بررسی عددی مانور توقف به روش معکوس کردن پروانه در سرعت های مختلف

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: ۱۴۰۱/۰۶/۱۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶

کلمات کلیدی:
مانور توقف
خودرانش
دینامیک سیالات محاسباتی

چکیده

قابلیت مانور یک جنبه مهم در طراحی شناورها است. با توسعه و بهره‌برداری از منابع اقیانوس ها حمل و نقل دریایی در حال افزایش است. قابلیت توقف تاثیر زیادی روی ایمنی مانور کشتی برای کشتی‌های بزرگ دارد. بنابراین، مطالعه رفتار کشتی در حین مانور توقف برای اطمینان از ایمنی ناوبری ضروری است. در این مطالعه، مانور توقف به صورت مستقیم و با تداخل بین بدنه و پروانه کشتی، معادلات متوسط زمانی ناویر استوکس و نرم‌افزار تجاری Star-CCM+ مورد بررسی قرار گرفته‌است. شناور شناخته شده KVLCC2 به منظور مطالعه بر روی پارامترهای مانور توقف انتخاب شده‌است. برای رسیدن کشتی به سرعت طراحی تست خودرانش با استفاده از یک کنترلر انتگرالی انجام شده‌است. تایید و اعتبارسنجی نتایج مطابق با توصیه‌های ITTC مورد مطالعه قرار گرفته‌است. از مقایسه نتایج به دست آمده در تست خودرانش و همچنین مانور توقف با برخی از داده‌های آزمایشگاهی موجود دقت قابل‌قبولی به دست آمد و جزییات پارامترهای جریان، شامل توزیع فشار و الگوی ویک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

Numerical investigation of stopping maneuver by reversing propeller at different speeds

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: 06 Sep 2022
Accepted: 07 Mar 2023

Keywords:
Stopping Maneuver
Self-Propulsion
CFD

ABSTRACT

Maneuverability is an important aspect of marine vehicle design. With the development and utilization of ocean resources, maritime transportation is becoming increasingly busy. Stopping ability has great effect on the safety of ship maneuvering for those large ships. Therefore, it is necessary to study the behavior of the ship during the stopping maneuver to ensure the safety of navigation. In this study, the stopping maneuver has been investigated directly and with interaction between the ship's hull and propeller, Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations and Star-CCM+ commercial software. well-known vessel KVLCC2 have been selected to study the parameters of the stopping maneuver. In order to reach the design speed of the ship, the self-propulsion test has been carried out using a PI integral controller. Verification and validation of the results have been studied according to ITTC recommendations. By comparing the results obtained in the self-propulsion test as well as the stopping maneuver with some available experimental data, a good accuracy was obtained and the details of the flow parameters, including pressure distribution and wake pattern, were analyzed.

۱ – مقدمه

در سال‌های اخیر، به منظور کاهش هزینه‌های ناوبری و بهبود کارایی حمل و نقل دریایی ابعاد کشتی‌ها بزرگتر شده‌اند. ازآنجایی‌که ابعاد بزرگ مانورپذیری کشتی را کاهش داده‌است، این

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.5.9]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.51]

امر می‌تواند به راحتی در کانال‌ها و بندرهای شلوغ سبب تصادف شود. به علاوه، این نکته نیز حائز اهمیت است که بر روی قابلیت توقف شناورهای بزرگ مطالعه شود تا از تصادم جلوگیری شود و ایمنی کشتی را در نزدیک بندر تضمین کند[۲]. عموما، کشتی نیاز به کاهش سرعت دارد تا از تصادم جلوگیری کند. معمولا معکوس کردن چرخش پروانه متداول‌ترین روش برای این کار است. در این روش سینه کشتی به تدریج به سمت چپ یا راست تغییر جهت می‌دهد، این امر به خاطر این است که معکوس کردن پروانه سبب می‌شود که نیروهای جانبی متفاوتی به قسمت پاشنه کشتی وارد شود. وجود نیروی جانبی ایجاد شده از معکوس کردن پروانه به وسیله چیسلت و اسمیت از طریق آزمایش مدل کشتی پیدا شده است [۳].

خط سیر تقریبی توقف شناور ها در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱، Track Reach همان طول مسیر حرکت کشتی، Head Reach فاصله افقی توقف و Lateral Deviation انحراف کشتی یا همان حرکت سوی است. یک مانور توقف خوب به این معنی است که حداقل فاصله توقف، فاصله افقی و زاویه یاو ایجاد شود. برای بررسی پارامترهای مانور توقف شناورها دو روش آزمایشگاهی و عددی وجود دارد. روش آزمایشگاهی بسیار پر هزینه است و در این روش نمی‌توان جزییات جریان اطراف شناور را به درستی مورد مطالعه قرار داد. بنابراین شبیه‌سازی عددی می‌تواند روش جایگزین بهتری باشد. روش عددی برای مانور توقف کشتی عمدتا مبتنی بر شبیه‌سازی در ابعاد مدل کشتی است. مانور توقف باید از سرعت طراحی شروع شود (حداقل نباید کمتر از ۹۰ درصد سرعت طراحی کشتی باشد). وقتی که کشتی به سرعت تست برسد و همه ماشین آلات مرتبط در حال کار باشند و به حالت پایدار برسند پروانه را معکوس کرده تا تست توقف انجام شود. این تست زمانی کامل می‌شود که سرعت کشتی به صفر برسد [۴].

نوع دیگری از مانور توقف غیر از معکوس کردن پروانه نیز وجود دارد، که آن متوقف کردن موتور است، که در این روش کشتی به مسافت و زمان بیشتری برای توقف نیاز دارد. به طور کلی با توجه به الزامات IMO طول مسیر توقف کشتی نباید بیش از ۱۵ برابر طول کشتی باشد[۲]. با این حال، در مورد کشتی‌هایی با جابجایی بزرگ و قدرت کم، این مقدار می‌تواند تغییر کند، اما در هیچ موردی نباید از ۲۰ برابر طول کشتی تجاوز کند.

در سال‌های اخیر چندین مطالعه بر روی قابلیت توقف شناورها به هر دو روش عددی و آزمایشگاهی انجام شده‌است. پارک و همکاران [۵] توانایی توقف یک شناور در مقیاس کامل را با استفاده از پروانه آزیموث در سرعت ۴/۶۳ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این مطالعه از پنج روش مختلف برای بررسی قابلیت توقف استفاده کردند، زیرا استفاده از پروانه آزیموث راه‌های مختلفی را برای توقف شامل می‌شود و در پایان پنج روش مورد مطالعه را با یکدیگر مقایسه کردند.

وانگ و وان [۶] تست خودرانش و مانور توقف شناور KVLCC1 را با استفاده از تکنیک مش دینامیکی Overset و با استفاده از پروانه واقعی در سرعت ۰/۷۶ متر بر ثانیه به روش عددی شبیه-سازی کردند. برای این منظور آن‌ها ابتدا تست خودرانش شناور را با استفاده از یک کنترلر مورد بررسی قرار دادند. نویسندگان مانور توقف را به وسیله معکوس کردن دور پروانه و در سه حالت مختلف یعنی (بدون سکان، سکان به سمت راست کشتی و سکان به سمت چپ کشتی) بررسی کردند و از مقایسه نتایج به دست آمده از حل با نتایج آزمایشگاهی دقت خوبی را نشان دادند. با این حال، آن‌ها از بحث در مورد عدم‌قطعیت‌های عددی غفلت کردند.

دومان و بال [۷] 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 تکنینک 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. نویسندگان نتایج قابل قبولی را از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی نشان دادند با این حال آن‌ها اثر پروانه در طی مانور شتابگیری و توقف شناور را در نظر نگرفتند و به همین دلیل از بررسی مانور توقف به روش معکوس کردن پروانه غفلت کردند.

یونو و همکاران [۸] مانور توقف شناور KVLCC2 را به صورت سه درجه آزادی مورد مطالعه قرار دادند. برای این هدف، آن‌ها از دو روش تست مدل آزمایشگاهی و معادلات ریاضی استفاده کردند. در این مطالعه آن‌ها از ۴ سرعت مختلف استفاده کردند و برای بررسی مانور توقف از روش معکوس کردن پروانه استفاده کردند.

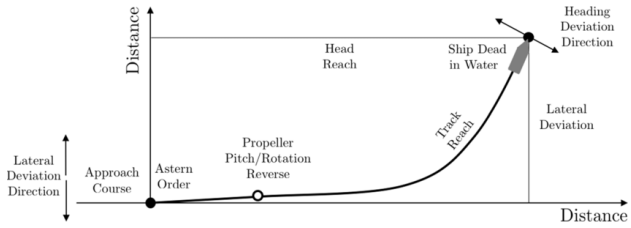
در یکی از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده، ژنگ و همکاران [۹] مانورهای شتابگیری، توقف، دور زدن و زیگزاگ را برای شناور KCS در سرعت ۱/۱ متر بر ثانیه به صورت آزمایشگاهی در آب آزاد انجام دادند. به علاوه، برای بررسی مانور توقف از روش معکوس کردن پروانه استفاده کردند.

در این مطالعه مانور توقف برای مدل شناور KVLCC2 با استفاده از محیط دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی مانورپذیری شناور KVLCC2 دو عدد فرود یعنی (۰/۰۹۸۱ و ۰/۱۴۲) انتخاب شده است. تمام شبیه‌سازی‌ها با

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.5.9]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.51]

استفاده از تداخل مستقیم بین بدنه کشتی و پروانه است، یعنی برای تولید تراست رو به جلوی کشتی از مدل واقعی کشتی استفاده شده است و پروانه به صورت مستقیم مدلسازی شده است. به علاوه، برای رسیدن کشتی به سرعت طراحی تست خودرانش با استفاده از یک PI کنترلر مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه براین، روش دینامیکی تداخل بین بدنه و سیال (DFBI) همراه با حلگر RANS حرکات انتقالی و دورانی کشتی را محاسبه می‌کند.

یکی از ویژگی‌های این پژوهش، بررسی مانور توقف در سرعت‌های مختلف است. همچنین، عدم‌قطعیت‌های عددی در مطابق با استانداردهای ITTC مورد مطالعه قرار می‌گیرد.



شکل ۱- مسیر حرکت کشتی در مانور توقف [۴].

۲ – جزییات مدل هندسی و عددی

این قسمت هندسه کشتی و پروانه، روش‌های عددی و تکنیک‌های به کار رفته در شبیه‌سازی تست خودرانش و مانور توقف را شرح می‌دهد.

۲ –۱– مشخصات مدل بدنه و پروانه

مدل شناخته شده KVLCC برای شبیه‌سازی و بررسی عددی تست خودرانش استفاده شده است. مدل KVLCC یک شناور تک پروانه است که به عنوان شناور مرجع برای شبیه‌سازی‌های عددی توسط محققان در کارگاه Simman 2020 ارائه شده است. در این مطالعه از مقیاس ۱/۱۱۰ برای شناور KVLCC استفاده شده است. هندسه شناور KVLCC در شکل ۲ نشان داده شده‌است. همچنین مشخصات اصلی شناور در جدول آورده شده است.

شکل ۲- هندسه شناور KVLCC2.

۲ –۲– 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 [۱۱].

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

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

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.

جدول ۱: پارامترهای اصلی شناور KVLCC2 [۱۰].

پارامترها	کشتی	مقیاس مدل
طول بین دو عمود (متر)	۳۲۰	۲/۹۰۹۱
عرض (متر)	۵۸	۰/۵۲۷۳
ارتفاع ساختمانی(متر)	۳۰	۰/۲۷۲۷
آبخور(متر)	۲۰/۸	۰/۱۸۹۱
جابجایی(متر مکعب)	۳۱۲۷۳۸	۲۳۵
مساحت سطح خیس(مترمربع)	۲۷۳۲۰	۲/۲۵۷۹
ضریب بلوکی	۰/۸۱۰۱	۰/۸۱۰۱
قطر پروانه(متر)	۹/۸۶	۰/۰۹
موقعیت طولی مرکز ثقل (متر)	۱۶۸/۱۶۸	۱/۵۲۸۸۸

۲ –۳– جزییات شبیه سازی عددی

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. دراین 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 دیواره ها و از اثرات آب کم عمق درمرز پایینی جلوگیری کند.

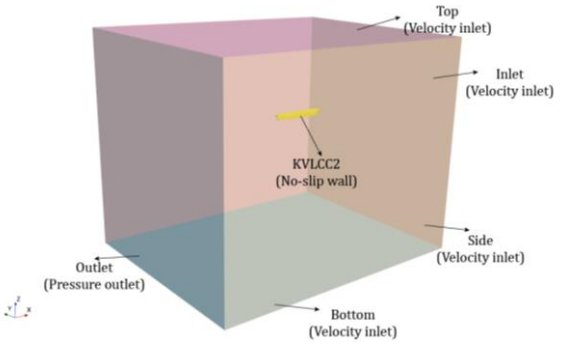
در شبیه‌سازی خودرانش و مانور، پروانه نقش اساسی را بازی می‌کند، بنابراین با وجود هزینه‌های محاسباتی بالا برای بررسی تداخل بین بدنه کشتی و پروانه و سکان، بهتر است به جای استفاده از دیسک مجازی، پروانه واقعی مدلسازی شود. از تکنیک مش لغزشی (Sliding mesh) برای شبیه‌سازی مش دینامیکی اطراف پروانه استفاده شده‌است. تکنیک مش لغزشی نیازمند دو ناحیه مختلف، یعنی ناحیه ثابت (Stationary) و ناحیه در حال چرخش (Rotating) است. ناحیه در حال چرخش دارای یک

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.5.9]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.51]

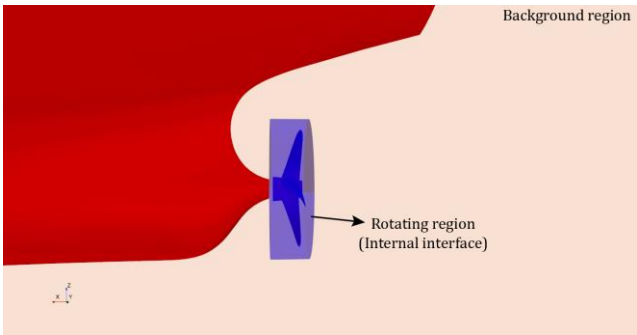
سطح مشترک لغزشی با ناحیه ثابت است که در هر گام زمانی به روز رسانی می‌شود.

ابعاد محدوده‌های محاسباتی با توجه با استانداردها و توصیه‌های ITTC است [۱۲]. شکل ۳ یک نمای کلی از محدوده محاسباتی 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 ۴ به صورت واضح نشان داده شده است). همچنین تعیین شرایط مرزی در شبیه‌سازی‌های عددی بسیار حائز اهمیت است. با توجه به شکل ۳ 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. 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. در هر گام زمانی، حلگر RANS نیروها و گشتاورهای حاصل از بدنه و همچنین تراست پروانه را محاسبه می‌کند. با استفاده از این داده-ها، ماژول DFBI معادلات سه درجه آزادی را حل کرده و موقعیت جدید کشتی را محاسبه می‌کند.

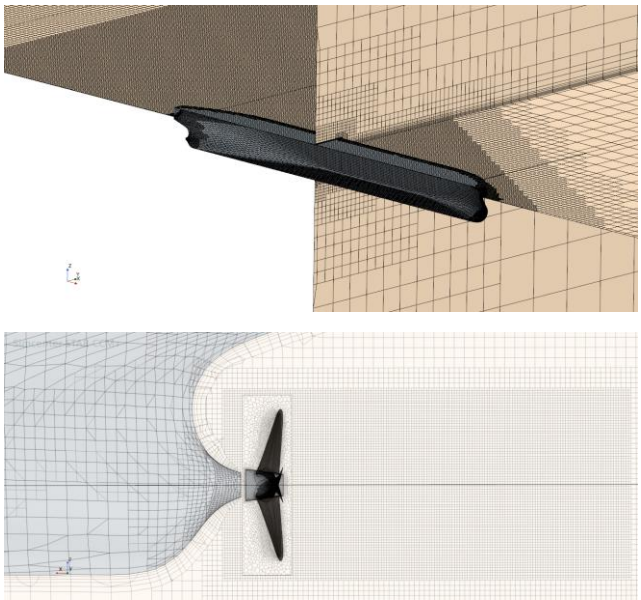


شکل ۳- نمای کلی از محدوده محاسباتی اطراف شناور.



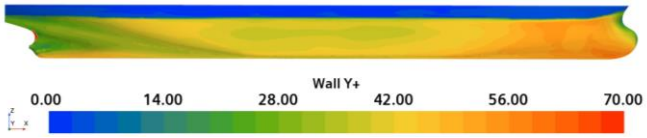
شکل ۴- نمای کلی از محدوده محاسباتی اطراف پروانه.

شبیه سازی ها با استفاده از یک روش مش بندی عددی و کارآمد و قوی بدون ساختار ، با توانایی اصلاح بهبود محلی (در نزدیکی بدنه ، در سطح آزاد و منطقه ویک) انجام می‌شود. 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 قسمت-هایی مانند سطح آزاد و اطراف پروانه به صورت ریزتر در نظر گرفته شد. یک نمای کلی از مش اطراف بدنه و پروانه در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- نمای کلی از مش اطراف بدنه و پروانه.

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. شکل ۶ توزیع مقدار y^+ بر روی بدنه را نشان می‌دهد.



شکل ۶- توزیع مقدار Y^+ بر روی بدنه.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.5.9]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.51]

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[1] استفاده شد [۱۳].

گام زمانی برای ثبات همگرایی نتایج عددی، به ویژه برای مدلسازی دقیق چرخش پروانه بسیار مهم است. گام زمانی طوری انتخاب می‌شود که پروانه در هر گام زمانی بین ۰/۵ تا ۲ درجه پیشروی کند [۱۴]. با این حال گام زمانی باید طوری انتخاب شود که عدد کورنت بزرگ نشود. به طور کلی عدد کورنت کوچکتر یا مساوی با عدد یک ثبات در راه‌حل‌های عددی را نشان می‌دهد. با توجه به استاندارهای ITTC مقدار گام زمانی برابر عدد ۰/۰۰۲ ثانیه انتخاب شد.

۳ – تایید و اعتبارسنجی

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

۳ –۱– تایید

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 [۱۵]:

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

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

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

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.

[1] Algebraic Multigrid Algorithm (AMG)

[۱۶]. سرعت دورانی پروانه در عدد فرود ۰/۱۴۲ به عنوان آنالیز تایید مورد تحلیل قرار می‌گیرد. برای تحلیل تغییر در راه‌حل‌ها نسبت همگرایی به شرح زیر تعریف شده‌است:

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

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

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، تست خودرانش شناور KVLCC2 با سه مش مختلف (g_1، g_2 و g_3) سه سایز مبنا شبکه مختلف شبیه-سازی می‌شود. سایز مبنا، تعداد شبکه و سرعت دورانی محاسبه شده در تست خودرانش درجدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: سرعت دورانی پروانه در عدد فرود ۰/۱۴۲ برای مش های ریز، متوسط و درشت.

سایز مبنا (متر)	تعداد نقاط شبکه	سرعت دورانی پروانه (دور بر ثانیه)
۰/۰۴	۵۱۷۳۱۶۳	۱۶/۷۷
۰/۰۵۶۵	۲۲۸۲۱۹۸	۱۶/۸۲
۰/۰۷۷	۱۴۵۱۱۴۵	۱۶/۹

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

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

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

در این‌جا F_S ضریب ایمنی است. F_S را می توان عدد ۱/۲۵ در نظر گرفت. همچنین GCI بیانگر فاصله مقادیر محاسبه شده از

[2] Grid convergence index

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.5.9]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.51]

مقدار دقیق است. مقدار تئوری برای مرتبه دقت عدد ۲ است. ترتیب محاسبه شده از مقادیر گسسته‌سازی و GCI در جدول ۳ ارائه شده‌است.

جدول ۳: مقادیر R، P و GCI برای سرعت دورانی پروانه در عدد فرود ۰/۱۴۲

نسبت شبکه	R	P	GCI
۱/۴۱۴	۰/۶۲۵	۱/۳۵۶	۰/۶

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 R،P 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 ۴ و ۵ ارائه شده‌است.

جدول ۴: سرعت دورانی پروانه در عدد فرود ۰/۱۴۲ برای گام زمانی ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۱۴۱ و ۰/۰۰۲.

گام زمانی (ثانیه)	سرعت دورانی (دور بر ثانیه)
۰/۰۰۱	۱۶/۸۳
۰/۰۰۱۴۱	۱۶/۸۸
۰/۰۰۲	۱۶/۹

جدول ۵: P، R و GCI برای مطالعه گام زمانی.

نسبت گام زمانی	R	P	GCI
۱/۴۱۴	۰/۴	۲/۶۴۵	۱/۵

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.

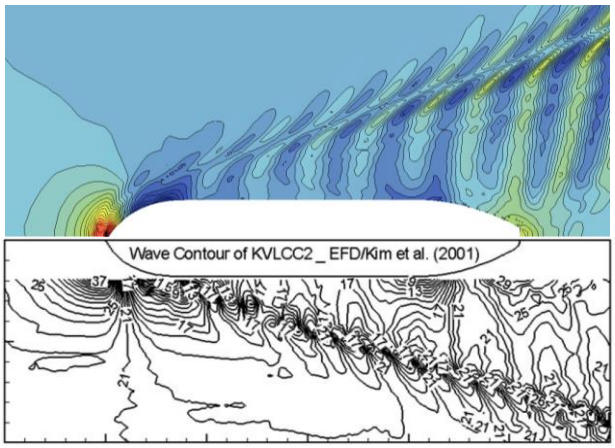
۳-۲-اعتبارسنجی

به طور کلی، نتایج شبیه‌سازی عددی باید با نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شوند. از این رو، نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط یونو و همکاران [۸] برای اعتبارسنجی استفاده شد. جدول ۶ سرعت دورانی پروانه را با داده‌های آزمایشگاهی و سایر نتایج عددی [۶] مقایسه می‌کند.

جدول۶: مقایسه نتایج عددی شناور KVLCC با نتایج آزمایشگاهی در تست خودرانش برای عدد فرود ۰/۱۴۲

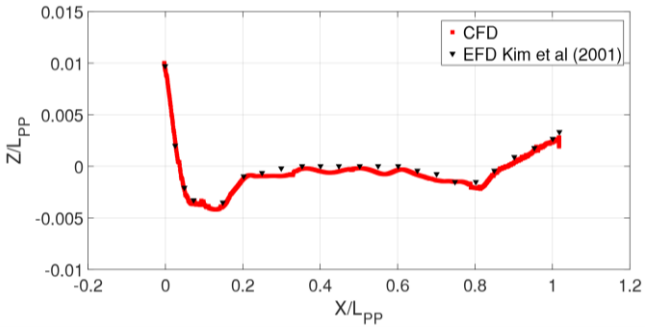
نتایج آزمایشگاهی [۸]	مطالعه عددی	وانگ و وان [۶]	خطا (درصد)
۱۷/۲	۱۶/۹	۱۷/۰۲	-۱/۷۴۴

علاوه بر این، نتایج حل عددی باید به صورت جزئی نیز با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شود. در شکل ۷ الگوی موج به دست آمده از حل عددی در تست خودرانش برای عدد فرود ۰/۱۴۲ با الگوی موج به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی [۱۷] مقایسه شده‌است. از مقایسه الگوی موج دقت بسیار خوبی مشاهده می‌شود و امواج عرضی و واگرا و همچنین ارتفاع موج مشابه نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.



شکل ۷: مقایسه الگوی موج به دست آمده از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی برای عدد فرود ۰/۱۴۲.

علاوه بر این، شکل ۸ ارتفاع بدون بعد موج بر در امتداد بدنه را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌کند و دقت بسیار خوبی را برای ارتفاع موج بر روی بدنه نشان می‌دهد.



شکل ۸: مقایسه ارتفاع بدون بعد موج بر روی بدنه با نتایج آزمایشگاهی در عدد فرود ۰/۱۴۲.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.5.9]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.51]

۴ – نتایج

در این قسمت نتایج تست خودرانش و مـانور توقـف بـرای شـناور KVLCC ارائه می‌شود.

۴ –۱– نتایج خودرانش

در این قسمت نتایج مربوط به شبیه‌سازی‌های تست خودرانش برای شناور KVLCC ارائه می‌شود. تست خودرانش برای شناور KVLCC در دو فرود (۰/۰۹۸۱ و ۰/۱۴۲) انجام شد. به علاوه تمام شبیه‌سازی به صورت یک درجه آزادی (سرج) است. همچنین نتایج حاصل از حل عددی با برخی داده‌های آزمایشگاهی موجود و سایر مطالعات عددی مقایسه می‌شود. به منظور بررسی مانور توقف، 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.

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 [۱۸]:

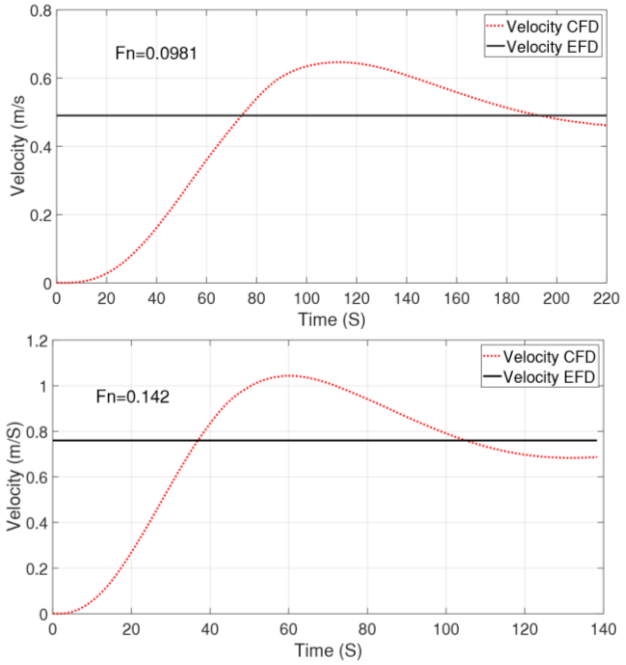
$$e = V_{Target} - V_{Ship} \qquad (۹)$$

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.

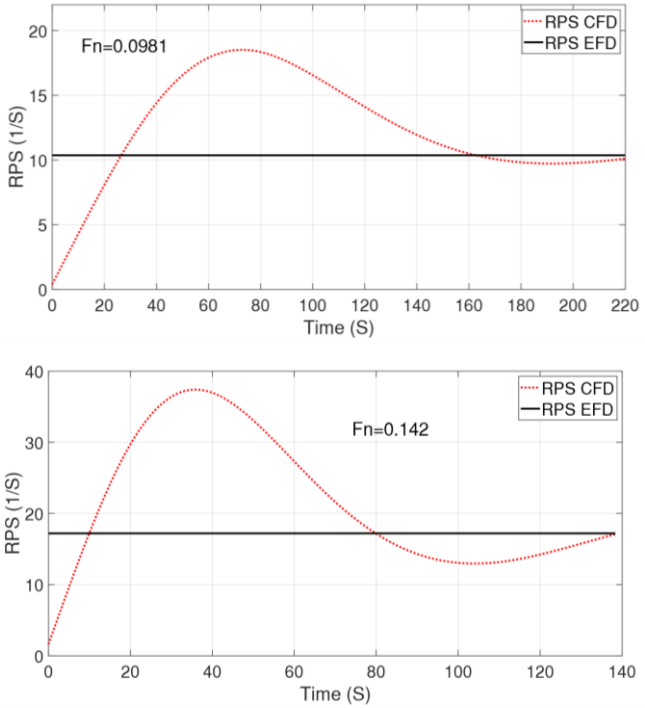
کنترلر از آغاز شبیه‌سازی فعال شده و تا زمانی که مقاومت کشتی و تراست تولیدی پروانه با هم برابر شوند سرعت دورانی پروانه را در هر گام زمانی محاسبه می‌کند، برابری مقاومت کشتی و تراست تولیدی پروانه را اصطلاحا نقطه خودرانش می‌گویند. زمانی که شناور به نقطه خودرانش می‌رسد سرعت دورانی پروانه برای رسیدن کشتی به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

در شکل ۹ نمودار سرعت کشتی بر حسب زمان در تست خودرانش برای هر دو عدد فرود نشان داده شده‌است.

با توجه به شکل‌های ۹ خطوط سیاه سرعتی است که شناور برای انجام مانور توقف نیاز دارد تا به این سرعت برسد، و خطوط قرمز مربوط به سرعت حرکت شناور در تست خودرانش است. در ابتدا شناور در سرعت صفر قرار دارد، اما پس از اینکه کنترلر سرعت دورانی پروانه را افزایش می‌دهد، تراست تولیدی نیز افزایش می‌یابد و سرعت شناور بیش از حد بزرگ می‌شود و زمانی که خطای کنترلر کم می‌شود سرعت حرکت کشتی به سمت سرعت طراحی مدنظر میل می‌کند و همگرا می‌شود. به علاوه، از مقایسه سرعت حرکت کشتی در اعداد فرود مختلف مشاهده می‌شود که هر چه عدد فرود بیشتر شود، سرعت همگرایی بیشتر است.



شکل ۹- سرعت حرکت کشتی در تست خودرانش



شکل ۱۰- سرعت دورانی پروانه در تست خودرانش

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.5.9]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.51]

زمانی که سرعت شناور به همگرایی می‌رسد سرعت دورانی پروانه نیز همگرا می‌شود و به یک مقدار ثابت می‌رسد. نمودار تغییرات سرعت دورانی پروانه توسط کنترلر برای شناور KVLCC در شکل ۱۰ برای هر دو عدد فرود نشان داده شده‌است.

با توجه به شکل ۱۰، از مقایسه سرعت دورانی پروانه در تست خودرانش با سرعت دورانی به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی دقت بسیار خوبی مشاهده می‌شود و درصد خطا کمتر از ۳ درصد است.

پس از همگرایی شبیه‌سازی‌ها پارامترهای مورد نظر در تست خودرانش شامل سرعت کشتی، سرعت دورانی پروانه، ضریب مقاومت کشتی، ضریب تراست و ضریب گشتاور را می‌توان استخراج کرد، و با برخی نتایج آزمایشگاهی موجود و سایر محققان در زمینه عددی مقایسه کرد. در جدول ۷ و ۸ ضرایب به دست آمده از تست خودرانش به ترتیب برای عدد فرود ۰/۰۹۸۱ و ۰/۱۴۲ آورده شده‌است.

جدول ۷: مقایسه نتایج عددی شناور KVLCC با نتایج آزمایشگاهی در تست خودرانش برای عدد فرود ۰/۰۹۸۱

	EFD [۸].	CFD	Error (%)
n(RPS)	۱۰/۳۶	۱۰/۱	- ۲/۵
V(m/s)	۰/۴۹۰۵	۰/۴۶۲	- ۵/۸
k_t		۰/۱۸۷	
$C_t \times 10^3$		۵/۴۲۳	
k_Q		۰/۰۲۷۱	

جدول ۸: مقایسه نتایج عددی شناور KVLCC با نتایج آزمایشگاهی در تست خودرانش برای عدد فرود ۰/۱۴۲

	EFD [۸].	CFD	CFD [۶].	Error (%)
n(RPS)	۱۷/۲	۱۶/۹	۱۷/۰۲	- ۱/۷۴۴
V(m/s)	۰/۷۶	۰/۷۲۴		- ۴/۷۳
k_t		۰/۱۵۲		
$C_t \times 10^3$		۲/۴		
k_Q		۰/۰۲۳		

۴ -۲- نتایج مانور توقف

در این بخش نتایج مربوط به مانور توقف برای دو شناور شرح داده می‌شود. به طور کلی معکوس کردن رایج‌ترین روش، برای زمانی است که یک کشتی با ابعاد بسیار بزرگ نیاز به توقف برای جلوگیری از تصادم دارد. همچنین، این روش سریع‌ترین راه برای توقف کشتی است، که اصطلاحا با عنوان شرایط کاملا رو به عقب (Full astern) شناخته می‌شود.

ساده‌ترین روش برای بررسی قابلیت توقف کشتی، شبیه‌سازی یک درجه آزادی، یعنی سرج است. با این حال در طی مانور توقف انحراف عرضی کشتی بسیار حائز اهمیت است. در این مطالعه مانور توقف به صورت سه درجه آزادی شامل سرج، سوی و یاو بررسی می‌شود.

بررسی مانور توقف با معکوس کردن پروانه با رسیدن کشتی به حالت پایدار و ثابت شدن سرعت حرکت کشتی شروع می‌شود. در جدول ۹ شرایط توقف برای شناور KVLCC نشان داده شده‌است.

جدول ۹: شرایط مانور توقف برای شناور KVLCC

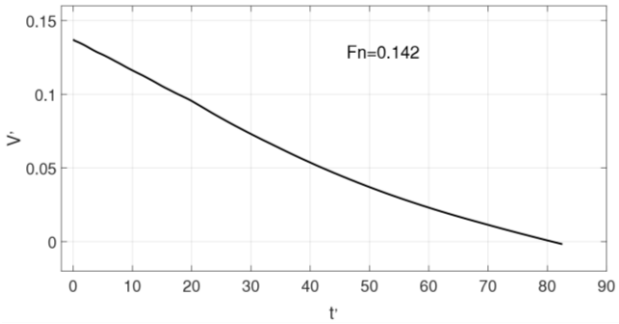
عدد فرود	سرعت دورانی پروانه (متر بر ثانیه)
۰/۰۹۸۱	- ۱۰/۳۶
۰/۱۴۲	- ۱۷/۲

پس از رسیدن کشتی به سرعت ثابت، پروانه به صورت معکوس شروع به چرخش می‌کند. به عنوان مثال برای توقف شناور KVLCC در سرعت ۰/۵۶ متر بر ثانیه، پروانه با سرعت دورانی ۱۰/۳۶ - دور بر ثانیه شروع به چرخش می‌کند، تا زمانی که سرعت شناور به صفر برسد.

در شکل ۱۱ سرعت بدون بعد حرکت ($v' = \frac{v}{\sqrt{Lg}}$) کشتی بر حسب زمان بدون بعد ($t' = \frac{t}{\sqrt{\frac{L}{g}}}$) برای شناور KVLCC در عدد فرود ۰/۱۴۲ از زمانی که پروانه شناور شروع به چرخش معکوس کرده است، تا زمانی که به سرعت صفر می‌رسد، نشان داده شده است.

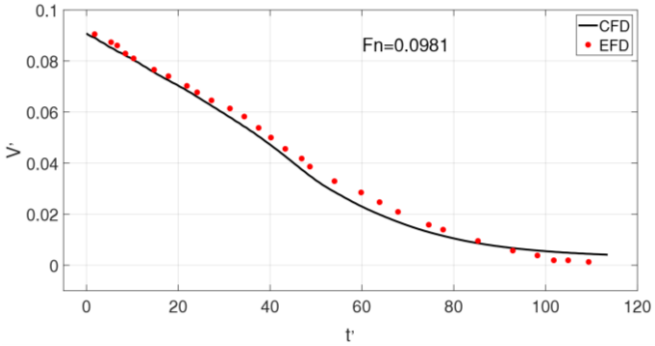
با توجه به شکل ۱۱ پس از رسیدن شناور به سرعت طراحی، پروانه شناور شروع به چرخش به صورت معکوس می‌کند و با ایجاد تراست منفی سبب کاهش سرعت کشتی در جهت طولی می‌شود. به علاوه، شناور پس از ۴۵ ثانیه به سرعت صفر می‌رسد.

در شکل ۱۲ سرعت حرکت کشتی در مانور توقف بر حسب زمان در عدد فرود ۰/۰۹۸۱ با نتایج آزمایشگاهی [۸] مقایسه شده-است. از مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که دقت قابل قبولی از سرعت حرکت کشتی و همچنین زمان رسیدن کشتی به سرعت صفر در طی مانور توقف به دست آمده است.



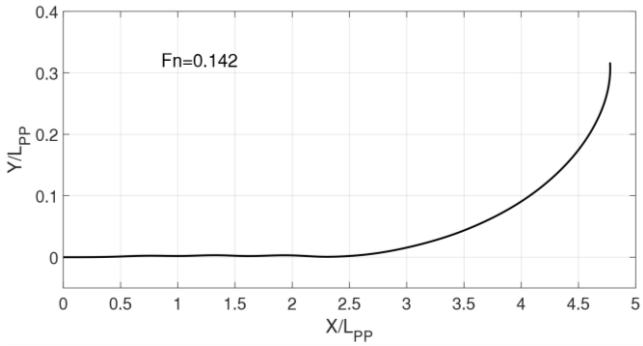
شکل ۱۱- سرعت حرکت کشتی برای عدد فرود ۰/۱۴۲ در مانور توقف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.5.9]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.51]



شکل ۱۲: مقایسه سرعت حرکت کشتی در مانور توقف با نتایج آزمایشگاهی [۸] برای عدد فرود ۰/۰۹۸۱

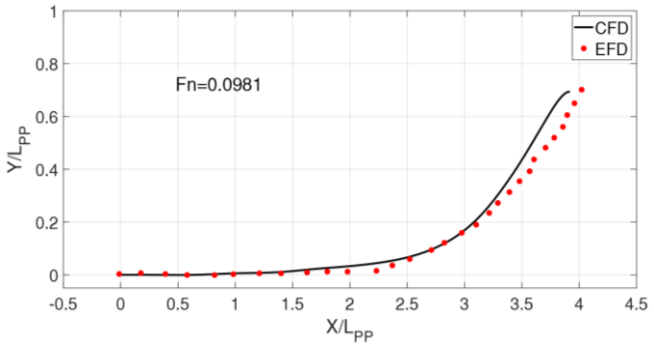
در شکل ۱۳ مسیر بدون بعد طولی حرکت کشتی (X/L) بر حسب انحراف عرضی بدون بعد (Y/L) در عد فرود ۰/۱۴۲ نشان داده شده‌است. با توجه به شکل کشتی پس از طی کردن مسافتی حدود ۴/۸ طول کشتی در جهت افقی، و ۰/۳ طول کشتی در جهت عرضی به سرعت صفر می‌رسد.



شکل ۱۳- مسیر توقف کشتی در عدد فرود ۰/۱۴۲

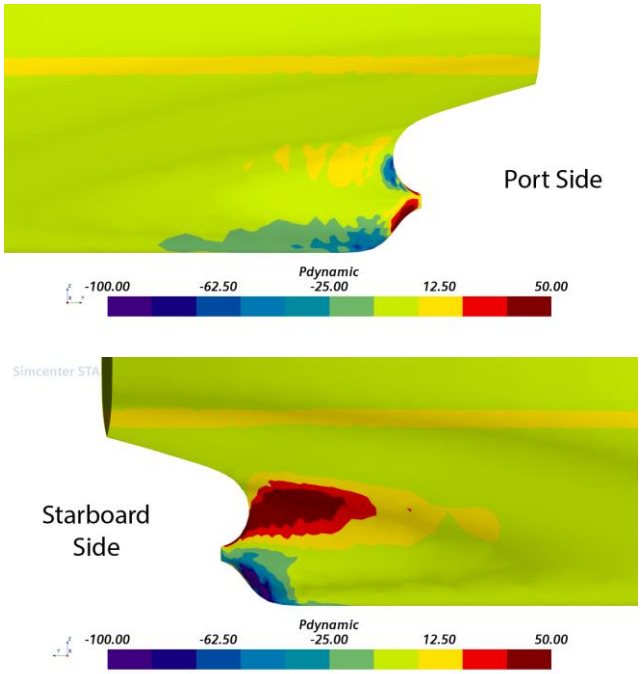
در شکل ۱۴ نمودار مسیر حرکت کشتی به دست آمده از شبیه-سازی عددی در عدد فرود ۰/۰۹۸۱ با مسیر حرکت کشتی در تست توقف آزمایشگاهی [۸] مقایسه شده‌است. با مقایسه طول توقف و انحراف عرضی کشتی با مقادیر آزمایشگاهی تطابق بسیار خوبی مشاهده می‌شود. مقادیر طول توقف و انحراف عرضی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی به ترتیب ۳/۹ و ۰/۷ است که بسیار نزدیک به مقادیر آزمایشگاهی یعنی ۴/۰۲ و ۰/۷۰۳ می-باشد. به طور کلی، طول توقف حاصل از حل عددی در مقایسه با نتیجه آزمایشگاهی ۲/۹۸۵ درصد و انحراف عرضی حاصل از حل عددی ۰/۴۲ درصد خطا دارد.

توافق کلی برای شبیه‌سازی حاضر برای مانور توقف نشان می‌دهد که، روش عددی مورد استفاده در این مطالعه می‌تواند به دقت پارامترهای توقف را پیش‌بینی کند.



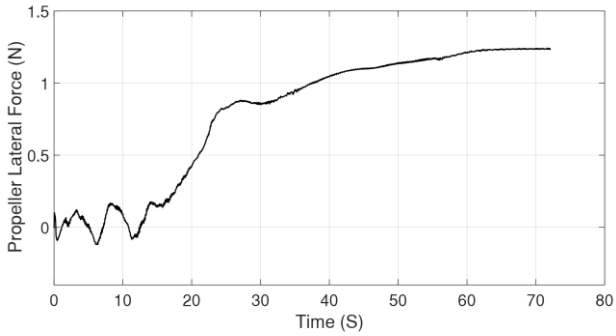
شکل ۱۴: مقایسه مسیر توقف با نتایج آزمایشگاهی در عدد فرود ۰/۰۹۸۱

یک پدیده جالب که می‌توان به آن توجه کرد منحرف شدن عرضی شناور به اندازه ۰/۷ طول کشتی در مانور توقف می‌باشد. برای بررسی این پدیده، در شکل ۱۵ توزیع فشار دینامیکی در عدد فرود ۰/۰۹۸۱ در پایان تست توقف نشان داده شده‌است. می‌توان مشاهده کرد که در هنگام توقف در سمت راست پاشنه شناور فشار بالایی به وجود آمده است، در حالی که توزیع فشار در سمت چپ پاشنه بسیار کمتر می‌باشد، این تفاوت به دلیل چرخش پروانه است. تفاوت در این توزیع فشار سبب ایجاد یک نیروی عرضی می‌شود که قسمت پاشنه را به سمت چپ و قسمت سینه کشتی را به سمت راست می‌چرخاند. برای درک بهتر این موضوع نمودار نیروی تراست عرضی تولید شده توسط پروانه در مانور توقف در عدد فرود ۰/۰۹۸۱ در شکل ۱۶ نشان داده شده-است.



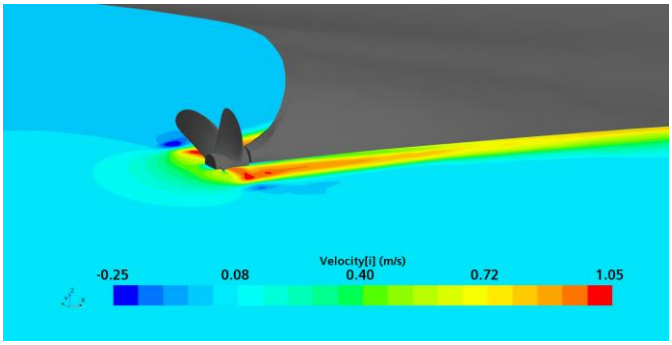
شکل ۱۵: توزیع فشار بر روی بدنه شناور در عدد فرود ۰/۰۹۸۱ در پایان تست توقف.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.5.9]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.51]



شکل ۱۶: نیروی عرضی ایجاد شده توسط پروانه در مانور توقف در عدد فرود ۰/۰۹۸۱

شکل ۱۷ چگونگی عملکرد حین معکوس کردن پروانه را در حین مانور توقف نشان می‌دهد. سیال نزدیک پروانه رو به جلو رانده می‌شود و نیروی عکس‌العمل روی پروانه به کشتی کمک می‌کند تا سرعت خود را کاهش دهد. با توجه به معکوس کردن پروانه، توزیع سرعت سیال در نزدیکی پروانه نسبتا پیچیده است.



شکل ۱۷- توزیع سرعت محوری در نزدیک مقطع پروانه در مانور توقف

۵ – نتیجه گیری

در این مطالعه شبیه‌سازی‌های عددی تست خودرانش و مانور توقف با استفاده از معکوس کردن پروانه برای شناور KVLCC2 ارائه شد. تمام شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Star-CCM+ انجام شد. برای کنترل چرخش پروانه از تکنیک مش لغزشی استفاده شد. تایید و اعتبارسنجی نتایج حاصل از حل عددی مطابق با استانداردها و توصیه‌های ارائه شده توسط ITTC با استفاده از مطالعه بر روی مش و گام زمانی مورد تحلیل قرار گرفت. برای به دست آوردن سرعت دورانی پروانه در اعداد فرود مختلف از یک کنترلر انتگرالی استفاده شد. از مقایسه نتایج به دست آمده در تست خودرانش با نتایج آزمایشگاهی موجود دقت بسیار خوبی به دست آمد. علاوه براین، نتایج حاصل از مانور توقف شامل مسیر حرکت کشتی و سرعت حرکت کشتی بر حسب زمان با داده‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه شد و تطابق بسیار خوبی نشان داده‌شد. همچنین جزییات میدان جریان در تست خودرانش و مانور توقف مورد مطالعه قرار داده شد. با مطالعه بر روی دو سرعت مختلف مشاهده شد که در اعداد فرود بالاتر شناور زمان کمتری را برای توقف نیاز دارد.

از آن‌جایی که توقف شناورها در بنادر بسیار مهم است، می‌توان در مطالعات آینده تاثیر عمق آب را بر پارامترهای مانور توقف مورد مطالعه قرار داد.

۶ – منابع

[1]. International Maritime Organization (IMO), Resolution Standards for Ship Maneuverability, IMO, London, 2002 MSC.137 (76).

[2]. International Maritime Organization (IMO), Explanatory Notes to the Standards for Ship Maneuverability, IMO, London, 2002 MSC/ Circ 1053.

[3]. Chislett, M.S., Smitt, L.W., 1972. A brief description of the Hya large amplitude Pmm system. J. Mech. Eng. Sci. 14, 80–84. https://doi.org/1243/10 /JMES_JOUR_1972_014_067_02.

[4]. American Bureau of Shipping (ABS)GUIDE FOR VESSEL MANEUVERABILITY, 2006.

[5]. Park JY, Oh P, Kim T, Lee JH, Study on Stopping Ability of a Ship Equipped with Azimuth Propeller, Journal of Ocean Engineering and Technology 34(1), 13-18 February, 2020.

[6]. Wang J, Wan D, CFD study of ship stopping maneuver by overset grid technique, Ocean Engineering 197 (2020) 106895.

[7]. Duman S, Bal S, Prediction of the acceleration and stopping manoeuvres of a bare hull surface combatant by closed-form solutions and CFD, Ocean Engineering 235 (2021) 109428.

[8]. Ueno M, Suzuki R, Tsukada, Estimation of stopping ability of full-scale ship using free-running model, Ocean Engineering 130 (2017) 260–273.

[9]. Zheng J, Meng F, Li Y, Design and experimental testing of a free running ship motion control platform, IEEE access (2018).

[10].Simman,2020http://www.simman2019.kr/contents .

[11]. Ferziger J, Perić M, Street R, 2020. Computational Methods for Fluid Dynamics. 10.1007/978-3-319-99693-6.

[12]. ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 2014. Practical guidelines for ship CFD applications. 7.5–03 –02–03.

[13]. CD-Adapco,2019. User guide STAR-CCM Version 04/14.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.5.9]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.51]

[14]. Mahmoodi H, Hajivand A. Numerical trim and draft optimization of a twin-screw modern surface combatant with inverted bow. Applied Ocean Research. 2022 Jun 1; 123:103186.

[15]. Stern F, Wilson RV, Coleman HW, Paterson EG, Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations – Part 1: methodology and procedures, J. Fluid Eng. 23 (4) (2001) 793–802.

[16]. ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 2017. Uncertainty analysis in CFD verification and validation methodology and procedures. 5/7 -03-01-01.

[17]. Kim WJ, Van SH, Kim DH. Measurement of flows around modern commercial ship models. Experiments in fluids. 2001 Nov;31(5):567-78.

[18]. ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 2017. Practical guidelines for ship self-propulsion CFD. 5/7 -03-03-01.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.5.9]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.51]