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

تاریخچه 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 ویک 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 Seif[2]

[1] 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

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 و سیستم رانش کارآمدتر طراحی کنند، به ویژه با اهداف اخیر کاهش گازهای گلخانه‌ای در جهان باید مجددا توجه بیشتری به تداخل مستقیم بین کشتی و پروانه صورت گیرد [۱و۲]. 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.1.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.1]

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 عمدتا بر اساس مدل‌های 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 [۶-۴]. 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 [۱۱-۸].

در یک مطالعه با فرمول های 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 مدل های 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 وگنینگین و برای بررسی فاز شتابگیری کشتی از حل معادلات دیفرانسیل مرتبه اول استفاده کردند. برای تایید و اعتبارسنجی مدل ریاضی خود از داده های 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.

در سال‌های اخیر دینامیک سیالات محاسباتی[1] 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 تست‌های 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 آن ها 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 روش های تحلیلی پیش بینی 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 شبیه سازی 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 قراردادند 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

[1] Computational Fluid Dynamic (CFD).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.1.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.1]

مانور به صورت دقیق بررسی نشده است، و اکثرا 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 فرمول های تجربی پروانه و یا ضرایب بی‌بعد استفاده شده‌است. موضوع دیگری که در تحقیقات انجام گرفته به آن توجه نشده‌است، بررسی مانور شتابگیری در عدد فرودهای مختلف است و یا به نوعی تاثیر دورهای 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 شده‌است. در ابتدا برای تایید و صحت سنجی نتایج، و همچنین یافتن سرعت دورانی پروانه تست خودرانش انجام شده‌است. 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 موردنظر 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 جزییات جریان نیز مورد بررسی قرار گرفت.

۲ – مشخصات مدل کشتی

شبیه‌سازی‌ها برای مدل شناخته‌شده ONRT که یکی از شناور-های مرجع برای مطالعات عددی است، انجام شد. هندسه شناور شامل دو پروانه، دو سکان، بیلج کیل و اسکگ در شکل ۱ نشان داده شده‌است. 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
ضریب بلوکی	۰.۵۳۵	۰.۵۳۵
قطر پروانه(متر)		۰.۱۰۶۶
موقعیت طولی مرکز ثقل (متر)	۷۴.۴۳۱	۱.۵۲۱
موقعیت ارتفاعی مرکز ثقل (متر)		۰.۱۵۶

۳ – جزییات محاسبات

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

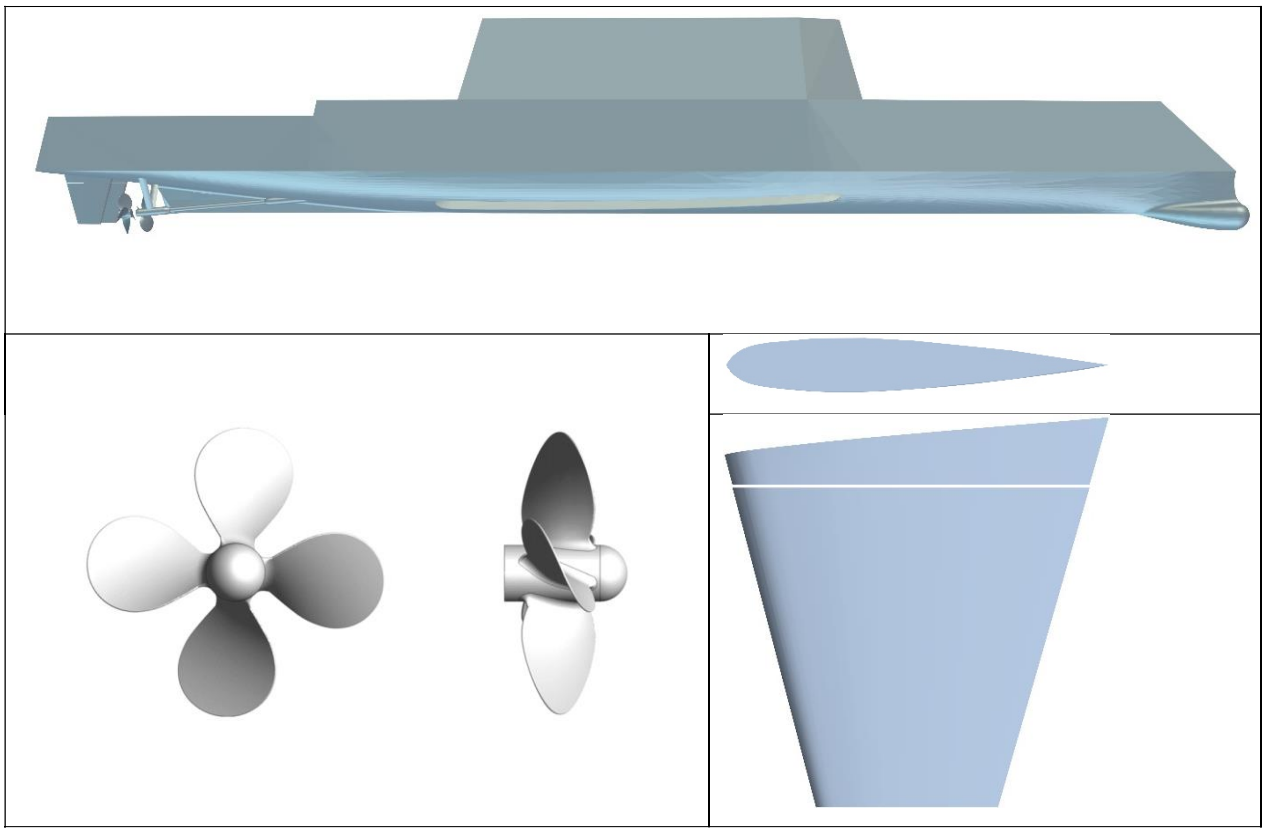
محدوده محاسباتی باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا از جریان برگشتی در مرز خروجی، از واگرا شدن موج در مرز دیواره‌ها و از اثرات آب کم عمق درمرز پایینی جلوگیری کند. در شبیه‌سازی-های خودرانش و شتابگیری، پروانه نقش اساسی را بازی می‌کند، بنابراین با وجود هزینه‌های محاسباتی بالا برای بررسی تداخل بین بدنه کشتی 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 شده‌است. 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.

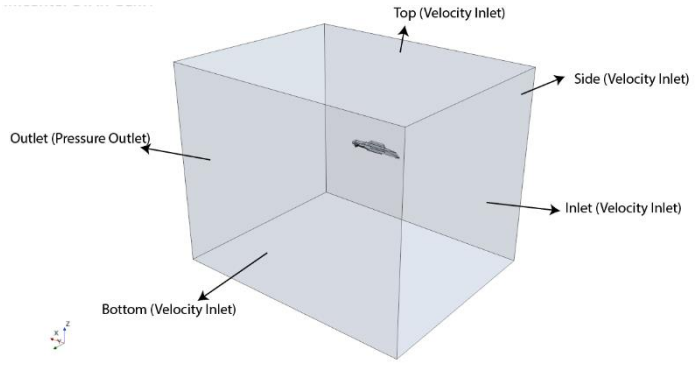
مرز	موقعیت	شرط مرزی
ورودی	۱.۵ برابر طول کشتی	ورودی سرعت
خروجی	۲.۵ برابر طول کشتی	فشار خروجی
دیواره‌ها	۲ برابر طول کشتی	ورودی سرعت
بالا	۱.۵ برابر طول کشتی	ورودی سرعت
پایین	۲.۵ برابر طول کشتی	ورودی سرعت
سطح مشترک (Interface)	۱.۲ قطر پروانه	Interface

[2] Sliding mesh.
[3] Stationary region.
[4] Rotating region.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.1.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.1]



شکل ۱- هندسه ONRT، پروانه و سکان.



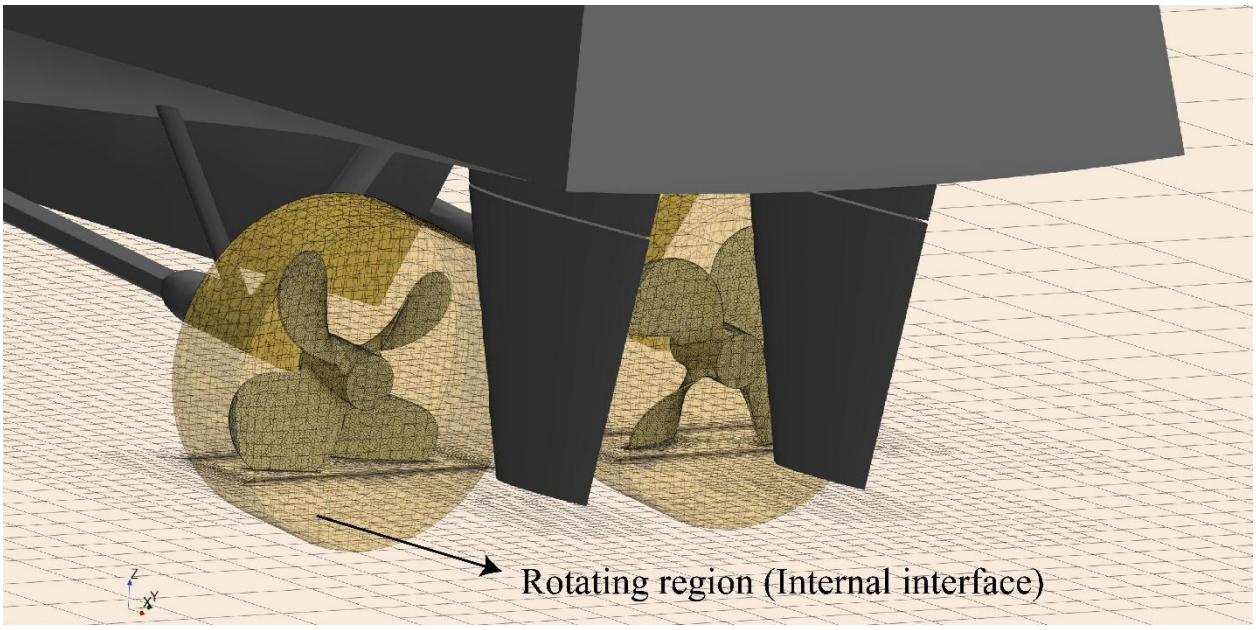
شکل ۲- محدوده محاسباتی و شرایط مرزی در شبیه‌سازی‌های خودرانش و شتابگیری.

برای شرط مرزی دیواره‌ها نیز می‌توان شرط مرزی دیواره، متقارن و یا ورودی سرعت را انتخاب کرد که در شبیه‌سازی‌هایی مانند مانور و خودرانش بهتر است از ورودی سرعت استفاده شود. شرط مرزی پایین دامنه محاسباتی ورودی سرعت در نظر گرفته شده‌است که نشان‌دهنده این است که شبیه‌سازی در آب عمیق است و شرط مرزی در بالای محدوده محاسباتی نیز به عنوان ورودی سرعت در نظر گرفته شده‌است که وجود سطح آزاد را نشان می‌دهد.

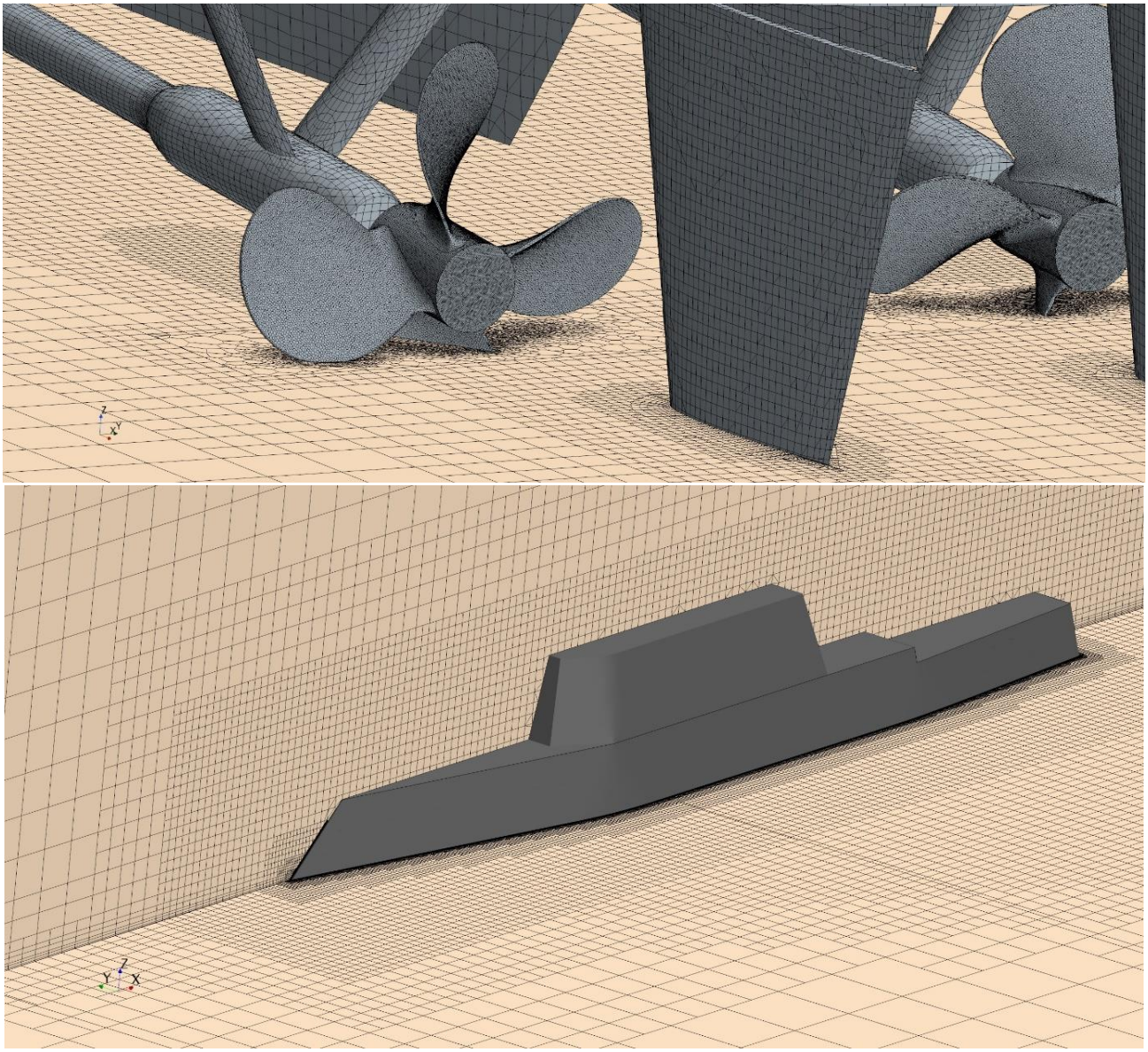
روش دینامیکی تداخل بین بدنه و سیال (DFBI) همراه با حلگر RANS حرکات انتقالی و دورانی کشتی را محاسبه می‌کند. شبیه سازی‌های تست خودرانش و شتابگیری به ترتیب به صورت سه درجه آزادی (سرج، هیو و پیچ) و شش درجه آزادی است. در هر گام زمانی، حلگر RANS نیروها و گشتاورهای حاصل از بدنه و همچنین تراست پروانه را محاسبه می‌کند. با استفاده از این داده‌ها، ماژول DFBI معادلات را حل کرده و موقعیت جدید کشتی را محاسبه می‌کند.

شبیه سازی‌ها با استفاده از یک روش مش‌بندی عددی و کارآمد و قوی بدون ساختار ، با توانایی اصلاح بهبود محلی (در نزدیکی بدنه ، در سطح آزاد و منطقه ویک) انجام می شود. برای به دست آوردن یک مش سطحی با کیفیت بالا از مش Surface remesher استفاده شد. برای تولید یک مش یکنواخت از نرخ رشد بسیار آهسته استفاده شد. تولید مش برای منطقه ثابت توسط مش شش ضلعی، و برای منطقه در حال چرخش از مش چندوجهی استفاده شد، زیرا مش چندوجهی یک حل دقیق برای هندسه‌های پیچیده ارائه می‌دهد. همچنین شبکه‌ها در قسمت‌هایی مانند سطح آزاد، اطراف سکان و پروانه به صورت ریزتر در نظر گرفته شد. یک نمای کلی از مش اطراف بدنه و پروانه در شکل ۴ نشان داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.1.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.1]



شکل ۳- محدوده محاسباتی اطراف پروانه.

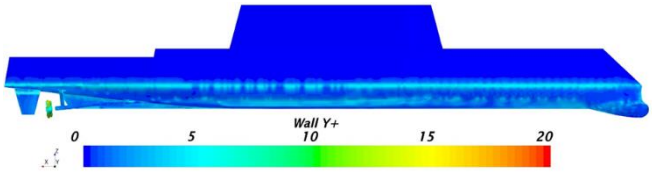


شکل ۴- نمای کلی از مش اطراف بدنه و پروانه.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.1.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.1]

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 شده‌است.

برای محاسبه کمیت‌های نامعین مانند سرعت و فشار از یک حلگر ضمنی غیردائمی استفاده می‌شود. برای افزایش سرعت همگرایی حل از الگوریتم چندشبکه‌ای جبری[5] 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 $\bar{U}$ و $\bar{P}$ میانگین سرعت و فشار و U' و P' مشتقات آن ها هستند. معادلات $RANS$ می‌توانند به شکل زیر ارائه شوند[۲۲].

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

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

[5] algebraic multigrid algorithm (AMG).

در این جا ρچگالی سیال، g شتاب گرانش و μلزجت دینامیکی سیال است. عبارت $\rho U'_iU'_j$ تانسور تنش رینولدز است که با استفاده از مدل‌های آشفتگی تخمین زده می‌شود.

۵ – تایید و اعتبارسنجی[6]

۵-۱- تایید

از آنجایی که یک شبیه سازی عددی می تواند شامل تعدادی خطا باشد ، ارزیابی دقیق نتایج با انجام تأیید و اعتبارسنجی مناسب، ضروری است.

۵-۱-۱- مطالعه شبکه

خطاهای شبیه‌سازی (E) و عدم‌اطمینان (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_{SM} و δ_{SN} به ترتیب خطاهای مدلسازی و عددی هستند.

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

در این‌جا U_S، U_{SM} و U_{SN} به ترتیب عدم‌اطمینان شبیه‌سازی، عدم قطعیت مدل‌سازی شبیه‌سازی و عدم‌قطعیت عددی هستند.

عدم‌اطمینان 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 صرف‌نظر 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 شده‌است:

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

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

[6] Verification and Validation (V&V).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.1.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.1]

با توجه به واگرایی یکنواخت تخمین خطاها و عدم‌قطعیت‌ها امکان‌پذیر نیست. برای همگرایی نوسانی، عدم‌قطعیت 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 مبنا شبکه مختلف شبیه‌سازی می‌شود. سایز مبنا، 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 مبنا (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:

$$P = \frac{\ln(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}})}{\ln(r)} \quad (۶)$$

$$GCI = F_S \frac{|\varepsilon_{21}|}{r^p - 1} \quad (۷)$$

در این F_S ضریب ایمنی است. F_S را می توان 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 اجرا شده‌است و سرعت دورانی برای این نمونه‌ها و پارامترهای همگرایی به ترتیب در جدول ۵ و ۶ ارائه شده‌است.

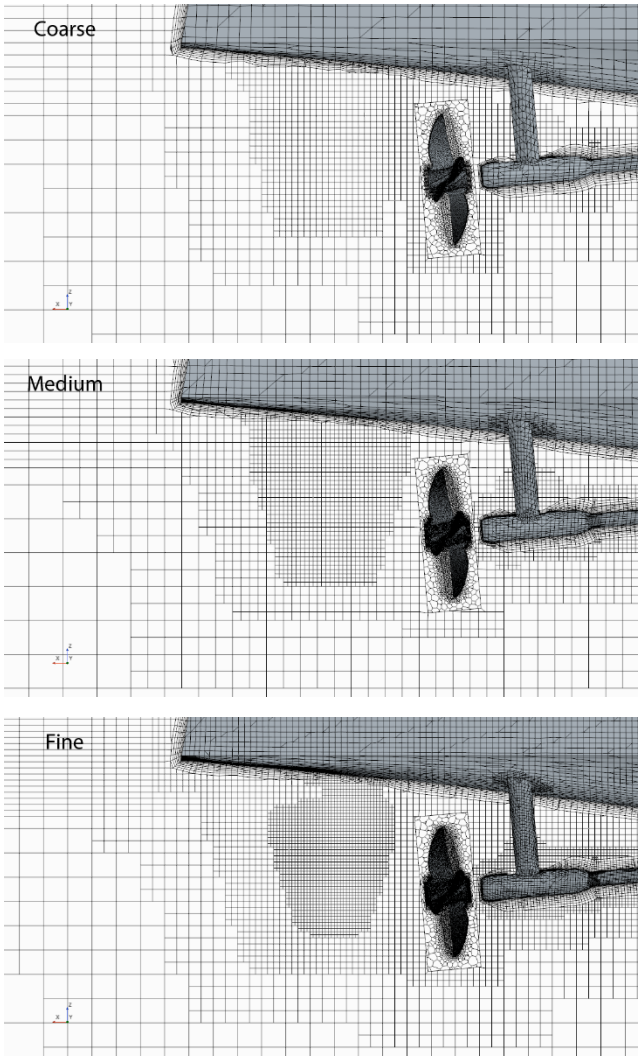
جدول ۵: سرعت دورانی پروانه برای گام‌های زمانی ۰.۰۰۱، ۰.۰۰۱۴۱ و ۰.۰۰۲.

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.

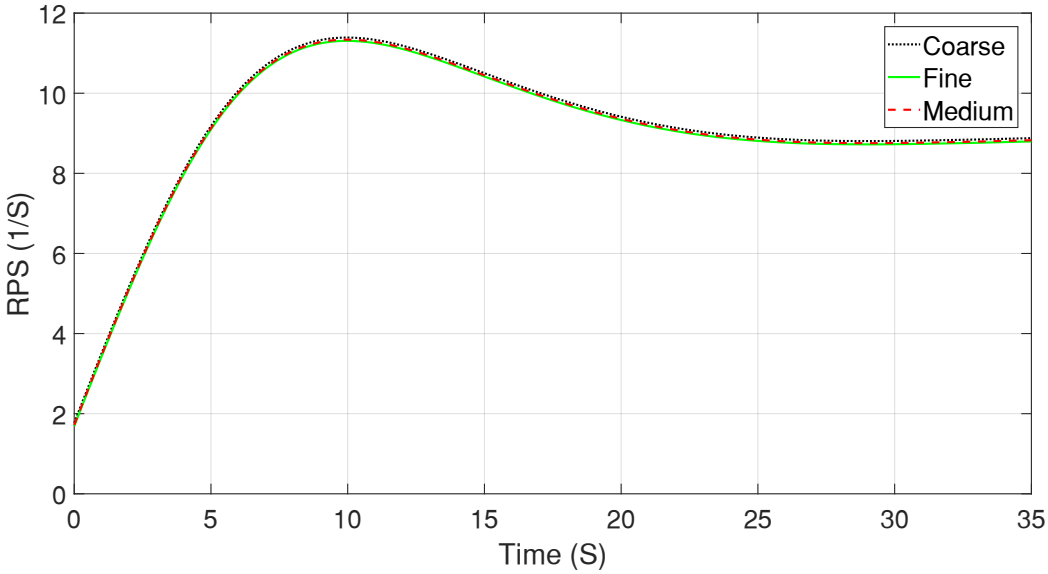
نسبت گام زمانی	R	P	GCI
۱.۴۱۴	۰.۴۲۸	۲.۴۴۵	۰.۰۰۲۸

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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.1.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.1]



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

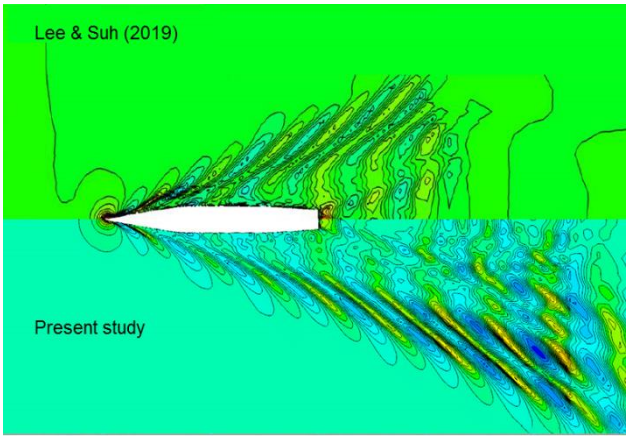
۵-۲- اعتبارسنجی

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 تقریبا مشابه است.



شکل ۸- مقایسه الگوی موج ایجاد شده در نقطه خودرانش با سایر نتایج عددی برای 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:

$$n = Pe + I\int_0^t edt \qquad (۸)$$

در این‌جا 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]:

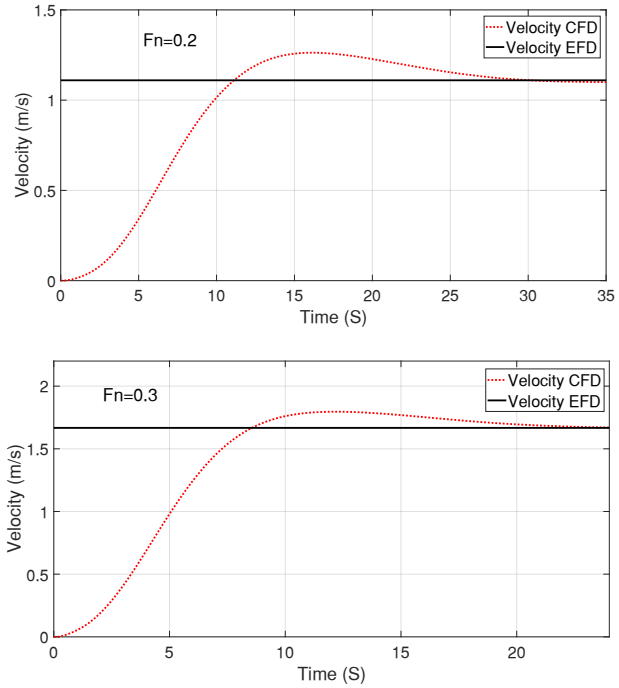
$$e = V_{Target} - V_{Ship} \qquad (۹)$$

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 ۱۳.۳۳ به دست آمد.

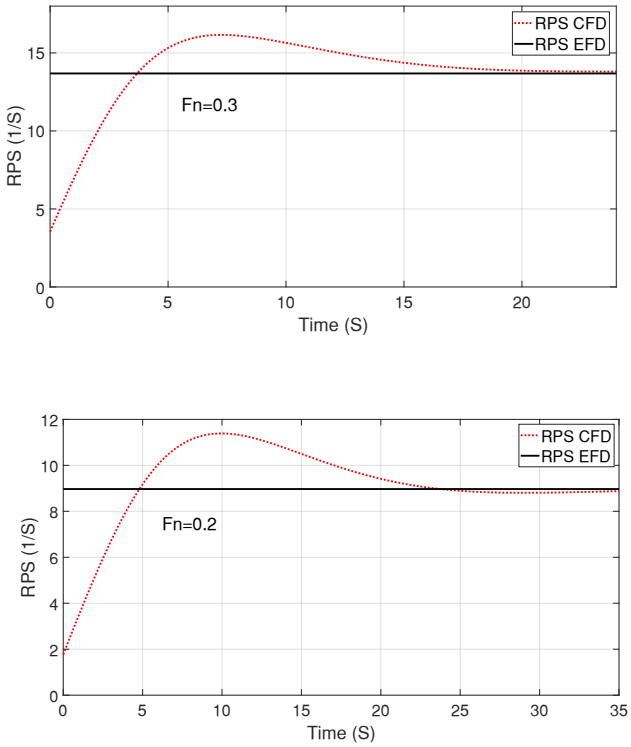
کنترلر از آغاز شبیه‌سازی فعال شده و تا زمانی که مقاومت کشتی و تراست تولیدی پروانه با هم برابر شوند سرعت دورانی پروانه را در هر گام زمانی محاسبه می‌کند، برابری مقاومت کشتی و تراست تولیدی پروانه را اصطلاحا نقطه خودرانش می‌گویند. زمانی که

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.1.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.1]

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.

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 قابل‌قبولی مشاهده می‌شود. در جدول ۸ و ۹ پارامترهای هیدرودینامیکی در شبیه‌سازی تست خودرانش با داده‌های آزمایشگاهی موجود و سایر شبیه‌سازی‌های عددی مقایسه شده است.

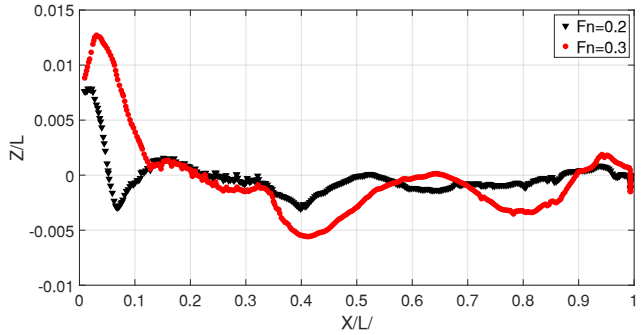
جدول ۸- مقایسه نتایج خودرانش برای عدد فرود ۰.۲.

	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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.1.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.1]

۶-۲- شتابگیری

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

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 شده‌است. 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 کرده‌است. 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.

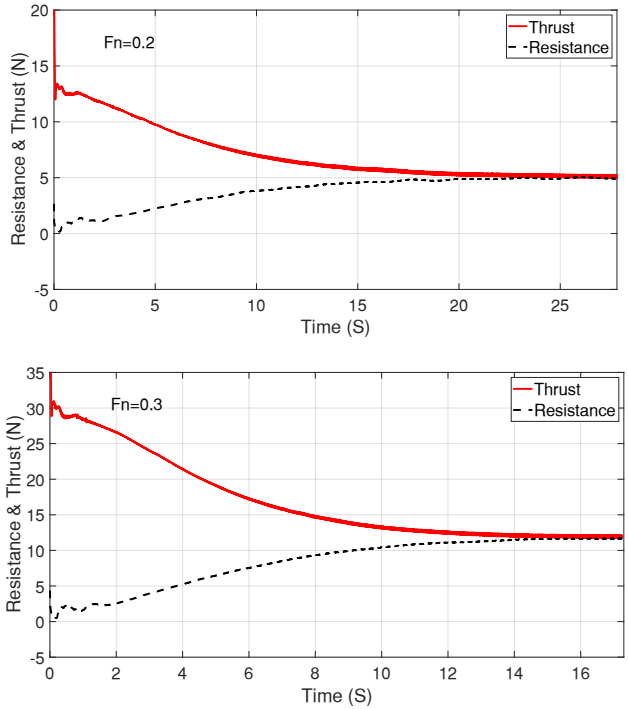
در شکل ۱۳ سرعت بدون بعد ($v' = \frac{v}{\sqrt{Lg}}$) کشتی بر حسب زمان بدون بعد ($t' = \frac{t}{\sqrt{\frac{L}{g}}}$) برای هر دو عدد فرود نمایش داده شده‌است، و با سرعت طراحی مدنظر مقایسه شده است.

جدول ۱۰- شرایط شبیه‌سازی مانور شتابگیری.

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.

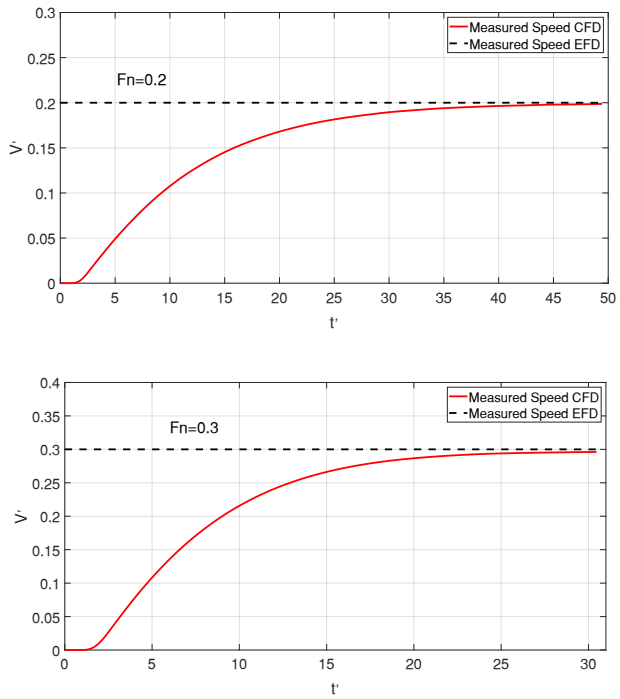
در شکل ۱۴ مسیر بدون بعد حرکت کشتی ($X'_{Adv} = \frac{X_{Adv}}{L}$) بر حسب زمان بدون بعد در مانور شتابگیری برای هر دو عدد فرود نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که در عدد فرودهای مختلف کشتی تقریبا مسافت یکسانی را طی می‌کند تا به سرعت ثابت برسد، و تنها تفاوت در زمان رسیدن به یک مسافت مشخص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

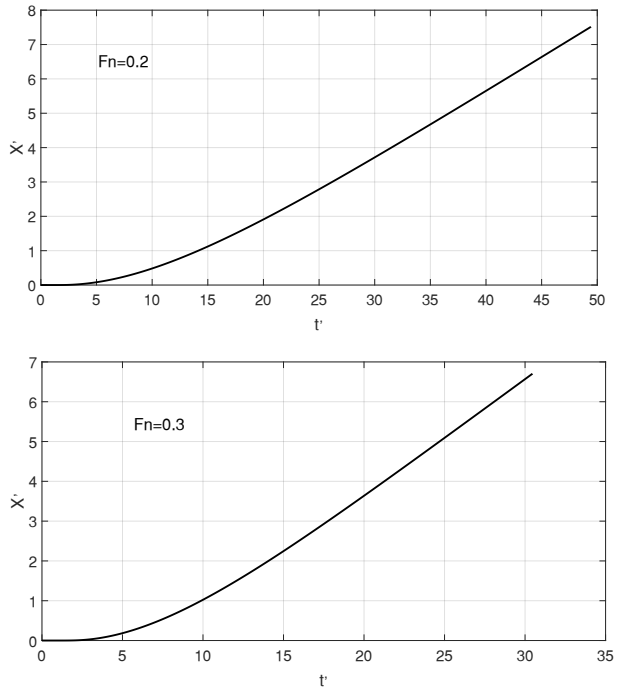
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.1.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.1]



شکل ۱۳- پیشروی سرعت حرکت کشتی در مانور شتابگیری.

مطابق با شکل ۱۵، در ابتدا شناور در سرعت صفر قرار دارد، پس از ایجاد نیروی تراست توسط پروانه شناور شتاب می‌گیرد و سرعتش افزایش پیدا می‌کند. 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 می‌شود، و پس از آن الگوی موج ایجاد شده در سینه و پاشنه با یکدیگر ادغام می‌شوند و در پایان زمانی که شناور به سرعت ثابت می‌رسد الگوی موج ایجاد شده به به طور کامل شکل گرفته‌است و امواج عرضی و واگرای کلوین بسیار واضح است. به علاوه مشاهده می‌شود 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 شده‌است، که علت آن این است که کشتی رو به جلو با سرعت حرکت می‌کند 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 می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود فشار بر روی بدنه شناور افزایش می‌یابد.



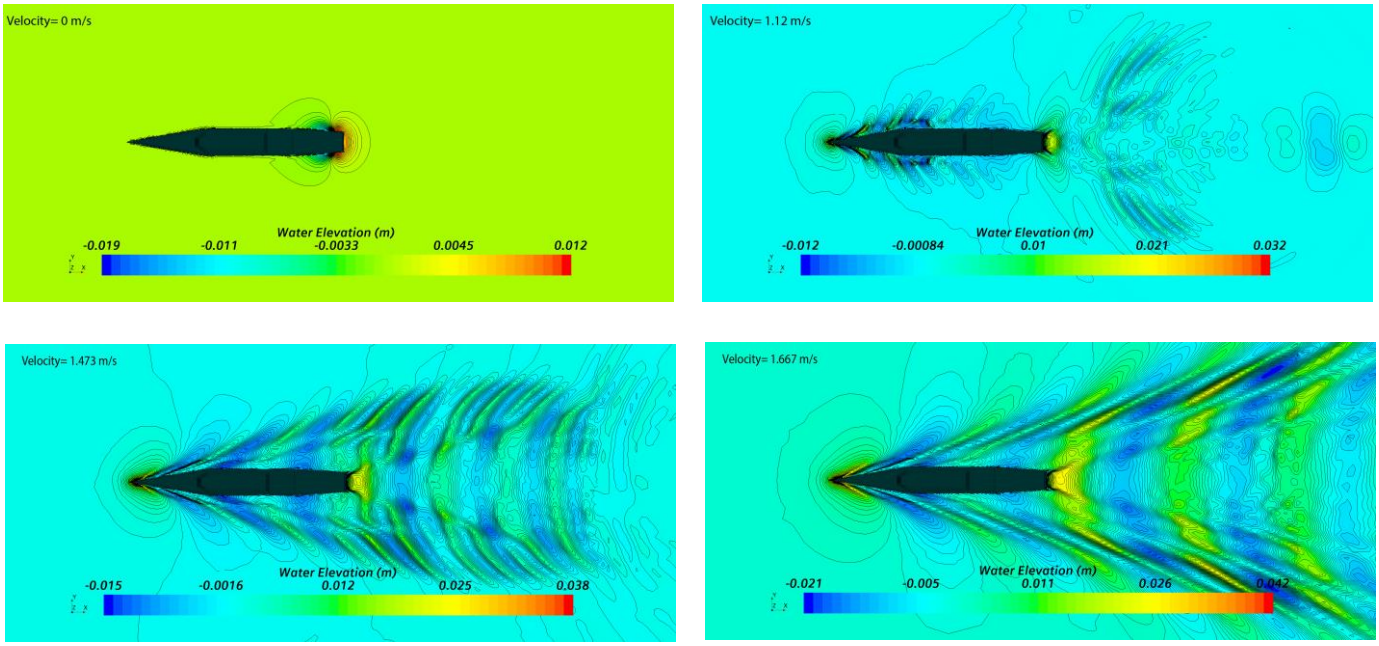
شکل ۱۴- مسافت طی شده در مانور شتابگیری.

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

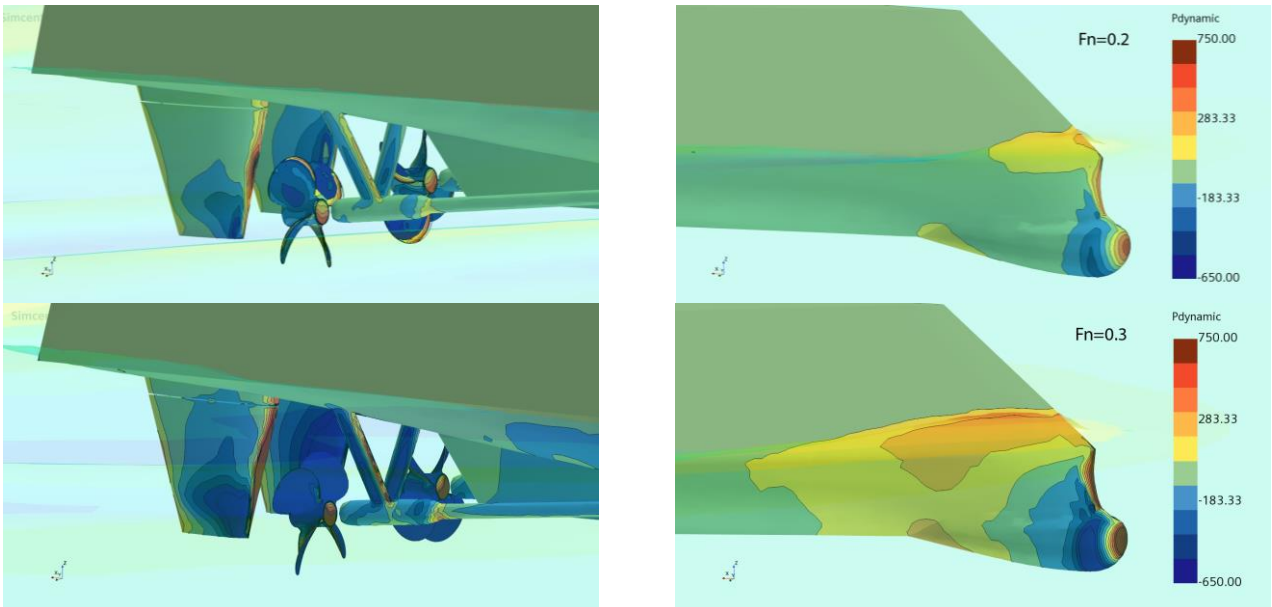
۷- نتیجه‌گیری

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 شبیه‌سازی تست خودرانش با استفاده از کنترلر انتگرالی مورد مطالعه قرار داده‌شد، 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 می‌دهد شبیه‌سازی تست خودرانش از دقت قابل‌قبولی 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 ویک پروانه در مانور شتابگیری نیز مورد مطالعه قرار داده شد و می‌توان نتیجه گرفت با افزایش عدد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.1.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.1]



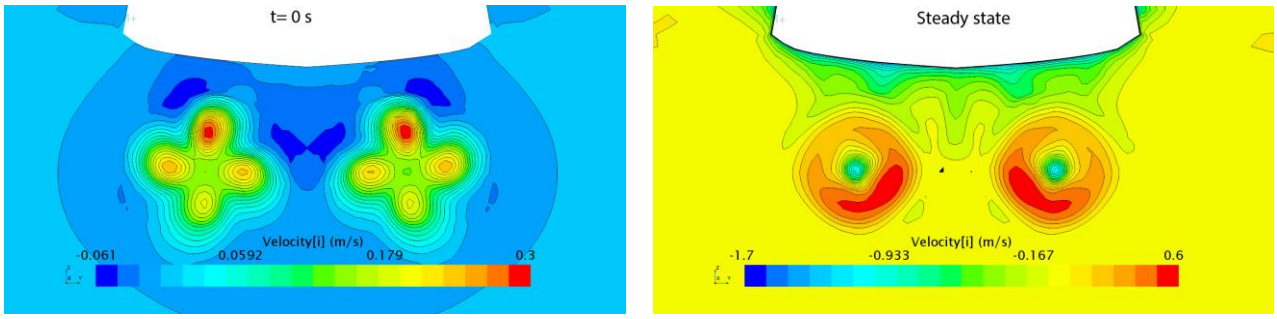
شکل ۱۵- ۴ تصویر لحظه‌ای از الکوی موج ایجاد شده در مانور شتابگیری برای عدد فرود ۰.۳.



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 عدم‌قطعیت‌های 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.1.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.1]



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

۸ - مراجع

[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 Manoeuvering 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).

[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].http ps://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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.1.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.1]

[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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.1.5]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.1]