده شده است. علاوه بر این بر روی بدنه شناور شرط عدم لغزش و شرط عدم نفوذ حاکم است. بنا به شرط عدم لغزش، سرعت جریان برابر سرعت بدنه شناور خواهد بود و یا به عبارت دیگر سرعت نسبی بدنه و سیال صفر خواهد بود. پس اگر  $V$  سرعت در هر یک از جهات  $x, y, z$ ، در نظر گرفته شود در این صورت  $V_{wall} = 0$  خواهد بود. در شرط مرزی ورودی تمامی سرعت‌ها در جهات  $x, y, z$  ثابت در نظر گرفته شده و همچنین گرادیان فشار برابر صفر است  $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ . همچنین در شرط مرزی خروجی نیز معادلات به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \\ \frac{\partial^2 V}{\partial n^2} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

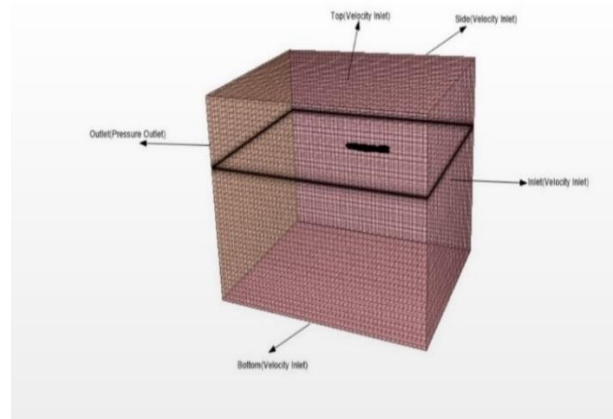
که در آن  $p$  فشار و  $V$  سرعت در جهات  $x, y, z$  است. به منظور شبکه‌بندی از شبکه‌های چهارگوشه (شش‌وجهی) به منظور تولید شبکه با کیفیت بسیار بالا که مناسب برای مسائل پیچیده چند فازی به‌ویژه زمانی که سطح آزاد آب وجود دارد همراه با یکسری اصلاحیه‌ها در اندازه شبکه و لایه‌های مرزی در طول دیواره بدنه شناور استفاده گردید. همچنین برای ناحیه دوار، حول پروانه از شبکه چندوجهی استفاده شد. فرایند تولید



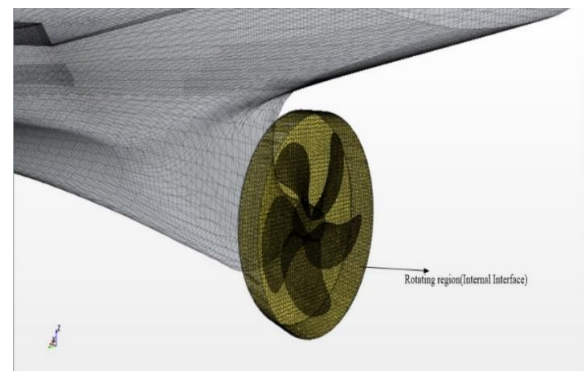
شکل ۸ هندسه تیغه بدنه بدون برآمدگی لبه حمله



شکل ۹ هندسه تیغه بدنه با برآمدگی لبه حمله

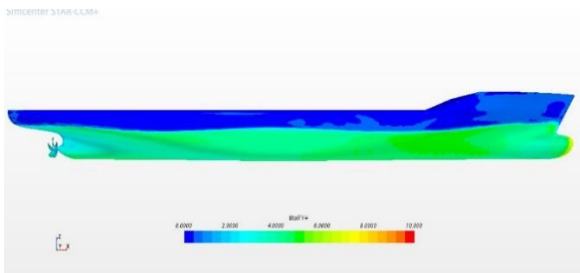
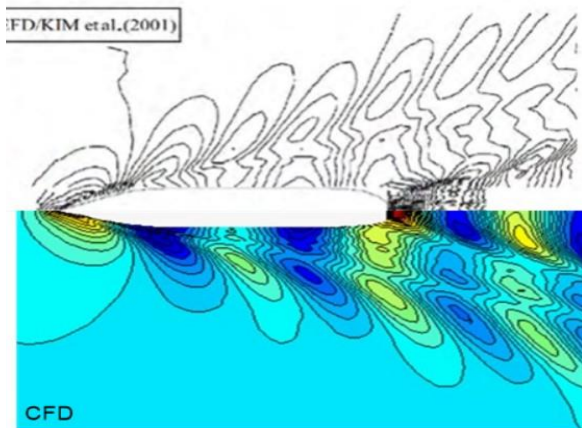


شکل ۱۰ دامنه محاسباتی برای شبیه‌سازی خودرانش



شکل ۱۱ ناحیه دوار حول پروانه

<sup>1</sup> Trimmed mesh

شکل ۱۴ توزیع  $Y^+$  بر روی بدنه و پروانه

شکل ۱۵ مقایسه بین الگوی موج کلویین شناور به صورت عددی و تجربی

### ۲-۳- روش مدل سازی خودرانش و انتخاب گام زمانی

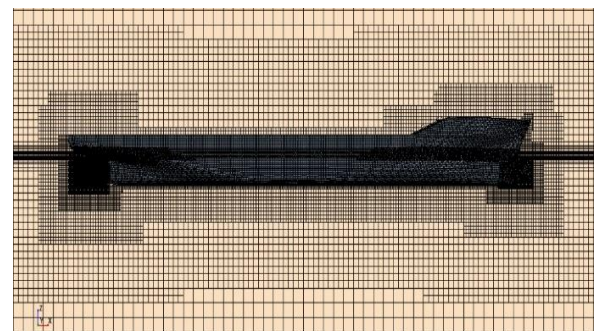
برای پیدا کردن نقطه خودرانش دو راه وجود دارد. یکی از این راه‌ها شبیه‌سازی به صورت تست تجربی است. تست تجربی که برای تست خودرانش شناور KCS انجام پذیرفته، بدین شکل است که شناور در حوضچه کشش با استفاده از ارابه کشش، کشیده شده و پروانه نیز با دور ثابت ۹/۵ دور بر ثانیه دوران می‌کند؛ این در حالی است که ارابه شناور را با عدد فرود ۰/۲۶ می‌کشد. این کار برای تعادل بین نیروها انجام می‌پذیرد. در این روش یک نیروی اضافی با عنوان اصلاح اصطکاک پوسته‌ای<sup>۳</sup> به وجود می‌آید که باید در نظر گرفته شود. اصلاح اصطکاک پوسته‌ای به منظور اصلاح عدم برابر بودن عدد رینولدز در مقیاس مدل و شناور با ابعاد اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادله زیر نشان‌دهنده تعادل نیروهاست [۲۰]:

$$SFC = R_T - T \quad (11)$$

در معادله فوق  $R_T$  نیروی مقاومت کل بدنه و  $T$  نیروی تراست تولیدشده توسط پروانه است. اما راه دیگری که برای یافتن نقطه

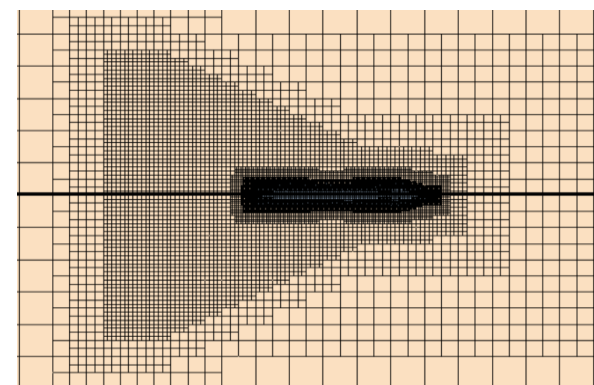
شبکه با تعیین یک اندازه پایه<sup>۱</sup> صورت می‌گیرد و نسبت به آن همه‌ی فاصله‌ها شامل: ضخامت لایه مرزی، اندازه‌ی سلول در نواحی مورد نظر و... تعیین می‌شود [۱۹]. همچنین برای جلوگیری از افزایش تعداد سل‌ها در نواحی که به آن‌ها نیازی نیست، در نواحی مانند سینه، پاشنه و اطراف بدنه شناور مش ریزتری استفاده شده است.

علاوه بر این برای مدل‌سازی پروانه شناور از شبکه لغزان<sup>۲</sup> استفاده شده است (شکل ۱۱). به منظور تنظیم این شبکه ابتدا شناور و دیسک حول پروانه از کل دامنه حل کم شده و با یک ناحیه به شکل دیسک که پروانه از آن کم شده است، در تبادل اطلاعات است.



شکل ۱۲ توزیع مش حول بدنه برای شبیه‌سازی خودرانش

برای بهتر مدل کردن موج کلویین ایجادشده ناشی از حرکت شناور، شبکه در این نواحی ریزتر شده است که در شکل (۱۳) می‌توان آن را مشاهده کرد.



شکل ۱۳ شبکه ریز شده برای مدل کردن موج کلویین

همچنین با توجه به اینکه مدل آشفتگی  $k-\omega$  برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است، فاصله بدون بعد اولین سلول محاسباتی از دیواره به صورت شکل (۱۴) خواهد شد. علاوه بر این شکل (۱۵) نشان‌دهنده الگوی موج کلویین تولیدشده توسط شناور است.

<sup>3</sup> Skin Friction Correction (SFC)

<sup>1</sup> Base size

<sup>2</sup> Sliding Mesh



برای انتخاب گام زمانی چون از حل ضمنی نا پایا استفاده شده است، از پیشنهادهای ITTC استفاده شده است. بدین منظور برای بدنه، گام زمانی برابر ۰/۰۱۵ و برای پروانه نیز طبق پیشنهاد ITTC در یک گام زمانی، پروانه باید در بازه ۰/۵ تا ۲ درجه بچرخد، بدین علت گام زمانی پروانه برابر ۰/۰۰۲ در نظر گرفته شده است.

### ۳- صحت‌سنجی و اعتبارسنجی

$$\delta_G = C_G \frac{\varepsilon_{G21}}{r_G^{PG} - 1} \quad (15)$$

$$U_{GC} = \begin{cases} 2.4(1 - C_G)^2 + 0.1 & |\delta_{REG}^*| |1 - C_G| < 0.125 \\ |1 - C_G| |\delta_{REG}^*| & |1 - C_G| \geq 0.125 \end{cases} \quad (16)$$

اگر  $C_G$ ، به اندازه کافی کم‌تر یا بیش‌تر ۱ باشد، فقط عدم قطعیت عددی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$U_{GC} = \begin{cases} 9.6(1 - C_G)^2 + 1.1 & |\delta_{REG}^*| |1 - C_G| < 0.125 \\ (2|1 - C_G| + 1) |\delta_{REG}^*| & |1 - C_G| \geq 0.125 \end{cases} \quad (17)$$

همانطور که اشاره شد سه شبکه با ابعاد  $g_1$ ،  $g_2$  و  $g_3$ ، به منظور صحت‌سنجی شبکه اتخاذ شده است. شبکه برای سه حالت ذکر شده فقط در سایز پایه باهم متفاوت‌اند. که  $g_1$ ، شبکه ریز (۷،۰۱۲،۰۱۹)،  $g_2$ ، شبکه متوسط (۳،۷۰۸،۲۶۹) و  $g_3$ ، شبکه درشت (۱،۵۴۶،۱۸۱) است.

جدول ۵ پارامترهای خودرانش برای صحت‌سنجی شبکه

	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$R_G$	$P_G$	$C_G$	$\delta_G^*$	$U_{GC}$	$S_C$	$U_G$
$C_T$	۰/۰۰۳۸۱	۰/۰۰۳۷۸	۰/۰۰۳۶۹	۰/۳۵۶	۲/۹۸	۱/۸	۰/۰۱۷	۰/۰۴۴۲	۰/۰۰۳۸	-
$K_T$	۰/۱۵۸۲	۰/۱۵۴۸	۰/۱۴۶۲	۰/۳۹۵	۲/۶۸	۱/۵۲۲	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۶۸	۰/۱۵۸۲	-
$K_Q$	۰/۰۲۶۴	۰/۰۲۷۲	۰/۰۲۴۳	-۰/۲۸	-	-	-	-	-	۰/۰۰۲۹

جدول (۵) نشان‌دهنده پارامترهای صحت‌سنجی شبکه برای خودرانش است.

مراحل صحت‌سنجی و اعتبارسنجی به منظور افزایش دقت در نتایج حل عددی، توسط ITTC پیشنهاد شده است [۲۱] که شامل طبقه‌بندی خطاها و عدم قطعیت‌های بوجود آمده از مدل و حل عددی، بر اساس فرآیند پیشنهادی در مطالعات قبلی

خودرانش استفاده می‌شود استفاده از کنترلر است. یک کنترلر سرعت دورانی پروانه برای به حداقل رساندن خطا در عدم تعادل سرعت‌ها یا مقاومت/رانش مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی معمولی که برای این منظور به کار می‌رود به صورت زیر پیاده‌سازی می‌شود:

$$n = Pe + I \int_0^t e dt \quad (12)$$

که در آن  $n$  سرعت دورانی پروانه برحسب دور بر ثانیه (RPS)،  $e$  خطا و  $P$  و  $I$ ، به ترتیب ثابت‌های تناسبی و انتگرالی هستند. که انتخاب خطا، به مواردی که در ادامه ذکر خواهد شد بستگی دارد.

• اگر کد، قابلیت شش درجه آزادی داشته باشد، پس خطا تفاوت بین سرعت کشتی  $V$  و سرعت هدف  $V_{target}$  است و سرعت دورانی پروانه توسط کنترلر برای رسیدن به سرعت هدف تغییر می‌کند [۲۱].

$$e = V_{target} - V \quad (13)$$

• اگر کد دینامیک سیالات محاسباتی دارای قابلیت شش درجه آزادی نباشد، یک کنترل‌کننده می‌تواند با استفاده از عدم تعادل در مقاومت  $F_x$  و نیروی رانش  $T$  برای تعریف خطا به صورت زیر اعمال شود [۲۱]:

$$e = F_x - T \quad (14)$$

از این‌رو در پژوهش حاضر از روش اول استفاده خواهد شد. برای حل سریع‌تر، مسئله به دو بخش تقسیم می‌شود. در ابتدای حل به اندازه ۲۰ ثانیه، با گام زمانی بدنه برای به دست آوردن مقاومت و سطح خیس، حل جلو رفته و سپس برای ادامه تا ۲۴ ثانیه، با گام زمانی پروانه، حل می‌گردد.

<sup>1</sup> Proportional-integral controller (PI)

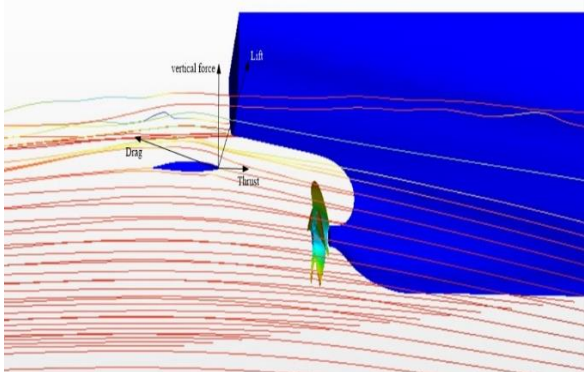
#### ۴- نتایج

پس از صحت سنجی نتایج عددی، تأثیر تیغه بدنه با و بدون برآمدگی لبه حمله بر مقاومت و ضرایب پروانه مورد بررسی قرار گرفت. جدول (۷) مقایسه بین نتایج بدون تیغه بدنه و با تیغه بدنه با و بدون توپرکل در لبه حمله را نشان می‌دهد.

جدول ۷ مقایسه بین شناور بدون تیغه بدنه و با تیغه بدنه با و بدون توپرکل لبه حمله

نتایج	ضریب مقاومت کل ( $\times 10^3$ )	ضریب تراست ( $K_T$ )	ضریب گشتاور ( $K_Q$ )
بدون تیغه بدنه	۳/۷۸۱	۰/۱۵۴۸	۰/۰۲۶۲
با تیغه بدنه معمولی	۳/۷۱۴	۰/۱۵۰۸	۰/۰۲۵۹
با تیغه بدنه دارای توپرکل در لبه حمله	۳/۷۱۱	۰/۱۴۹۴	۰/۰۲۵۶۹

با توجه به نتایجی که در جدول (۷) آمده است، برای حالتی که شناور دارای تیغه بدنه با لبه حمله صاف است نسبت به حالت بدون تیغه بدنه، ضریب مقاومت کل ۱/۷۷ درصد، ضریب تراست پروانه ۲/۸۵۳ درصد و ضریب گشتاور پروانه ۱/۱۴ درصد کاهش یافته است. همچنین برای حالتی که بدنه شناور مجهز به تیغه بدنه با لبه حمله دارای برآمدگی است نسبت به حالتی که شناور مجهز به تیغه بدنه نیست، ضریب مقاومت کل ۱/۸۵ درصد، ضریب تراست پروانه ۳/۴۸۸ درصد و ضریب گشتاور پروانه ۱/۹۴ درصد کاهش یافته است.



شکل ۱۶ جریان سیال در پاشنه شناور KCS با حضور تیغه بدنه با لبه حمله دارای برآمدگی و نیروهای ایجاد شده توسط تیغه بدنه

انجام شده است [۲۲] از این رو به منظور صحت‌سنجی نتایج حلگر عددی، سه شبکه مختلف با نرخ اصلاح شبکه  $r = \sqrt{2}$  در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، پارامترهایی که برای صحت‌سنجی مورد نیاز هستند، عبارتند از:  $R_G$ ، که نشان‌دهنده نرخ همگرایی،  $P_G$ ، نشان‌دهنده بزرگی دقت،  $C_G$ ، نشان‌دهنده فاکتور اصلاح ۳ و  $\delta_G^*$ ، نیز بیان‌کننده خطای شبکه ۴ است، و به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۲]:

$$R_G = \varepsilon_{G_{21}} / \varepsilon_{G_{32}}; \varepsilon_{G_{ij}} = S_{Gi} - S_{Gj} \quad (18)$$

$$P_G = \frac{\ln(\varepsilon_{G_{32}} / \varepsilon_{G_{21}})}{\ln(r_G)} \quad (19)$$

$$C_G = \frac{r_G^{P_G} - 1}{r_G^{P_{Gest}} - 1} \quad (20)$$

$$\delta_G^* = \frac{\varepsilon_{G_{21}}}{r_G^{P_G} - 1} \quad (21)$$

که در آن  $P_{Gest}$  تخمینی برای محدود کردن بزرگی دقت است، و مقدار پیشنهادی آن برابر ۲ است. برای همگرایی نوسانی ( $R_G < 0$ )، عدم قطعیت به این صورت تخمین زده می‌شود:

$$U_G = 1/2(S_U - S_L) \quad (22)$$

که در آن  $S_U$  و  $S_L$ ، ماکسیمم و مینیمم نوسان حل‌ها است. برای همگرایی مونوتونیک<sup>۵</sup> که در آن ( $0 < R_G < 1$ )، تخمین عدم قطعیت، به دامنه  $C_G$ ، وابسته است و به این صورت محاسبه می‌شود که: اگر  $C_G \approx 1$ ، خطای عددی  $\delta_G^*$  و عدم قطعیت  $U_{GC}$ ، به صورت زیر قابل تعریف است:

جدول ۶ مقایسه بین نتایج پژوهش حاضر و نتایج تجربی

نتایج تجربی [۲۰]	ضریب مقاومت کل ( $\times 10^3$ )	ضریب تراست ( $K_T$ )	ضریب گشتاور ( $K_Q$ )	SFC
نتایج تجربی [۲۰]	۳/۹۶۶	۰/۱۷	۰/۰۲۸۸	۳۰/۲۵
پژوهش حاضر	۳/۷۸۱	۰/۱۵۴۸	۰/۰۲۶۲	۳۱/۴۲
درصد اختلاف	٪۴/۶۶۴	٪۸/۹۴	٪۹/۰۲	٪۳/۸۶۷

<sup>4</sup> grid error

<sup>5</sup> monotonic

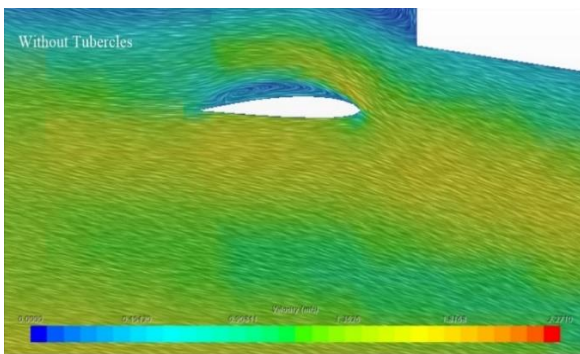
<sup>1</sup> Convergence ratio

<sup>2</sup> order of accuracy

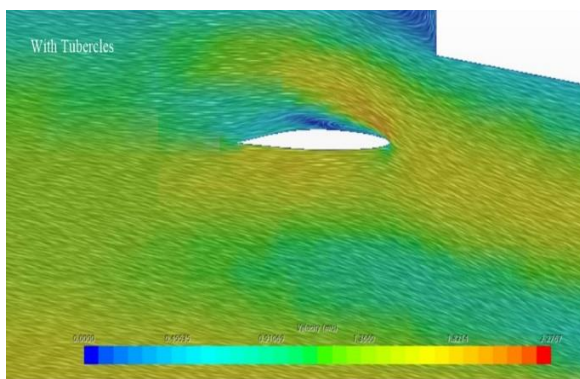
<sup>3</sup> correction factor

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد یکی از دلایل کاهش مقاومت بدنه در حضور تیغه بدنه، کاهش موج پاشنه با ایجاد یک فشار منفی در زیر سطح آب می‌باشد. شکل‌های (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) نیز به ترتیب مقایسه‌ای بین شناور بدون تیغه بدنه و شناور با تیغه بدنه معمولی، شناور بدون تیغه بدنه با شناور با تیغه بدنه دارای برآمدگی در لبه حمله و مقایسه بین شناور مجهز به تیغه بدنه با و بدون برآمدگی لبه حمله را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های فوق نیز مشاهده می‌شود، وجود تیغه بدنه سبب کاهش موج پاشنه و در نتیجه کاهش مقاومت می‌شود. از طرفی مقایسه شناور دارای تیغه بدنه با و بدون توبرکل، اختلاف زیادی را در موج پاشنه نشان نمی‌دهد، اما به دلیل ایجاد تأخیر در جدایش جریان برای تیغه بدنه دارای توبرکل مقاومت کل و در نتیجه تراست و گشتاور لازم نیز کاهش می‌یابد.

شکل‌های (۲۰) و (۲۱) بردارهای سرعت را به ترتیب بر روی تیغه بدنه با و بدون توبرکل در پاشنه شناور را نشان می‌دهد.



شکل ۲۰ بردارهای سرعت برای تیغه بدنه بدون توبرکل

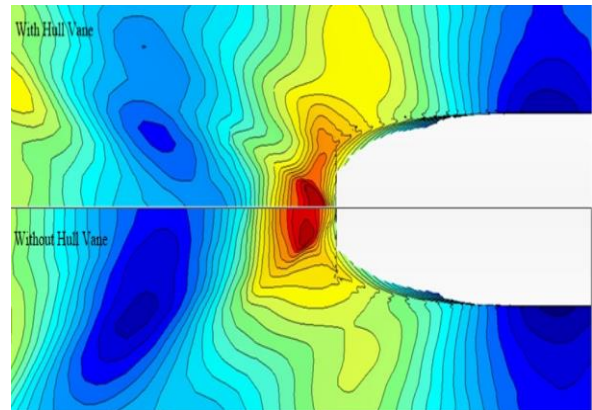


شکل ۲۱ بردارهای سرعت برای تیغه بدنه دارای توبرکل

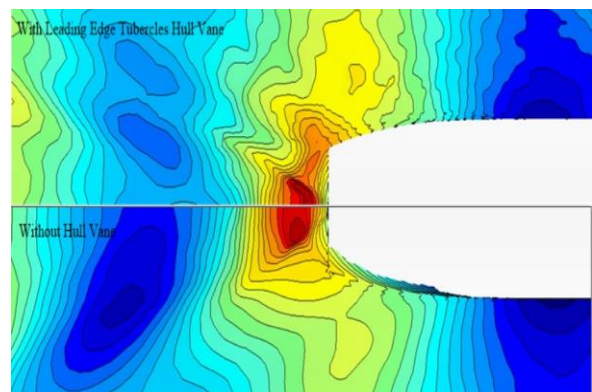
همان‌طور که از شکل‌های (۲۰) و (۲۱) برمی‌آید، حضور توبرکل در لبه حمله سبب به تأخیر افتادن جدایش جریان به علت افزایش ممنوم جریان شده است، که این امر موجب افزایش لیفت، کاهش فشار زیر سطح آب و کاهش مقاومت

در نتیجه بررسی صورت گرفته نشان می‌دهد که تیغه بدنه دارای برآمدگی در لبه حمله نسبت به تیغه بدنه با لبه حمله صاف، تأثیر مناسب‌تری را بر روی مقاومت و ضرایب پروانه شناور بر جای می‌گذارد.

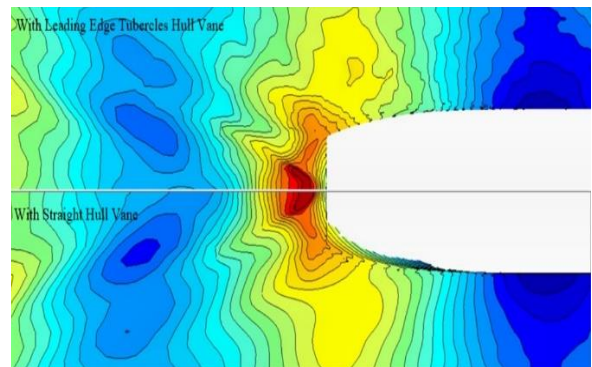
همان‌طور که در فصل اول و دوم نیز اشاره شد علت عملکرد مؤثر تیغه بدنه در پاشنه شناور، جهت حرکت جریان سیال در این ناحیه است که در شکل (۱۶) این امر در شبیه‌سازی صورت گرفته نشان‌دهنده شده است.



شکل ۱۷ مقایسه موج پاشنه برای شناور با و بدون تیغه بدنه



شکل ۱۸ مقایسه موج پاشنه برای شناور با و بدون تیغه بدنه با لبه حمله دارای برآمدگی



شکل ۱۹ مقایسه موج پاشنه برای شناور مجهز به تیغه بدنه با و بدون توبرکل لبه حمله

جدول ۸ توان مصرفی برای شناور بدون تیغه بدنه، با تیغه بدنه معمولی و با تیغه بدنه دارای توپرکل

توان مصرفی (وات)	حالت‌های مختلف
۲۱/۸۵	بدون تیغه بدنه
۲۱/۶۶	با تیغه بدنه معمولی
۲۱/۴۸۹	با تیغه بدنه دارای توپرکل در لبه حمله

همان‌طور که در جدول (۸) آمده است توان مصرفی برای حالتی که کشتی دارای تیغه بدنه با برآمدگی در لبه حمله است نسبت به حالتی که دارای تیغه بدنه معمولی است ۰/۷۸۹٪ کاهش یافته است.

### ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج ارائه‌شده در بخش قبل، تیغه بدنه به‌خودی‌خود می‌تواند تأثیر مناسبی را بر روی مقاومت و بازدهی پروانه بگذارد. با این وجود اضافه کردن توپرکل به لبه حمله آن، این نتایج را بهبود می‌بخشد. البته این نتایج به پارامترهای دیگری از جمله موقعیت تیغه بدنه در پاشنه شناور، زاویه حمله، شکل توپرکل‌ها، تعداد، دامنه و طول موج توپرکل‌ها بستگی دارد. در نتیجه برای به دست آوردن نتایج بهتر پارامترهای ذکر شده باید بهینه شوند. علت بهبود نتایج پس از قرارگیری توپرکل بر لبه حمله تیغه بدنه همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد به تأخیر افتادن جدایش جریان به علت تولید گردابه و افزایش ممنوم جریان به وسیله توپرکل‌ها می‌باشد. تأخیر در جدایش جریان سبب افزایش نسبت لیفت به درگ می‌شود که این امر موجب افزایش نیروی تراست اضافی توسط تیغه بدنه می‌شود، از طرفی با ایجاد ناحیه‌ای با فشار کم‌تر در قسمت بالایی تیغه بدنه، موج پاشنه کاهش می‌یابد و در نهایت مقاومت موج‌سازی نیز کاهش خواهد یافت. یکی دیگر از تأثیراتی که تأخیر در جدایش به همراه دارد، کاهش مقاومت ویسکوز فشاری است که به صورت اختلاف فشار سینه و پاشنه شناور تعریف می‌شود. با تأخیر در جدایش جریان، فشار لبه فرار نسبت به حالتی که توپرکل‌ها حضور ندارند بیشتر شده و اختلاف فشار سینه و پاشنه نیز کاهش می‌یابد. که این به معنای کاهش مقاومت ویسکوز فشاری است.

نتایج پژوهش حاضر حاکی از بهبود عملکرد تیغه بدنه در حضور توپرکل هست که نتایج آن بر ضریب مقاومت کل، ضریب تراست و ضریب گشتاور پروانه در بخش قبل مورد بحث قرار

موج‌سازی می‌شود و همچنین به علت افزایش فشار در ناحیه لبه فرار به سبب کاهش سرعت، باعث کاهش مقاومت ویسکوز فشاری شده است.

همچنین، توان مؤثر، نیروی لازم جهت حرکت روبه‌جلوی کشتی با سرعت ثابت است. بنابراین به‌صورت تابعی از سرعت و مقاومت کل بیان می‌شود. از توان مؤثر می‌توان به‌منظور مؤلفه‌ای جهت محاسبه مصرف سوخت شناور استفاده کرد. از طرفی مصرف سوخت به عواملی همچون بار موتور، مصرف سوخت مخصوص، سرعت پروانه و بسیاری از دیگر موارد مرتبط با شرایط عملیاتی کشتی و ... بستگی دارد، امکان محاسبه مستقیم آن وجود ندارد، با این حال می‌توان درصد کاهش توان ناشی از کاهش ضریب مقاومت کل با حضور تیغه بدنه با و بدون لبه حمله دارای برآمدگی، نسبت به شناور بدون تیغه بدنه از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\%Decrease P_E = \frac{C_{T,WOHV} - C_{T,HWOT}}{C_{T,WOHV}} \times 100 \quad (23)$$

$$\%Decrease P_E = \frac{C_{T,WOHV} - C_{T,HWT}}{C_{T,WOHV}} \times 100 \quad (24)$$

در معادلات فوق،  $C_{T,WOHV}$  ضریب مقاومت کل شناور بدون حضور تیغه بدنه،  $C_{T,HWOT}$  ضریب مقاومت کل شناور با حضور تیغه بدنه بدون توپرکل و  $C_{T,HWT}$  ضریب مقاومت کل شناور با حضور تیغه بدنه با وجود توپرکل و  $P_E$  توان مؤثر می‌باشد.

با فرض ثابت بودن راندمان و مصرف سوخت مخصوص کشتی، معادلات (۲۲) و (۲۳) نشان‌دهنده درصد کاهش مصرف سوخت کشتی و انتشار گاز کربن‌دی‌اکسیدی است. از این رو زمانی که شناور مجهز به تیغه بدنه بدون توپرکل است، مصرف سوخت ۱/۷۷٪ و برای تیغه بدنه با توپرکل ۱/۸۵٪ کاهش می‌یابد.

علاوه بر این توان مصرفی (توان تحویل داده‌شده به پروانه) که برابر حاصل ضرب گشتاور در سرعت زاویه‌ای است، برای حالت‌های مختلف مورد بررسی، در جدول (۸) آمده است.

$$P_D = \omega Q \quad (25)$$

در معادله فوق  $P_D$  توان تحویلی به پروانه،  $\omega$  دور پروانه و  $Q$  گشتاور پروانه است.

<sup>2</sup> SFOC: Specific Fuel Oil Consumption

<sup>1</sup> Engine Load

- in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 649, no. 1: IOP Publishing, p. 012051, DOI: 10.1088/1755-1315/649/1/012051.
- [8] F. E. Fish, L. E. Howle, and M. M. Murray, "Hydrodynamic flow control in marine mammals," *Integrative and comparative biology*, vol. 48, no. 6, pp. 788-800, 2008, <https://doi.org/10.1093/icb/icn029>.
- [9] J. Hain, G. Carter, S. Kraus, C. Mayo, and H. Winn, "Megaptera Novaeangliae, in the Western North Atlantic," *Fish Bull*, vol. 80, p. 259, 1982 <https://books.google.com/books>.
- [10] F. E. Fish, P. W. Weber, M. M. Murray, and L. E. Howle, "The tubercles on humpback whales' flippers: application of bio-inspired technology," ed: Oxford University Press, 2011, <https://doi.org/10.1093/icb/icr016>.
- [11] F. E. Fish and J. M. Battle, "Hydrodynamic design of the humpback whale flipper," *Journal of morphology*, vol. 225, no. 1, pp. 51-60, 1995, <https://doi.org/10.1002/jmor.1052250105>.
- [12] R. S. Shevell, "Aerodynamic anomalies-Can CFD prevent or correct them?," *Journal of Aircraft*, vol. 23, no. 8, pp. 641-649, 1986, <https://doi.org/10.2514/3.45356>.
- [13] P. Watts and F. E. Fish, "The influence of passive, leading edge tubercles on wing performance," in *Proc. Twelfth Intl. Symp. Unmanned Untethered Submers. Technol*, 2001: Auton. Undersea Syst. Inst. Durham New Hampshire. <http://www.appliedfluids.com/UUST01.pdf>.
- [14] E. G. Paterson, R. V. Wilson, and F. Stern, "General-purpose parallel unsteady RANS ship hydrodynamics code: CFDSHIP-IOWA," *IIHR report*, vol. 432, 2003, <https://doi.org/10.5957/FAST-2015-012>.
- [15] F. Fish and G. V. Lauder, "Passive and active flow control by swimming fishes and mammals," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 38, pp. 193-224, 2006, <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092201>.
- [16] F. E. Fish, "Biomimetics and the application of the leading-edge tubercles of the humpback whale flipper," *Flow control through bio-inspired leading-edge tubercles: morphology, aerodynamics, hydrodynamics and applications*, pp. 1-39, 2020, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-23792-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23792-9_1).
- [17] D. Miklosovic, M. Murray, L. Howle, and F. Fish, "Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale (Megaptera novaeangliae) گرفت. برای حالتی که شناور دارای تیغه بدنه با لبه حمله صاف است نسبت به حالت بدون تیغه بدنه، ضریب مقاومت کل ۱/۷۷ درصد، ضریب تراست پروانه ۲/۸۵۳ درصد و ضریب گشتاور پروانه ۱/۱۴ درصد، کاهش یافته است. همچنین برای حالتی که بدنه شناور مجهز به تیغه بدنه با لبه حمله دارای برآمدگی است، نسبت به حالتی که شناور مجهز به تیغه بدنه نیست، ضریب مقاومت کل ۱/۸۵ درصد، ضریب تراست پروانه ۳/۴۸۸ درصد و ضریب گشتاور پروانه ۱/۹۴ درصد کاهش یافته است.
- ### ۶- مراجع
- [1] B. Bouckaert, K. Uithof, N. Moerke, and P. Van Oossanen, "Hull Vane on 108m Holland-Class OPVs: Effects on Fuel Consumption and Seakeeping," in *Proceeding of MAST Conference*, 2015. <https://www.hullvane.com/wp-content/uploads/2017/01/MAST-2016-Paper-Hull-Vane-on-108-m-Holland-Class-OPV-effects-on-fuel-consumption-and-seakeeping-1.pdf>.
- [2] I. Andrews, V. K. Avala, P. K. Sahoo, and S. Ramakrishnan, "Resistance characteristics for high-speed hull forms with vanes," in *SNAME International Conference on Fast Sea Transportation*, 2015: SNAME, p. D011S003R001, <https://doi.org/10.5957/FAST-2015-012>.
- [3] H. Hou, M. Krajewski, Y. K. Ilter, S. Day, M. Atlar, and W. Shi, "An experimental investigation of the impact of retrofitting an underwater stern foil on the resistance and motion," *Ocean Engineering*, vol. 205, p. 107290, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107290>.
- [4] K. Suastika, A. Hidayat, and S. Riyadi, "Effects of the application of a stern foil on ship resistance: A case study of an Orela crew boat," *International Journal of Technology*, vol. 8, no. 7, pp. 1266-1275, 2017, <https://doi.org/10.14716/ijtech.v8i7.691>.
- [5] V. K. Avala, "CFD Analysis of Resistance Characteristics of High-Speed Displacement Hull Forms fitted with Hull Vane®," 2017. <https://repository.fit.edu/etd/1127/>.
- [6] M. A. Budiyanto, M. A. Murdianto, and M. F. Syahrudin, "Study on the resistance reduction on high-speed vessel by application of stern foil using cfd simulation," *CFD Letters*, vol. 12, no. 4, pp. 35-42, 2020. <https://scholar.ui.ac.id/en/publications/study-on-the-resistance-reduction-on-high-speed-vessel-by-applica>.
- [7] U. Budiarto and A. Firdhaus, "Analysis of the effect of hull vane on ship resistance using CFD methods,"

- flippers," *Physics of fluids*, vol. 16, no. 5, pp. L39-L42, 2004, <https://doi.org/10.1063/1.1688341>.
- [18] F. Fish, "The humpback whale flipper for application of bio-inspired tubercle technology," in *INTEGRATIVE AND COMPARATIVE BIOLOGY*, 2011, vol. 51: OXFORD UNIV PRESS INC JOURNALS DEPT, 2001 EVANS RD, CARY, NC 27513 USA, pp. E42-E42, <https://doi.org/10.1093/icb/icr016>.
- [19] J. Kim, "Experimental Data for KCS Resistance, Sinkage, Trim, and Self-propulsion," in *Numerical Ship Hydrodynamics: An Assessment of the Tokyo 2015 Workshop*, 2021: Springer, pp. 53-59, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-47572-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-47572-7_3).
- [20] I. R. Procedures, "Uncertainty analysis in CFD verification and validation, methodology and procedures," *ITTC Recommended Procedures and Guidelines*, pp. 7.5-03, 2017. <https://www.itc.info/media/8153/75-03-01-01.pdf>.
- [21] F. Stern, R. V. Wilson, H. W. Coleman, and E. G. Paterson, "Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations—part 1: methodology and procedures," *J. Fluids Eng.*, vol. 123, no. 4, pp. 793-802, 2001, <https://doi.org/10.1115/1.1412235>.
- [22] A. Hasanvand, A. Hajivand, and N. A. Ali, "Investigating the effect of rudder profile on 6DOF ship course-changing performance," *Applied Ocean Research*, vol. 117, p. 102944, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102944>.