

شبیه‌سازی عددی اثرات متقابل بدنه و پروانه در مانور شتابگیری

حمیدرضا محمودی^{۱*}، محمد سعید سیف^۲^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، (h.9470126@gmail.com)^۲ استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، (Seif@sharif.edu)

اطلاعات مقاله

ناریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵

کلمات کلیدی:

مانور شتابگیری

خودرانش

دینامیک سیالات محاسباتی

پروانه

چکیده

پیش‌بینی مسیر کشتی در طی حرکت مانور بسیار مهم است. در این مطالعه، مانور شتابگیری برای یک کشتی دو پروانه با استفاده از محیط دینامیک سیالات محاسباتی و حلگر ناپایدار متوسط زمانی ناویر استوکس به صورت مستقیم بررسی شده است. برای این هدف شبیه‌سازی‌های خودرانش و شتابگیری با تداخل بین بدنه و پروانه برای شناور شناخته‌شده ONRT مورد بررسی قرار گرفت. تمام شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار Star-CCM+ در دو عدد فرود یعنی (۰.۲ و ۰.۳) انجام شد. حرکت چرخشی پروانه با استفاده از تکنیک مش لغزشی شبیه‌سازی شد. علاوه بر این، تایید و اعتبارسنجی عددی بر اساس توصیه‌های پیشنهادی ITTC انجام می‌شود. اعتبارسنجی نتایج تست خودرانش با داده‌های آزمایشگاهی موجود، تطابق بسیار خوبی را بین آن‌ها نشان می‌دهد. همچنین، تغییرات الگوی موج، میدان جریان و یک در طی مانور شتابگیری مورد بررسی قرار گرفت.

Numerical simulation of mutual effects of hull and propeller in acceleration maneuver

Hamidreza Mahmoodi^{1*}, Mohammad Saeed Seif²¹ MSC, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran; (h.9470126@gmail.com)² Professor, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran; (Seif@sharif.edu)

ARTICLE INFO

Article History:

Received 21 Jan 2022

Accepted 07 Mar 2023

Available online 5 May 2023

Keywords:

Acceleration Maneuver

Self-Propulsion

CFD

Propeller

ABSTRACT

Prediction of a ship's trajectory during a maneuvering motion is so important. In this study, the acceleration maneuver for a twin-screw vessel is directly investigated using computational fluid dynamic (CFD) environment and unsteady RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) solver. For this purpose, the self-propulsion and acceleration simulations with hull and propeller interaction for the well-known ONRT vessel were investigated. All simulations were performed by using Star-CCM+ software at two Froude numbers i.e. (0.2 and 0.3). The propeller rotational motion has been simulated using sliding mesh technique. Besides, numerical verification and validation are performed based on the procedures proposed by the ITTC. The validation of the self-propulsion results with the available experimental data shows a very good agreement among them. Also, changes in wave pattern, wake flow field during the acceleration maneuver were investigated.

۱ - مقدمه

و سیستم رانش کارآمدتر طراحی کنند، به ویژه با اهداف اخیر کاهش گازهای گلخانه‌ای در جهان باید مجدداً توجه بیشتری به تداخل مستقیم بین کشتی و پروانه صورت گیرد [۲۱]. به منظور مدل‌سازی مانور شتابگیری کشتی، در نظر گرفتن تداخل بین بدنه کشتی و پروانه از اهمیت بالایی برخوردار است. به طور کلی شتابگیری کشتی، یک نوع از مانور کشتی‌ها است که در این مانور

پیش‌بینی مانور شتابگیری کشتی، چه برای کشتی‌های با سرعت پایین و یا سرعت بالا بسیار حائز اهمیت است، که این مانور می‌تواند درک بهتر و درستی از رفتار کشتی در آزمایش‌های دریایی به ما بدهد. علاوه بر این مطالعه بر روی چنین مسائلی مهندسان را قادر می‌سازد تا کشتی‌هایی با کمترین انتشار گازهای گلخانه‌ای

در سال‌های اخیر دینامیک سیالات محاسباتی^۱ به عنوان یک روش مفید و قدرتمند برای پیش‌بینی مسائل مربوط به مانور کشتی پدیدار شده‌است. تعداد کارگاه‌های دینامیک سیالات محاسباتی شروع به افزایش کرده‌است و محتوای آن‌ها نیز به تدریج کاربردی شده‌است [۱۶-۱۴]. با استفاده از محیط دینامیک سیالات محاسباتی و استفاده از معادلات حرکت کشتی می‌توان یک تخمین دقیق و همچنین سریع از رفتار کشتی در مانور به دست آورد.

جاسک و همکاران [۱۷] یک مقایسه بین نتایج حاصل از تست-های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از حل عددی برای دو کشتی مختلف با مقیاس کامل در تست شتابگیری انجام دادند. دو کشتی را برای حل عددی انتخاب کردند که شامل یک کشتی حمل کالای عمومی در عدد فرود ۰.۱۸۲ و یک کشتی حمل خودرو در عدد فرود ۰.۲۵۴ بود. برای بررسی تست شتابگیری شناور کالای عمومی از سرعت دورانی ثابت پروانه و برای بررسی تست شتابگیری شناور حمل ماشین از یک کنترلر انتگرالی استفاده کردند. برای شبیه‌سازی اثر پروانه از یک دیسک مجازی محرک استفاده کردند. نویسندگان از مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی برای هر دو کشتی درصد خطای ۰.۳ درصد را نشان دادند، با این حال آن‌ها از بحث در مورد اثر پروانه واقعی در مانور شتابگیری غفلت کردند.

در یکی از جدیدترین تحقیقات انجام شده در زمینه مانور شتابگیری و توقف کشتی، دومان و بال [۱۸] مانورهای شتابگیری و توقف را برای یک شناور نظامی با استفاده از روش‌های تحلیلی پیش‌بینی کردند. آن‌ها همچنین مانورهای شتابگیری و توقف را به صورت مستقیم با استفاده از تکنیک مش Overset و معادلات متوسط زمانی ناویر استوکس برای مقایسه با حل تحلیلی شبیه‌سازی کردند. برای این منظور آن‌ها از شناور شناخته شده DTMB 5415 برای اعتبارسنجی نتایج استفاده کردند. برای بررسی مقاومت کشتی در هر دو مانور از روش حل عددی و روش تجربی هولتروپ استفاده کردند. نویسندگان برای بررسی مانور شتابگیری و توقف، شناور را در حداکثر سرعت (۲.۲۴۲ متر بر ثانیه) مورد بررسی قرار دادند و برای شبیه‌سازی حرکت رو به جلوی شناور از یک تراست ثابت استفاده کردند. با این حال آن‌ها از بحث در مورد عدم قطعیت‌های عددی غفلت کردند.

موضوعی که در تحقیقات انجام شده توسط محققان ذکر شده در پیشینه تحقیق به صورت دقیق در تست شتابگیری مورد بررسی قرار نگرفته‌است، مدل‌سازی مستقیم پروانه در مانور شتابگیری است، یعنی اثر هندسه پروانه و تداخل آن با بدنه کشتی در حین

کشتی از حالت سکون با شتاب رو به جلو حرکت می‌کند، و در نهایت به یک حالت ثابت (تعادل دینامیکی) و سرعت ثابت که وابسته به تراست تولید شده توسط پروانه در یک سرعت دورانی ثابت است می‌رسد [۳].

پیش‌بینی مسیر حرکت یک کشتی در مانور عمدتاً بر اساس مدل-های ریاضی است که هر دو ترم دینامیکی و سینماتیکی معادلات حرکت را شامل می‌شود. این معادلات حرکت برای پیش‌بینی مانورپذیری کشتی توسط محققان توسعه داده شد [۴-۶]. این روش‌ها و روش‌های مشابه به طور کلی روش مشتقات هیدرودینامیکی نامیده می‌شوند که به روش محاسباتی اعمال شده در مسئله وابسته است. با اینکه این مدل‌ها می‌توانند مانورپذیری کشتی را در شرایط عملیاتی مختلف انجام دهند، اما ممکن است در برخی شرایط خطای زیادی داشته باشند. آنالیزهای رگرسیونی نیز یکی از متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی رفتار کشتی است. این آنالیزها را می‌توان برای مسائل مختلف هیدرودینامیک کشتی مورد استفاده قرار داد. به عنوان مثال، یک مطالعه شناخته شده رگرسیونی برای پیش‌بینی و تخمین مقاومت شناورهای جابجایی توسط Holtrop و Mannen توسعه داده شد [۷]. فرمول‌های تجربی نیز برای تعیین مشتقات هیدرودینامیکی خطی مورد استفاده در تئوری مانور با انجام تست‌های آزمایشگاهی برای تعدادی از بدنه‌های مختلف توسعه داده شد [۸-۱۱].

در یک مطالعه با فرمول‌های تجربی، توکلی و همکاران [۱۲] یک مدل ریاضی ساده برای بررسی شتابگیری کشتی در آب آرام تحت عملکرد سیستم رانش برای شناورهای جابجایی ارائه دادند. برای این منظور مدل‌های تجربی مختلفی را بررسی کردند. به منظور بررسی مقاومت کشتی و تداخل بین بدنه کشتی و پروانه از روش تجربی هولتروپ استفاده کردند، برای بررسی ضرایب هیدرودینامیکی پروانه از معادلات تجربی سری بی و گنینگین و برای بررسی فاز شتابگیری کشتی از حل معادلات دیفرانسیل مرتبه اول استفاده کردند. برای تایید و اعتبارسنجی مدل ریاضی خود از داده‌های آزمایشگاهی شناور DTMB استفاده کردند. نویسندگان تطابق خوبی را از مقایسه مقاومت شناور با نتایج آزمایشگاهی نشان دادند. با این حال شبیه‌سازی مانور شتابگیری و تست مقاومت به روش تجربی جزییات جریان سیال اطراف بدنه شناور را شامل نمی‌شود.

زراعتگر و قائمی [۱۳] مانور شتابگیری یک کشتی سری ۶۰ را با استفاده از معادلات ریاضی حرکت با استفاده از نرم‌افزار متلب و با در نظر گرفتن تداخل بین بدنه، پروانه و موتور مورد مطالعه قرار دادند.

¹ Computational Fluid Dynamic (CFD).

در این قسمت تنظیمات عددی شرح داده می‌شود. در میان شیوه‌های عددی قابل دسترس در CFD روش حجم کنترل به صرفه است. در این روش معادلات بقا در محدوده محاسباتی حل می‌شوند. در این روش محدوده محاسباتی به حجم‌های کنترل کوچک تقسیم شده که اصطلاحاً به آن‌ها سلول گویند و معادلات RANS به صورت مجزا برای هر یک از آن‌ها حل می‌شود.

محدوده محاسباتی باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا از جریان برگشتی در مرز خروجی، از واگرا شدن موج در مرز دیواره‌ها و از اثرات آب کم عمق در مرز پایینی جلوگیری کند. در شبیه‌سازی‌های خودرانش و شتابگیری، پروانه نقش اساسی را بازی می‌کند، بنابراین با وجود هزینه‌های محاسباتی بالا برای بررسی تداخل بین بدنه کشتی و پروانه و سکان، بهتر است به جای استفاده از دیسک مجازی، پروانه واقعی مدل‌سازی شود. از تکنیک مش لغزشی^۲ برای شبیه‌سازی مش دینامیکی اطراف پروانه استفاده شده است. تکنیک مش لغزشی نیازمند دو ناحیه مختلف، یعنی ناحیه ثابت^۳ و ناحیه در حال چرخش^۴ است. ناحیه در حال چرخش دارای یک سطح مشترک لغزشی با ناحیه ثابت است که در هر گام زمانی به روز رسانی می‌شود. ابعاد محدوده‌های محاسباتی با توجه با استانداردها و توصیه‌های ITTC است [۲۰]. شکل ۲ یک نمای کلی از محدوده محاسباتی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های خودرانش و مانور شتابگیری را نشان می‌دهد. محدوده محاسباتی شامل دو ناحیه است، ناحیه ثابت و ناحیه در حال چرخش، جایی که پروانه در آن قرار دارد (این ناحیه در شکل ۳ به صورت واضح نشان داده شده است). همچنین تعیین شرایط مرزی در شبیه‌سازی‌های عددی بسیار حائز اهمیت است. در شکل ۲ نوع شرایط مرزی استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده است، به علاوه در جدول ۲ ابعاد محدوده‌های محاسباتی و نوع شرایط مرزی آورده شده است. با توجه به جدول ۲ نوع شرط مرزی در ورودی دامنه حل ورودی سرعت است، شرط مرزی در خروجی دامنه فشار خروجی است که نشان‌دهنده این است که فشار خروجی به قسمت انتها محدوده محاسباتی تخلیه می‌شود.

جدول ۲- نوع شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها.

مرز	موقعیت	شرط مرزی
ورودی	۱.۵ برابر طول کشتی	ورودی سرعت
خروجی	۲.۵ برابر طول کشتی	فشار خروجی
دیواره‌ها	۲ برابر طول کشتی	ورودی سرعت
بالا	۱.۵ برابر طول کشتی	ورودی سرعت
پایین	۲.۵ برابر طول کشتی	ورودی سرعت
سطح مشترک (Interface)	۱.۲ قطر پروانه	Interface

مانور به صورت دقیق بررسی نشده است، و اکثراً برای بررسی اثر هندسه پروانه در شبیه‌سازی عددی از یک دیسک مجازی و یا تراست ثابت استفاده کرده اند و یا در شبیه‌سازی‌های انجام شده به وسیله معادلات ریاضی و حرکت از فرمول‌های تجربی پروانه و یا ضرایب بی‌بعد استفاده شده است. موضوع دیگری که در تحقیقات انجام گرفته به آن توجه نشده است، بررسی مانور شتابگیری در عدد فرودهای مختلف است و یا به نوعی تاثیر دوره‌های مختلف پروانه در این مانورها بررسی نشده است.

در این مطالعه مانور شتابگیری شناور به صورت مستقیم و با استفاده از نرم‌افزار Star-CCM+ و معادلات متوسط زمانی ناویر استوکس مدل‌سازی شده است. در ابتدا برای تایید و صحت سنجی نتایج، و همچنین یافتن سرعت دورانی پروانه تست خودرانش انجام شده است. شبیه‌سازی تست خودرانش به صورت سه درجه آزادی (سرج، هیو و پیچ) است و برای به دست آوردن سرعت دورانی پروانه واقعی در هر گام زمانی در شبیه‌سازی‌ها از یک کنترلر انتگرالی استفاده شد. در قسمت دیگر مطالعه، پس از یافتن سرعت دورانی پروانه در عدد فرودهای مورد نظر مانور شتابگیری با دور ثابت پروانه مورد مطالعه قرار گرفته شد و پارامترهای مهم مانند سرعت کشتی، مکان کشتی در این تست استخراج شد. همچنین تغییرات الگوی موج و جزئیات جریان نیز مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مشخصات مدل کشتی

شبیه‌سازی‌ها برای مدل شناخته شده ONRT که یکی از شناورهای مرجع برای مطالعات عددی است، انجام شد. هندسه شناور شامل دو پروانه، دو سکان، بیلج کیل و اسکگ در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات اصلی شناور در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای اصلی شناور ONRT [۱۹].

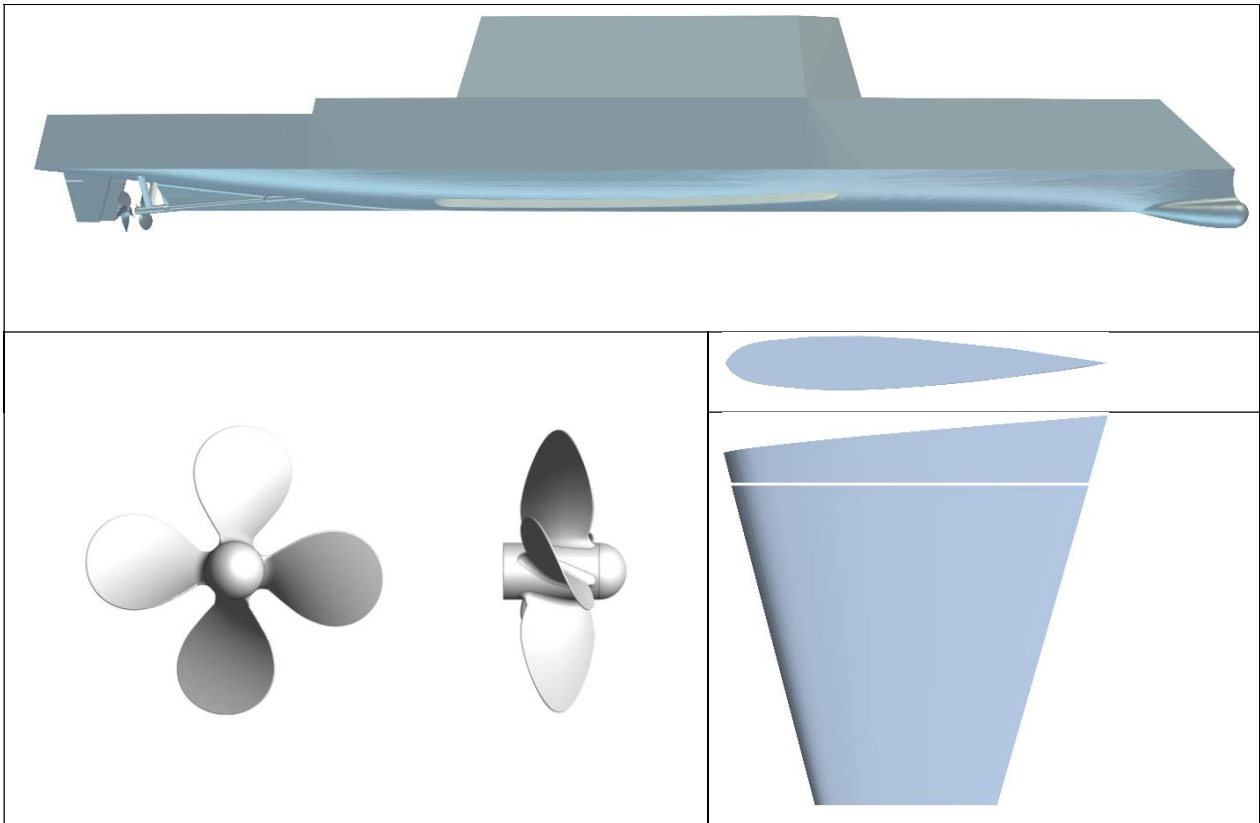
پارامترها	کشتی	مقیاس مدل
طول کلی (متر)	۱۵۴	۳.۱۴۷
عرض (متر)	۱۸.۷۸	۰.۳۸۴
ارتفاع ساختمانی (متر)	۱۴.۵	۰.۲۶۶
آبخور (متر)	۵.۴۹۴	۰.۱۱۲
جابجایی (کیلوگرم)	۸۵۰۷۰۰۰	۷۲.۶
مساحت سطح خیس (مترمربع)	۱.۵	۰.۱۵
ضریب بلوکی	۰.۵۳۵	۰.۵۳۵
قطر پروانه (متر)	۰.۱۰۶۶	۰.۱۰۶۶
موقعیت طولی مرکز ثقل (متر)	۷۴.۴۳۱	۱.۵۲۱
موقعیت ارتفاعی مرکز ثقل (متر)	۰.۱۵۶	۰.۱۵۶

۳- جزئیات محاسبات

² Sliding mesh.

³ Stationary region.

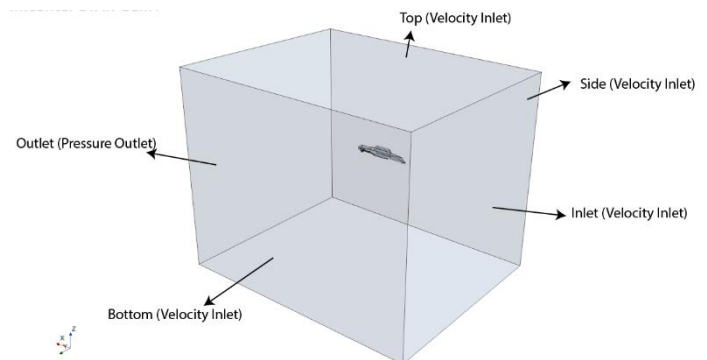
⁴ Rotating region.



شکل ۱- هندسه ONRT، پروانه و سکان.

سازي‌هاي تست خودرانس و شتابگيري به ترتيب به صورت سه درجه آزادي (سرج، هيو و پيچ) و شش درجه آزادي است. در هر گام زماني، حلگر RANS نيروها و گشتاورهاي حاصل از بدنه و همچنين تراست پروانه را محاسبه مي‌کند. با استفاده از اين داده‌ها، ماژول DFBI معادلات را حل کرده و موقعيت جديد کشتي را محاسبه مي‌کند.

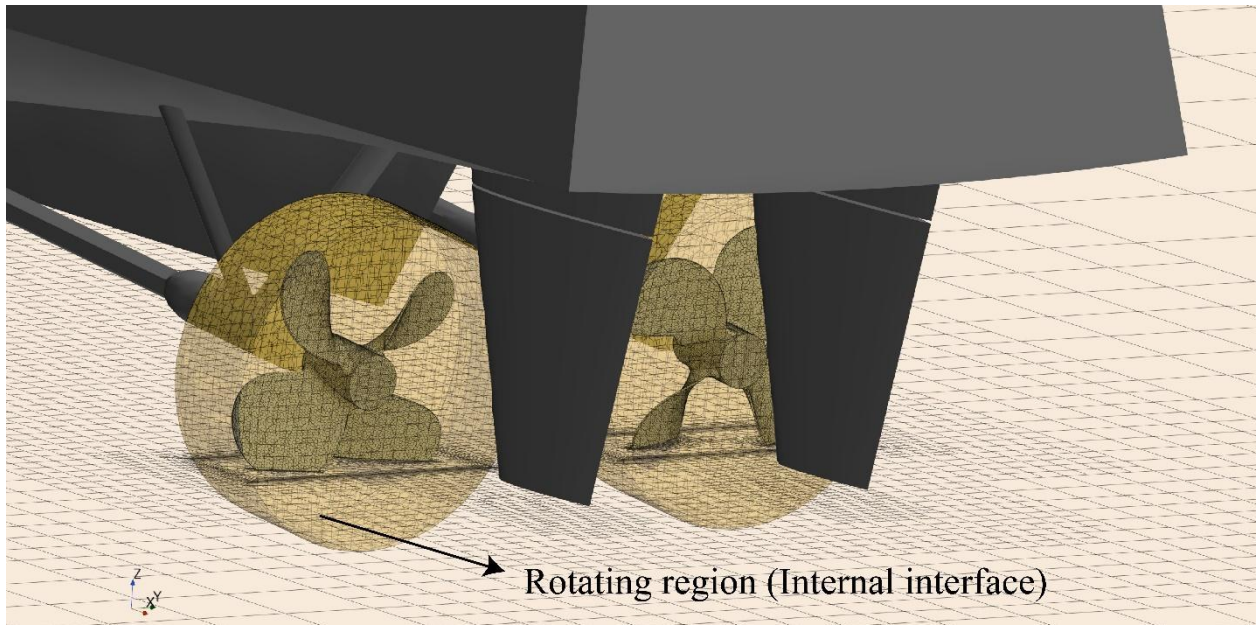
شبيه سازي‌ها با استفاده از يك روش مش‌بندي عددي و کارآمد و قوي بدون ساختار، با توانايي اصلاح بهبود محلي (در نزديكي بدنه، در سطح آزاد و منطقه ويک) انجام مي‌شود. براي به دست آوردن يك مش سطحي با كيفيت بالا از مش Surface remesher استفاده شد. براي توليد يك مش يکنواخت از نرخ رشد بسيار آهسته استفاده شد. توليد مش براي منطقه ثابت توسط مش شش ضلعي، و براي منطقه در حال چرخش از مش چندوجهي استفاده شد، زيرا مش چندوجهي يك حل دقيق براي هندسه‌هاي پيچيده ارائه مي‌دهد. همچنين شبکه‌ها در قسمت‌هايي مانند سطح آزاد، اطراف سکان و پروانه به صورت ريزتر در نظر گرفته شد. يك نماي کلي از مش اطراف بدنه و پروانه در شکل ۴ نشان داده شده است.



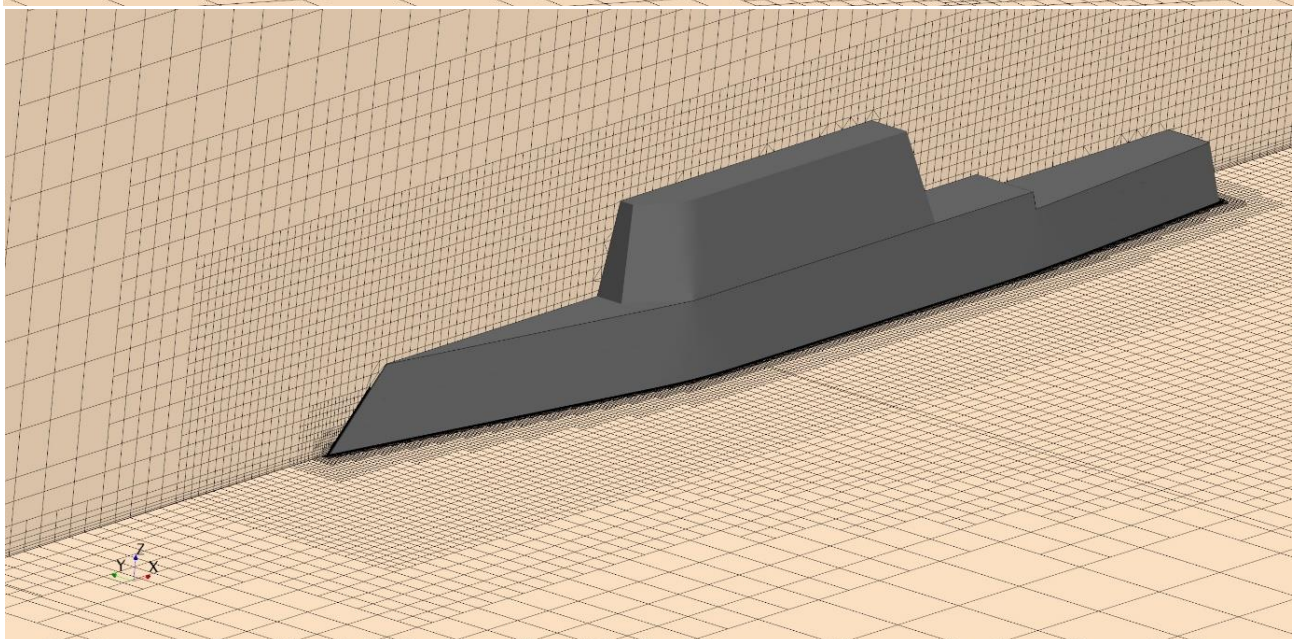
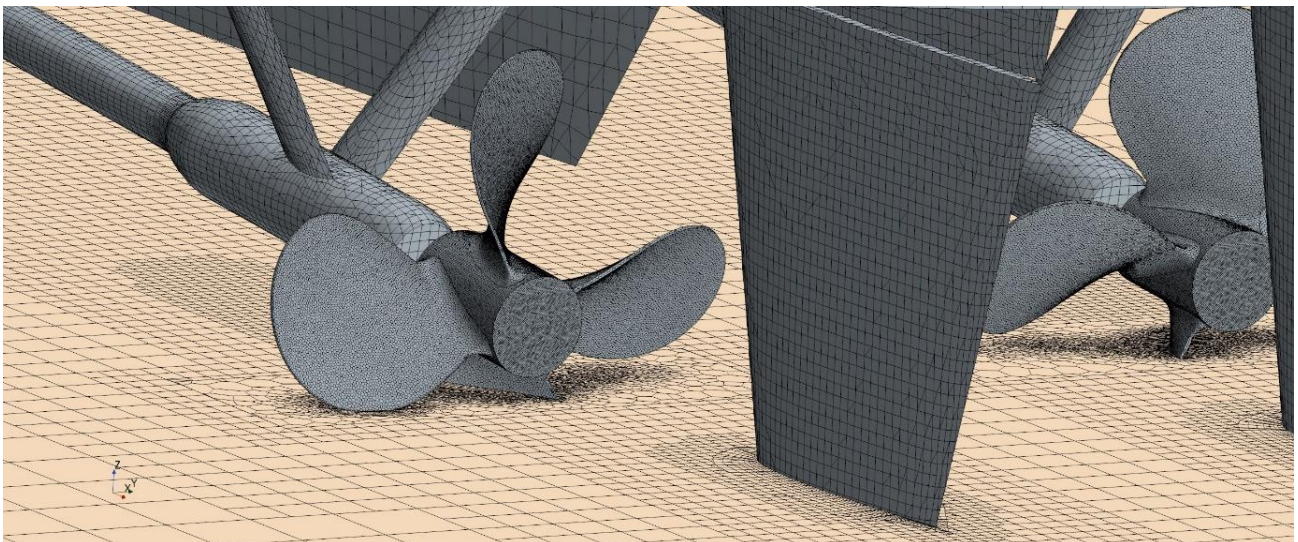
شکل ۲- محدوده محاسباتي و شرايط مرزي در شبیه‌سازی‌هاي خودرانس و شتابگيري.

براي شرط مرزي ديواره‌ها نيز مي‌توان شرط مرزي ديواره، متقارن و يا ورودی سرعت را انتخاب کرد که در شبیه‌سازی‌هايي مانند مانور و خودرانس بهتر است از ورودی سرعت استفاده شود. شرط مرزي پايين دامنه محاسباتي ورودی سرعت در نظر گرفته شده است که نشان‌دهنده اين است که شبیه‌سازی در آب عميق است و شرط مرزي در بالاي محدوده محاسباتي نيز به عنوان ورودی سرعت در نظر گرفته شده است که وجود سطح آزاد را نشان مي‌دهد.

روش ديناميکي تداخل بين بدنه و سيال (DFBI) همراه با حلگر RANS حرکات انتقالی و دورانی کشتي را محاسبه مي‌کند. شبیه



شکل ۳- محدوده محاسباتی اطراف پروانه.



شکل ۴- نمای کلی از مش اطراف بدنه و پروانه.

در این جا ρ چگالی سیال، g شتاب گرانش و μ لزجت دینامیکی سیال است. عبارت $\rho U'_i U'_j$ تانسور تنش رینولدز است که با استفاده از مدل‌های آشفتگی تخمین زده می‌شود.

۵- تایید و اعتبارسنجی^۶

۵-۱- تایید

از آنجایی که یک شبیه‌سازی عددی می‌تواند شامل تعدادی خطا باشد، ارزیابی دقیق نتایج با انجام تایید و اعتبارسنجی مناسب، ضروری است.

۵-۱-۱- مطالعه شبکه

خطاهای شبیه‌سازی (E) و عدم اطمینان (U) ممکن است از مدل‌سازی و منابع عددی ناشی شود، مورد اول ناشی از فرضیات ریاضی و تقریب‌های فیزیکی و مورد دوم از راه‌حل‌های معادلات ریاضی. E و U را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۲۳]:

$$= D - S = \delta_{SM} + \delta_{SN} \quad (۳)$$

D و S به ترتیب نتایج آزمایشگاهی و عددی هستند. δ_{SN} و δ_{SM} به ترتیب خطاهای مدل‌سازی و عددی هستند.

$$U_S^2 = U_{SM}^2 + U_{SN}^2 \quad (۴)$$

در این جا U_S ، U_{SM} و U_{SN} به ترتیب عدم اطمینان شبیه‌سازی، عدم قطعیت مدل‌سازی شبیه‌سازی و عدم قطعیت عددی هستند.

عدم اطمینان عددی مطابق با روش توسعه داده شده به وسیله ITTC قابل محاسبه است، که شامل شناسایی خطاها و عدم قطعیت‌ها از اندازه شبکه (U_G)، گام زمانی (U_T) و تکرار داخلی (U_I) و سایر پارامترها است. خطای تکرار داخلی در مقایسه با خطای مش و گام زمانی قابل صرف نظر است. در نتیجه، تعداد تکرارهای داخلی در هر مرحله ده بار تنظیم شد. فرآیند تایید برای مطالعه شبکه و گام زمانی با استفاده از سه راه‌حل به طور سیستماتیک از طریق نسبت غیرصحیح $r = \sqrt{2}$ انجام می‌شود [۲۴]. سرعت دورانی پروانه در عدد فرود ۰.۲ به عنوان آنالیز تایید مورد تحلیل قرار می‌گیرد. برای تحلیل تغییر در راه‌حل‌ها نسبت همگرایی به شرح زیر تعریف شده است:

$$R = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} \quad (۵)$$

در این جا ε_{21} اختلاف بین حل‌های ریز و متوسط، و ε_{32} اختلاف بین حل‌های متوسط و درشت است. بر این اساس حالت‌های همگرایی وجود دارد:

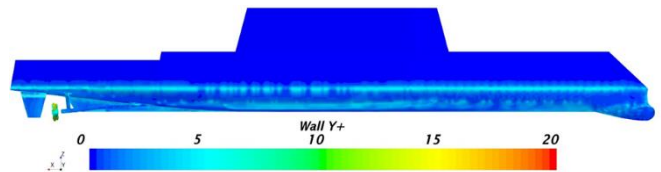
$R > 0$ واگرایی یکنواخت

$R < 0$ همگرایی نوسانی

$0 < R < 1$ همگرایی یکنواخت

در این شبیه‌سازی عددی مدل دو معادله $k - \omega SST$ برای در نظر گرفتن اثرات آشفتگی استفاده می‌شود، که به صورت دقیق جداسازی جریان در لایه مرزی را پیش‌بینی می‌کند.

از روش All y^+ wall treatment برای مدل‌سازی جریان درون لایه مرزی استفاده می‌شود. این روش معادلات RANS را در شرایط مش‌بندی بسیار ریز ($y^+ < 5$) حل می‌کند، از توابع دیواره برای مش‌بندی درشت ($y^+ > 30$) استفاده می‌کند و از یک تابع ترکیبی برای محاسبه مقادیر آشفتگی در بین این دو مقدار استفاده می‌کند. در شکل ۵ توزیع مقدار y^+ بر روی بدنه و پروانه برای مش‌بندی ریز در لایه مرزی نشان داده شده است.



شکل ۵- توزیع مقدار y^+ روی بدنه و پروانه.

روش بسیار کارآمد حجم سیال (VOF) برای مدل‌سازی سطح مشترک بین آب و هوا استفاده شده است.

برای محاسبه کمیت‌های نامعین مانند سرعت و فشار از یک حلگر ضمنی غیردائمی استفاده می‌شود. برای افزایش سرعت همگرایی حل از الگوریتم چندشبکه‌ای جبری^۵ استفاده شد [۲۱].

۴- مدل‌سازی جریان سیال

بهترین معادلات برای توصیف جریان تراکم‌ناپذیر آشفته ویسکوز غیردائمی اطراف یک کشتی معادلات ناویر-استوکس و پیوستگی هستند. روش متوسط زمانی ناویر-استوکس (RANS) شناخته شده‌ترین روش برای جریان‌های آشفته است. در معادلات RANS پارامترهای جریان به مولفه‌های میانگین و مشتقات تقسیم می‌شوند. یعنی $U = \bar{U} + U'$ و $P = \bar{P} + P'$ در این جا \bar{P} و \bar{U} میانگین سرعت و فشار و U' و P' مشتقات آن‌ها هستند. معادلات RANS می‌توانند به شکل زیر ارائه شوند [۲۲].

$$\frac{\partial(\rho U'_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{U}_i \bar{U}_j + \rho U'_i U'_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (۱)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{U}_i)}{\partial x_i} \quad (۲)$$

^۶ Verification and Validation (V&V).

^۵ algebraic multigrid algorithm (AMG).

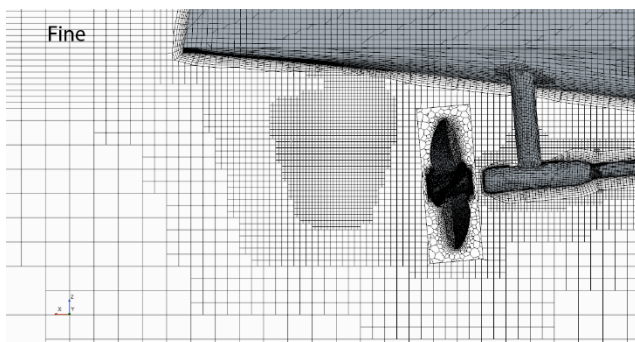
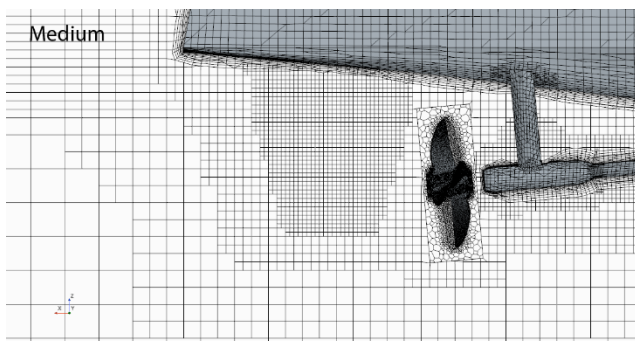
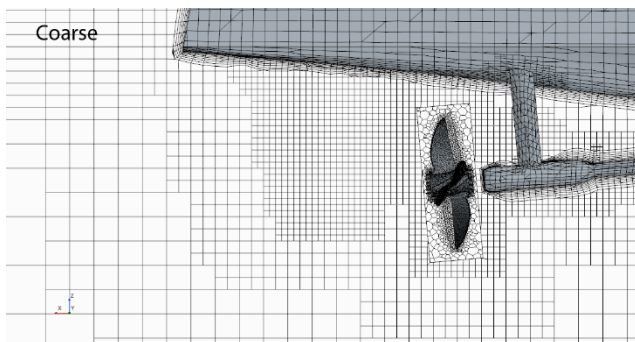
اجرا شده‌است و سرعت دورانی برای این نمونه‌ها و پارامترهای همگرایی به ترتیب در جدول ۵ و ۶ ارائه شده‌است.
جدول ۵: سرعت دورانی پروانه برای گام‌های زمانی ۰.۰۰۱، ۰.۰۰۱۴۱ و ۰.۰۰۲

گام زمانی (ثانیه)	سرعت دورانی (دور بر ثانیه)
۰.۰۰۱	۸.۸۱۶
۰.۰۰۱۴۱	۸.۸۱۹
۰.۰۰۲	۸.۸۲۶

جدول ۶: مقادیر R، P و GCI برای مطالعه گام زمانی.

نسبت گام زمانی	R	P	GCI
۱.۴۱۴	۰.۴۲۸	۲.۴۴۵	۰.۰۰۲۸

اگر چه نتایج گام زمانی بزرگ و ریز اختلاف کمی دارند، اما زمان محاسباتی برای رسیدن به همگرایی بیشتر است. در نتیجه برای تمام شبیه‌سازی مش درشت و گام زمانی ۰.۰۰۲ ثانیه انتخاب شده است تا زمان محاسباتی کمتری صرف شود.



شکل ۶- سه مش مختلف اطراف بدنه کشتی و پروانه.

با توجه به واگرایی یکنواخت تخمین خطاها و عدم قطعیت‌ها امکان‌پذیر نیست. برای همگرایی نوسانی، عدم قطعیت نیز به عنوان میانگین مرزهای بالا و پایین نوسانات در نظر گرفته می‌شود. برای ارزیابی همگرایی شبکه، شبیه‌سازی خودرانش شناور ONRT با سه شبکه مختلف (g_1, g_2 و g_3) سه سایز مینا شبکه مختلف شبیه‌سازی می‌شود. سایز مینا، تعداد شبکه و سرعت دورانی محاسبه شده در تست خودرانش در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین سه مش مختلف اطراف کشتی و پروانه در شکل ۶ مقایسه شده‌است.

جدول ۳- سرعت دورانی پروانه برای شبکه‌بندی ریز، متوسط و درشت.

سایز مینا (متر)	تعداد نقاط شبکه	سرعت دورانی پروانه (دور بر ثانیه)
۰.۰۴	۵۱۷۳۱۶۳	۸.۷۹۶
۰.۰۵۶۵	۲۲۸۲۱۹۸	۸.۸۲۶
۰.۰۸	۱۱۸۱۴۱۰	۸.۸۷۸

مقدار R به دست آمده همگرایی یکنواخت را نشان می‌دهد. در چنین شرایطی قانون تعمیم یافته ریچاردسون می‌تواند برای ارزیابی خطا استفاده شود. مرتبه دقت (P) و مقدار شاخص همگرایی شبکه (GCI) به شرح زیر تعریف شده است:

$$P = \frac{\ln(\frac{\epsilon_{32}}{\epsilon_{21}})}{\ln(r)} \quad (6)$$

$$GCI = F_S \frac{|\epsilon_{21}|}{r^{P-1}} \quad (7)$$

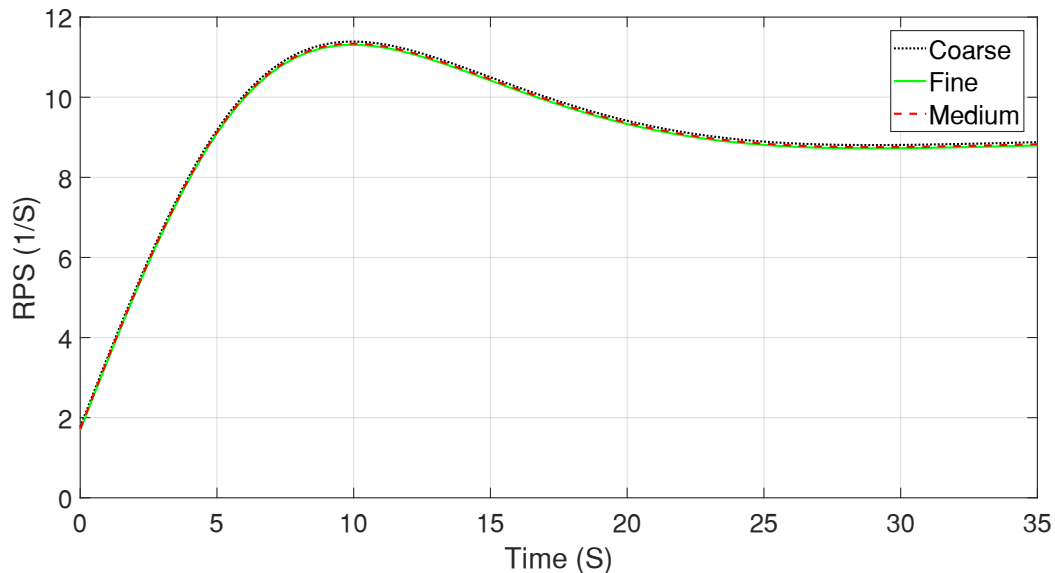
در این F_S ضریب ایمنی است. F_S را می‌توان عدد ۱.۲۵ در نظر گرفت. همچنین GCI بیانگر فاصله مقادیر محاسبه شده از مقدار دقیق است. مقدار تئوری برای مرتبه دقت عدد ۲ است. ترتیب محاسبه شده از مقادیر گسسته‌سازی و GCI در جدول ۴ ارائه شده‌است. علاوه بر این سرعت دورانی پروانه بر حسب زمان در عدد فرود ۰.۲ برای مش‌های مختلف در شکل ۷ مقایسه شده‌است.

جدول ۴: مقادیر R، GCI و P برای سرعت دورانی پروانه در عدد فرود ۰.۲

نسبت شبکه	R	P	GCI
۱.۴۱۴	۰.۵۷۶	۱.۵۸۷	۰.۰۵۱

۵-۱-۲- مطالعه گام زمانی

یکی از پارامترهای مهم در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی گام زمانی است. همچنین تست خودرانش به دلیل وجود پروانه و تداخل آن با بدنه کشتی بسیار به گام زمانی حساس است. در این مطالعه سه گام زمانی برای حل مسئله در نظر گرفته شده‌است. در آخر همگرایی نتایج گام زمانی با استفاده از نسبت همگرایی P، R و GCI مقایسه شده‌است. تمام نتایج گام زمانی برای شبکه متوسط



شکل ۷- سرعت دورانی پروانه برای سه مش مختلف در عدد فرود ۰.۲.

۶- نتایج

۴-۱- خودرانش

به منظور بررسی مانور شتابگیری، شناور به تراست تولیدی پروانه نیاز دارد، از سوی دیگر برای تولید تراست رو به جلو و در جهت خلاف نیروهای وارد بر شناور باید سرعت دورانی پروانه در هر عدد فرود به دست آید. از این رو، برای به دست آوردن سرعت دورانی پروانه در هر عدد فرود شبیه‌سازی خودرانش با پروانه واقعی انجام شد. شبیه‌سازی‌های خودرانش به صورت سه درجه آزادی (سرج، تریم و سینکیج) انجام شد. به منظور پیدا کردن نقطه خودرانش از یک کنترلر انتگرالی نسبی برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است، که سرعت دورانی پروانه (n) را کنترل می‌کند. سرعت دورانی پروانه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$n = Pe + I \int_0^t edt \quad (8)$$

در این جا P و I ثابت‌های انتگرال و e خطای بین سرعت هدف کشتی و سرعت در هر لحظه کشتی است و به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۸]:

$$e = V_{Target} - V_{Ship} \quad (9)$$

تعیین بهینه این ثابت‌ها سرعت همگرایی را افزایش می‌دهد و از سوی دیگر از افزایش بیش از حد پارامترها جلوگیری می‌کند. در این مطالعه پس از چند بار سعی و خطا مقدار P و I به 13.33 به دست آمد.

کنترلر از آغاز شبیه‌سازی فعال شده و تا زمانی که مقاومت کشتی و تراست تولیدی پروانه با هم برابر شوند سرعت دورانی پروانه را در هر گام زمانی محاسبه می‌کند، برابری مقاومت کشتی و تراست تولیدی پروانه را اصطلاحاً نقطه خودرانش می‌گویند. زمانی که

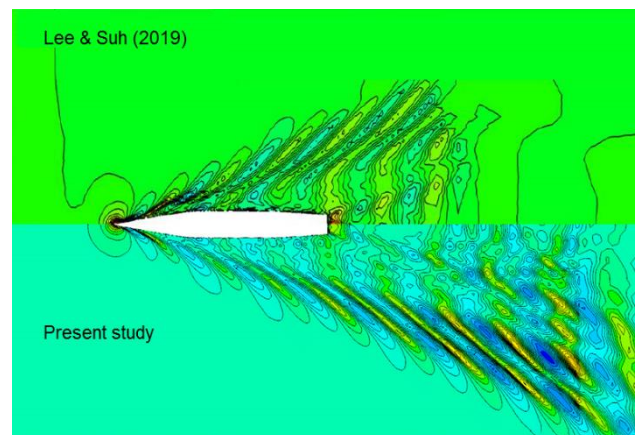
۵-۲- اعتبارسنجی

به طور کلی، نتایج شبیه‌سازی عددی باید با نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شوند. از این رو، نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط مفیدی و همکاران [۲۵]. برای اعتبارسنجی استفاده شد. جدول ۷ سرعت دورانی پروانه را با داده‌های آزمایشگاهی و سایر نتایج عددی مقایسه می‌کند.

جدول ۷- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی سرعت دورانی پروانه برای عدد فرود ۰.۲.

	EFD	CFD present	CFD [۲۶].
n (RPS)	۸.۹۷	۸.۸۷۸	۸.۸۱۹
Error (%)		-۱.۰۲۵	-۱.۶۸۳

شکل ۸ توزیع الگوی و ارتفاع موج مشابه سایر نتایج عددی را نشان می‌دهد [۲۷]. با توجه به شکل ۸ مقایسه ارتفاع موج و امواج طولی و عرضی تقریباً مشابه است.



شکل ۸- مقایسه الگوی موج ایجاد شده در نقطه خودرانش با سایر نتایج عددی برای عدد فرود ۰.۲.

با توجه به شکل ۹ و ۱۰ سرعت کشتی برای عدد فرود ۰.۲ پس از ۳۵ و برای عدد فرود ۰.۳ پس از ۲۴ ثانیه به همگرایی می‌رسد، زمانی که سرعت کشتی به مقدار ثابتی می‌رسد سرعت دورانی پروانه نیز ثابت می‌شود، و مقدار سرعت دورانی موردنیاز برای حرکت کشتی به دست می‌آید. همچنین از مقایسه مقادیر به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی دقت قابل قبولی مشاهده می‌شود. در جدول ۸ و ۹ پارامترهای هیدرودینامیکی در شبیه‌سازی تست خودرانش با داده‌های آزمایشگاهی موجود و سایر شبیه‌سازی‌های عددی مقایسه شده است.

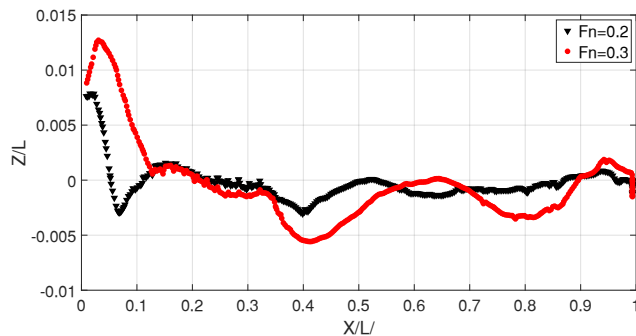
جدول ۸- مقایسه نتایج خودرانش برای عدد فرود ۰.۲

	CFD	CFD[۲۶].	CFD[۲۹].	EFD
n(RPS)	۸.۸۷۸	۸.۸۱۹	۸.۸۶	۸.۹۷
$C_t \times 10^3$	۵.۳۰۲	۵.۲۹۱		
K_t	۰.۲۵	۰.۲۴۲	۰.۲۴۷	
K_q	۰.۷۶	۰.۶۱۶		
Trim (deg)	۰.۰۳۸۲	۰.۰۴۳۵	۰.۰۴۱۱	۰.۰۳۸۶
Sinkage $\times 10^2$ (m)	۰.۲۶۱۶	۰.۲۴۳	۰.۲۳۲۷	۰.۲۲۶

جدول ۹- مقایسه نتایج خودرانش برای عدد فرود ۰.۳

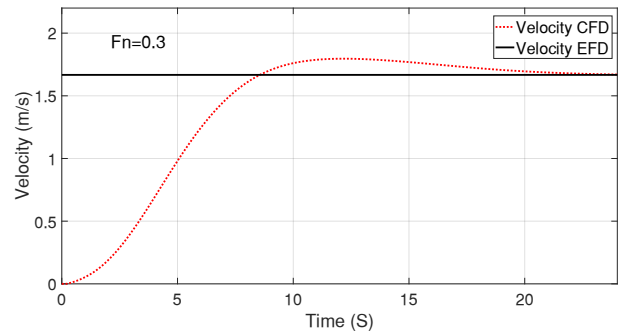
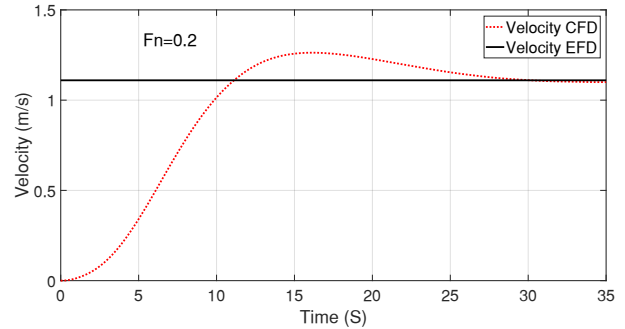
	CFD	CFD[۳۱].	CFD[۳۰].	EFD
n(RPS)	۱۳.۸۰۵	۱۳.۳۸۹	۱۳.۶۳۶	۱۳.۶۸۴
$C_t \times 10^3$	۵.۷۱۶	۵.۴۶۵	۵.۸۵۹	
K_t	۰.۲۴۴	۰.۲۴۶	۰.۲۶۲	
K_q	۰.۷۸	۰.۶۷۳	۰.۷۴۸	
Trim (deg)	۰.۰۰۵۹	۰.۰۷۸۱	۰.۰۶۱	
Sinkage $\times 10^2$ (m)	۰.۷	۰.۵۷	۰.۴۹	

در شکل ۱۱ ارتفاع بدون بعد سطح آزاد بر روی بدنه کشتی برای هر دو عدد فرود نشان داده شده‌است. با توجه به شکل، ارتفاع قله و قعر موج برای عدد فرود ۰.۳ در امتداد بدنه بیشتر است، یعنی با افزایش عدد فرود ارتفاع موج بر روی بدنه شناور به خصوص در قسمت سینه افزایش می‌یابد.

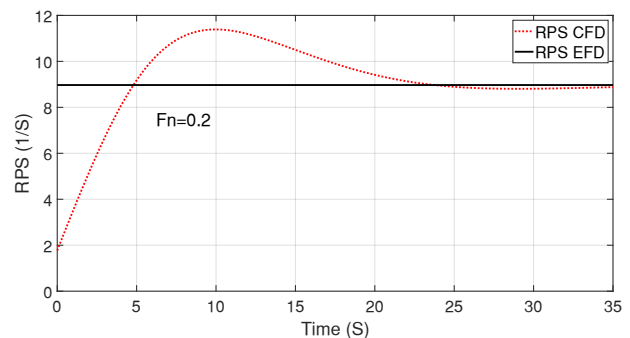
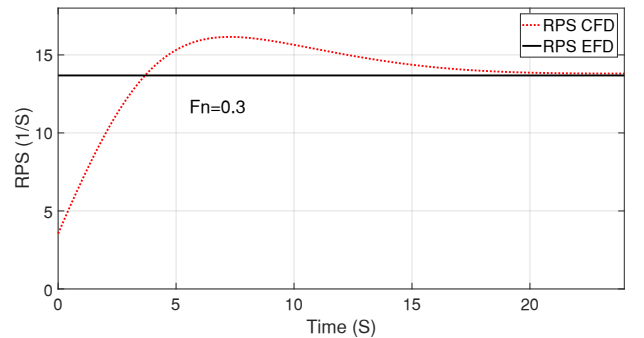


شکل ۱۱- ارتفاع بدون بعد سطح آزاد بر روی بدنه.

شناور به نقطه خودرانش می‌رسد سرعت دورانی پروانه برای رسیدن کشتی به سرعت موردنیاز به مقدار ثابتی می‌رسد. در شکل ۹ و ۱۰ نمودار سرعت کشتی و سرعت دورانی پروانه در تست خودرانش با نتایج به دست آمده از تست آزمایشگاهی مقایسه شده‌است.



شکل ۹- مقایسه سرعت کشتی با مقادیر آزمایشگاهی.

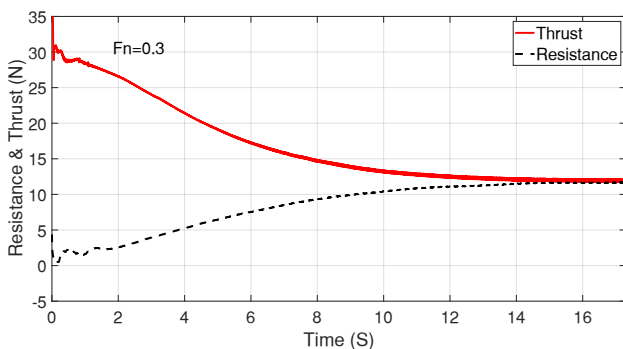
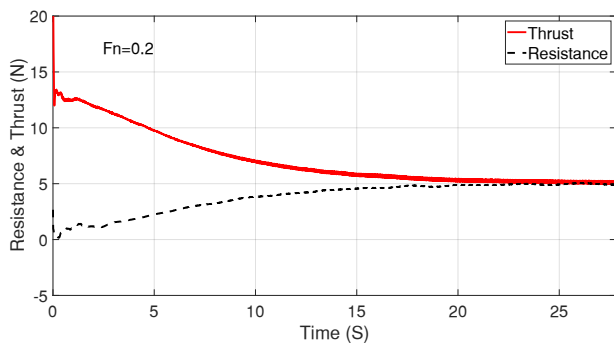


شکل ۱۰- مقایسه سرعت دورانی پروانه با نتایج آزمایشگاهی.

عدد فرود	سرعت دورانی پروانه (دور بر ثانیه)
۰.۲	۸.۹۷
۰.۳	۱۳.۶۸۴

از مقایسه همگرایی سرعت در شبیه‌سازی عددی با سرعت طراحی دقت قابل‌قبولی به دست آمد، و درصد خطای زیر ۰.۲ درصد به دست آمد. همچنین، با افزایش عدد فرود، کشتی زمان کمتری را نیاز دارد تا به سرعت ثابت برسد، زیرا در سرعت‌های پایین پروانه کشتی به سرعت دورانی پایین‌تری نیاز دارد تا تراست موردنیاز برای غلبه بر نیروهای اینرسی را فراهم کند.

در شکل ۱۴ مسیر بدون بعد حرکت کشتی ($X'_{Adv} = \frac{X_{Adv}}{L}$) بر حسب زمان بدون بعد در مانور شتابگیری برای هر دو عدد فرود نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که در عدد فرودهای مختلف کشتی تقریباً مسافت یکسانی را طی می‌کند تا به سرعت ثابت برسد، و تنها تفاوت در زمان رسیدن به یک مسافت مشخص است که برای عدد فرود ۰.۳ این زمان کمترین مقدار را دارد.



شکل ۱۲. نمودار مقاومت کشتی و تراست پروانه در مانور شتابگیری.

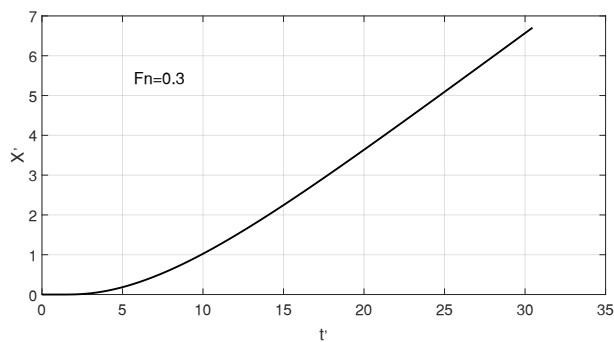
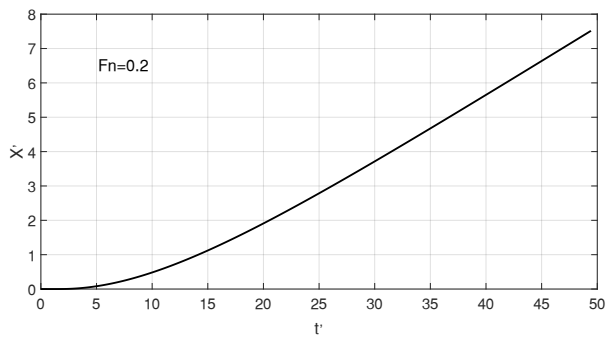
در شکل ۱۵، برای درک بهتر رفتار کشتی در طی مانور شتابگیری ۴ تصویر لحظه‌ای از الگوی موج ایجاد شده در اطراف کشتی برای عدد فرود ۰.۳ نمایش داده شده است.

در این بخش نتایج مربوط به شبیه‌سازی مستقیم مانور شتابگیری ارائه شده است.

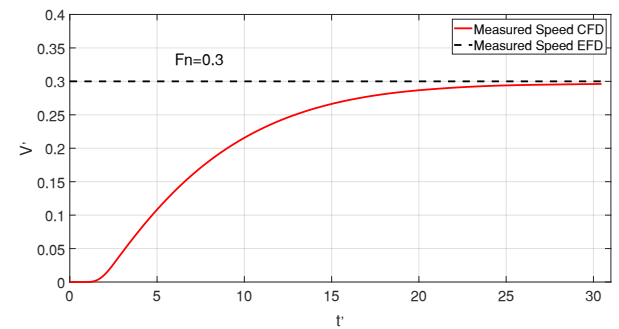
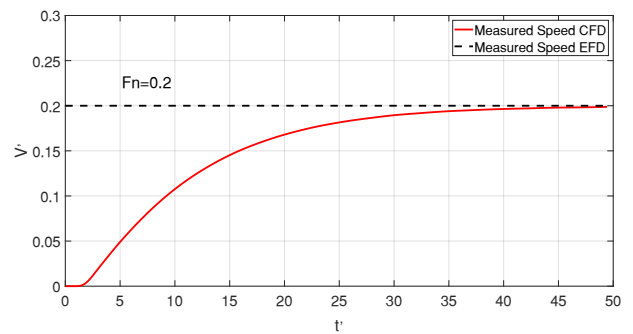
پس از انجام شبیه‌سازی خودرانش در قسمت قبل، و به دست آوردن سرعت دورانی پروانه در هر دو عدد فرود مانور شتابگیری شبیه‌سازی شد. در جدول ۱۰ شرایط شبیه‌سازی مانور شتابگیری نشان داده شده است. شبیه‌سازی مستقیم مانور شتابگیری نیازمند تولید تراست رو به جلو برای حرکت شناور است، برای این منظور می‌توان از دیسک مجازی و یا پروانه واقعی استفاده کرد. استفاده از دیسک مجازی سبب کاهش هزینه محاسباتی محاسباتی می‌شود ولی از سوی دیگر تداخل بین پروانه، سکان و بدنه کشتی را شامل نمی‌شود. همچنین استفاده از دیسک مجازی با استفاده از منحنی‌های هیدرودینامیکی پروانه در آب آزاد صورت می‌گیرد که فقط برای یک سرعت طراحی قابل استفاده است. از سوی دیگر استفاده از پروانه واقعی سبب افزایش هزینه محاسباتی می‌شود، اما به تداخل دقیق بین بدنه کشتی، پروانه و سکان نیز می‌پردازد و می‌تواند برای سرعت‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه مانور شتابگیری با مدل‌سازی پروانه واقعی و سرعت دورانی ثابت پروانه صورت گرفت. با استفاده از این تکنیک و تغییر سرعت ورودی به پروانه، تراست تولیدی پروانه در هر لحظه تغییر می‌کند و شناور از سرعت صفر شروع به شتاب‌گیری می‌کند. با شتاب گرفتن شناور سرعت آن نیز افزایش می‌یابد و با افزایش سرعت مقاومت کشتی در هر گام زمانی افزایش می‌یابد. در شکل ۱۲ نمودار مقاومت کشتی و تراست پروانه بر حسب زمان برای هر دو عدد فرود نشان داده شده است.

مطابق با شکل ۱۲ در ابتدا مقاومت کشتی نزدیک به صفر است و تراست پروانه زیاد است، که این امر به خاطر این است که شناور سرعت صفر دارد اما پروانه شروع به چرخش کرده است. اما با گذشت زمان و تولید تراست توسط پروانه شناور شتاب می‌گیرد و سرعتش افزایش می‌یابد، این افزایش سرعت تا زمانی صورت می‌گیرد تا تراست تولیدی پروانه و مقاومت کشتی با هم برابر شوند و به یک مقدار ثابت برسند. زمانی که تراست پروانه و مقاومت کشتی ثابت می‌شوند، شتاب کشتی صفر می‌شود و کشتی به یک سرعت ثابت می‌رسد.

در شکل ۱۳ سرعت بدون بعد ($v' = \frac{v}{\sqrt{Lg}}$) کشتی بر حسب زمان بدون بعد ($t' = \frac{t}{\sqrt{\frac{L}{g}}}$) برای هر دو عدد فرود نمایش داده شده است، و با سرعت طراحی مدنظر مقایسه شده است.



شکل ۱۴- مسافت طی شده در مانور شتابگیری.



شکل ۱۳- پیشروی سرعت حرکت کشتی در مانور شتابگیری.

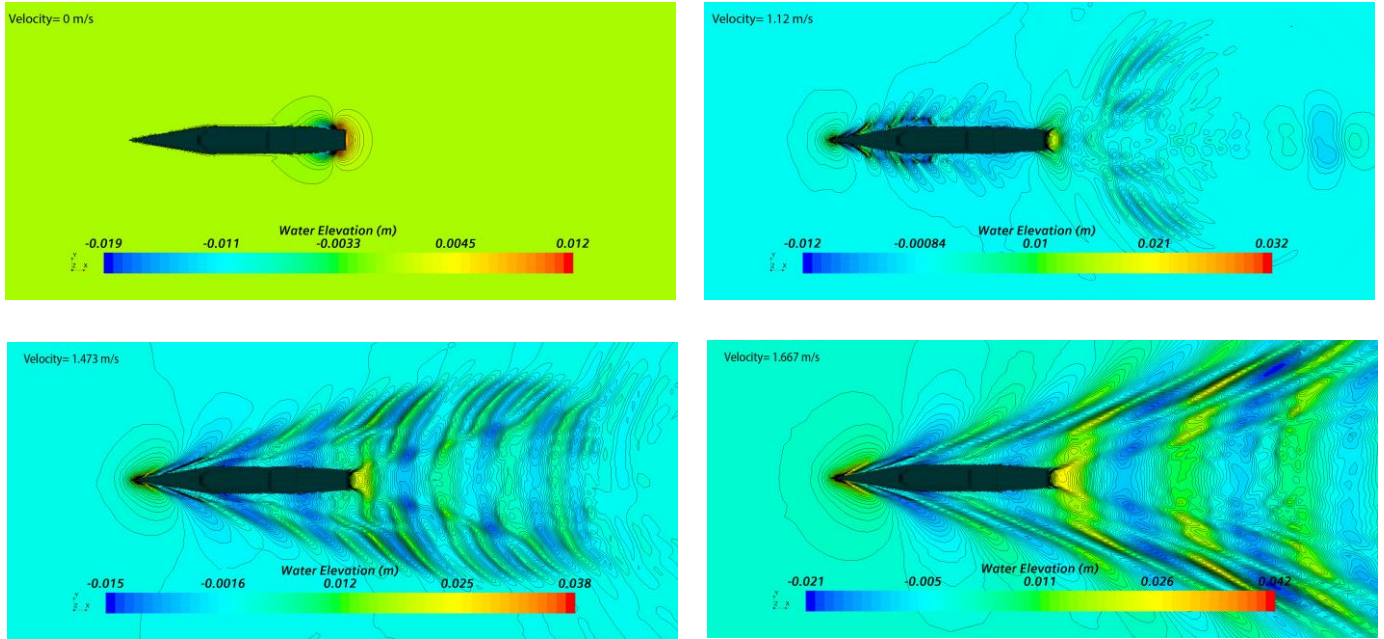
در شکل ۱۷ و یک موثر در ناحیه پاشنه شناور در دو زمان مختلف در مانور شتابگیری برای عدد فرود ۰.۳ در مقطع پروانه نمایش داده شده است. با توجه به شکل در زمان صفر و در آغاز شبیه سازی میدان و یک در ناحیه پاشنه هنوز ایجاد نشده است اما با گذشت زمان و افزایش تراست و یک موثر در ناحیه پاشنه شناور شکل می گیرد، و یک زمانی که شناور به حالت پایدار می رسد نیز در شکل مشخص است. همچنین به دلیل دو پروانه بودن شناور، و یک در ناحیه پاشنه به صورت متقارن توزیع شده است.

۷- نتیجه گیری

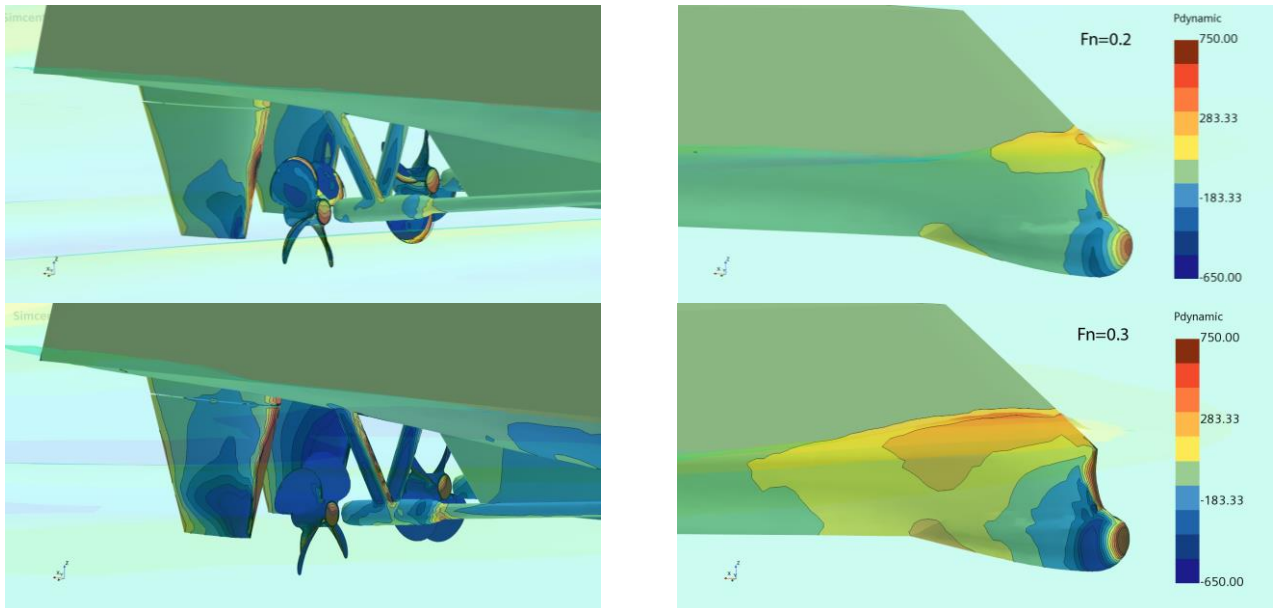
در این مطالعه مانور شتابگیری شناور ONRT در دو عدد فرود (۰.۲ و ۰.۳) مورد مطالعه قرار گرفت. برای این هدف در ابتدا شبیه سازی تست خودرانش با استفاده از کنترلر انتگرالی مورد مطالعه قرار داده شد، و از مقایسه نتایج به دست آمده از این شبیه سازی با برخی نتایج آزمایشگاهی موجود و مطالعات دیگر در زمینه عددی درصد خطای کمتر از ۱ درصد به دست آمد، که نشان می دهد شبیه سازی تست خودرانش از دقت قابل قبولی برخوردار است. در قسمت دیگر مطالعه پس از معتبرسازی نتایج و به دست آوردن سرعت دورانی پروانه برای انجام مانور شتابگیری، مانور شتابگیری در دو سرعت مختلف مورد بررسی قرار گرفت، و تغییر تراست پروانه، مقاومت کشتی، سرعت کشتی در مانور شتابگیری و مکان کشتی مورد بحث قرار گرفت. از سوی دیگر تغییرات الگوی موج، فشار و یک پروانه در مانور شتابگیری نیز مورد مطالعه قرار داده شد و می توان نتیجه گرفت با افزایش عدد

مطابق با شکل ۱۵، در ابتدا شناور در سرعت صفر قرار دارد، پس از ایجاد نیروی تراست توسط پروانه شناور شتاب می گیرد و سرعتش افزایش پیدا می کند. در ابتدا در اطراف کشتی الگوی موج ایجاد نشده است، اما با گذشت زمان و افزایش سرعت کشتی الگوی موج سینه و پاشنه در اطراف بدنه کشتی نمایان می شود، و پس از آن الگوی موج ایجاد شده در سینه و پاشنه با یکدیگر ادغام می شوند و در پایان زمانی که شناور به سرعت ثابت می رسد الگوی موج ایجاد شده به طور کامل شکل گرفته است و امواج عرضی و واگرای کلون بسیار واضح است. به علاوه مشاهده می شود که الگوی موج ایجاد شده در طی مانور شتابگیری به درستی شبیه سازی شده است.

در شکل ۱۶ توزیع فشار در مانور شتابگیری در قسمت سینه و پاشنه شناور در حالتی که شناور به حالت پایدار رسیده است، برای هر دو عدد فرود نشان داده شده است. با توجه به شکل، در ناحیه سینه شناور یک منطقه پرفشار ایجاد شده است، که علت آن این است که کشتی رو به جلو با سرعت حرکت می کند و باید بر نیروهای وارد بر سیال غلبه کند، و علت دیگر آن شکست امواج در حین مانور شتابگیری است. به علاوه در قسمت پاشنه و در جایی که پروانه قرار دارد یک منطقه کم فشار به وجود آمده است، که اختلاف فشار در قسمت سینه و پاشنه سبب ایجاد مقاومت فشاری در شناور می شود. همچنین مشاهده می شود که با افزایش عدد فرود فشار بر روی بدنه شناور افزایش می یابد.

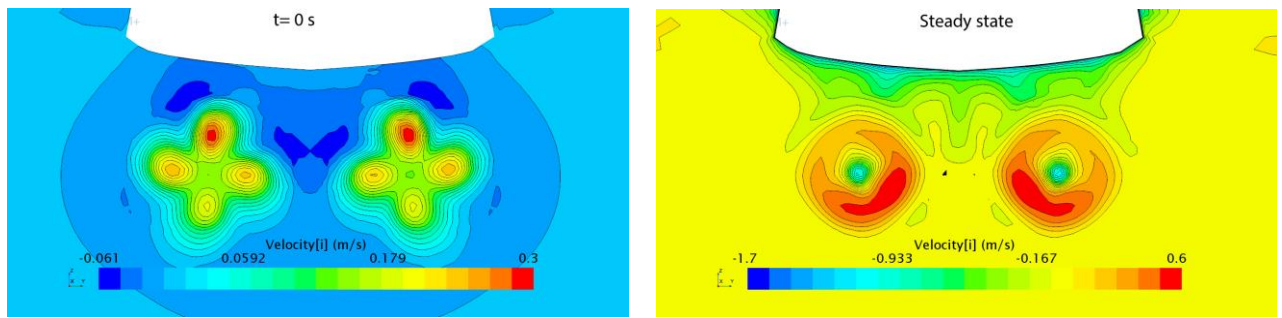


شکل ۱۵-۴ تصویر لحظه‌ای از الگوی موج ایجاد شده در مانور شتابگیری برای عدد فرود ۰.۳.



شکل ۱۶- توزیع فشار روی بدنه در مانور شتابگیری.

فرود شناور به زمان کمتری نیاز دارد تا به سرعت ثابت برسد. به علاوه تایید و اعتبارسنجی نتایج و عدم قطعیت‌های عددی طبق استانداردها و توصیه‌های ارائه شده توسط ITTC انجام شد. از آنجایی که بررسی حرکات کشتی در شرایط واقعی (موج) بسیار حائز اهمیت است، می‌توان مانور شتابگیری را در امواج نیز مورد بررسی قرار داد. زیرا رفتار شناور در امواج متفاوت است و سبب کاهش سرعت و افزایش مقاومت و افزایش مصرف سوخت می‌شود.



شکل ۱۷- تغییرات ویک موثر در مقطع پروانه در مانور شتابگیری برای عدد فرود ۰.۳.

۸ - مراجع

- [13]. H. Zeraatgar, M. H.Ghaemi, The analysis of overall ship fuel consumption in acceleration maneuver using hull propeller-engine interaction principles and governor features. POLISH MARITIME RESEARCH 1 (101) 2019 Vol. 26; pp. 162-173 10.2478/pomr-2019-0018.
- [14]. Simman, 2014. 2nd workshop on verification and validation of ship manoeuvring simulation methods [WWW document]. <https://simman2014.dk> accessed 4.20.21.
- [15]. NMRI, 2015. A workshop on CFD in ship hydrodynamics [WWW document]. <http://www.t2015.nmri.go.jp> accessed 5.30.20.
- [16]. NuTTS, 2019. 22ND NUMERICAL TOWING TANK SYMPOSIUM [WWW document]. <https://www.wavec.org/en/events/22nd-numerical-towing-tank-symposium-nutts-2019> accessed 5.30.20.
- [17]. H. Jasak, V. Vukcevic, I. Gatin, I. Lalovic, CFD validation and grid sensitivity studies of full-scale ship self-propulsion, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering xxx (2018) 1-11.
- [18]. S. Duman, S. Bal, Prediction of the acceleration and stopping manoeuvres of a bare hull surface combatant by closed-form solutions and CFD, Ocean Engineering 235 (2021) 109428.
- [19]. Simman, 2014, <https://simman2020.dk/>.
- [20]. ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 2014. Practical guidelines for ship CFD applications. 7.5-03-02-03.
- [21]. CD-Adapco, 2019. User guide Star-CCM+ Version 14.04.
- [22]. J.H. Ferziger, M. Perić, Solution of the Navier-Stokes's equations, Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, Berlin, Heidelberg, 2002, pp. 157-216.
- [23]. F. Stern, R.V. Wilson, H.W. Coleman, E.G. Paterson, Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations – Part 1: methodology and procedures, J. Fluid Eng. 23 (4) (2001) 793-802.
- [1]. IMO. 2015. Third IMO greenhouse gas study 2014, exec, summary and final report, Technical Report, IMO, London, UK.
- [2]. Roskilly AP, Palacin R, Yan J. 2015. Novel technologies and strategies for clean transport systems. Appl Energy. 157:533-536.
- [3]. Harvald SA. 1983. Resistance and propulsion of ships, Volume 12 of Ocean engineering, Wiley.
- [4]. Norrbin, N.H., 1971. Theory and observations of on the use of a mathematical model for ship manoeuvring in deep and confined waters. SSPA Gothenbg, Swed. 68.
- [5]. Abkowitz, M.A., 1964. Lectures on Ship Hydrodynamics – Steering and Maneuvering (No. Hy-5). Hydro & Aerodynamic Laboratory, Lyngby, Denmark.
- [6]. Burcher, R.K., 1991. The prediction of the manoeuvring characteristics of vessels. Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Phys. Eng. Sci. 334, 265-279. <https://doi.org/10.1098/rsta.1991.0013>.
- [7]. Holtrop, J., Mennen, G.G.J., 1982. An approximate power prediction method. Int. Shipbuild. Prog. 29.
- [8]. Smitt, W.L., 1970. Steering and manoeuvring full-scale and model tests (Part 1). Eur. Shipbuild. 19.
- [9]. Inoue, S., Hirano, M., Kijima, K., Takashina, J., 1981. A practical calculation method OF SHIP maneuvering. MOTION 28, 207-222.
- [10]. Ankudinov, V., 1987. Ship Maneuvrability Assessment in Ship Design: Simulation Concept. Presented at the International Ship Manoeuvring Conference, London.
- [11]. Kijima, K., Tanaka, S., Furukawa, Y., Hori, T., 1993. On a prediction method of ship manoeuvring characteristics. Presented at the Proceedings of MARSIM 93, 285-294.
- [12]. S. Tavakoli, S. Najafi, E. Amini, A. Dashtimansh, Ship acceleration motion under the action of a propulsion system: a combined empirical method for simulation and optimization, Journal of Marine Engineering & Technology (2020).

- [24]. ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 2017. Uncertainty analysis in CFD verification and validation methodology and procedures. 7.5-03-01-01.
- [25]. A. Mofidi, A. Castro, P. M. Carrica, 2016. Self-propulsion and course keeping of ONR Tumblehome in calm water and waves. In: Proceedings of Tokyo 2015 CFD Workshop in ship hydrodynamics, vol III, pp 303–308.
- [26]. Wang, J., Zou L., Wan, D. 2017. CFD simulations of free running ship under course keeping control, Ocean Engineering 141. 450–464.
- [27] Lee, J.-H., & Suh, S.-B. 2019. A Study on the Estimation of the Effective Wake Ratio for ONR Tumblehome by the Numerical Analysis. Journal of the Society of Naval Architects of Korea. The Society of Naval Architects of Korea. <https://doi.org/10.3744/snak.2019.56.2.109>.
- [28]. ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 2017. Practical guidelines for ship self-propulsion CFD. 7.5-03-03 01.
- [29]. Zhang, Z., Liu, L., Yu, J., Yang, W., Zhang, Z., and Kaijun J. 2021. Numerical simulation of ONR Tumblehome self-propulsion using discretized propeller and body-force models. Paper presented at the the 31st International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 2021.
- [30]. Delen, C., Bal, S. 2020 Uncertainty analysis of numerical and experimental resistance tests for ONR Tumblehome. Sustainable Development and Innovations in Marine Technologies – Georgiev & Guedes Soares (eds) 2020 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-367-40951-7.
- [31]. Wang J, Zhao W, Wan D. Simulations of Self-Propelled Fully Appended Ship Model at Different Speeds. International Journal of Computational Methods. 2019 Aug 5;16(05):1840015.