



محاسبه مقاومت شناور سه‌بدنه و تخمین عدم قطعیت در شرایط آب آرام بواسطه روش‌های آزمایشگاهی و عددی

سعید کرمی^{۱*}، روح‌الله هادیپور گودرزی^۲ و محمد زند راد مجرد^۳

^۱ مری، مهندسی دریا، هیدرودینامیک و جلوبردنگی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری شمال

^۲ مری، مهندسی دریا، معماری کشتی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری شمال

^۳ مری، مهندسی دریا، هیدرودینامیک، آزمایشگاه ملی دریایی ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۵

چکیده

امروزه تحقیقات روی شناورهای سه‌بدنه به دلیل داشتن خواص متعدد افزایش یافته است. شناور تریماران یا سه بدنه یک نمونه از شناورهای چند بدنه است که دارای خواص هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی مناسب است. این شناورها با توجه به نسبت‌های طول به عرض و آبخور بالا به ترتیب کاهش مقاومت موج‌سازی و توان را ارائه می‌نمایند. در این مطالعه نحوه و روند انجام آزمایش مقاومت برای یک شناور سه بدنه با تناژ سنگین ارائه شده است. الزامات ساخت براساس توصیه‌نامه ITTC انجام شد. شناور در اعداد فرود ۰/۴۲، ۰/۲۳ و ۰/۱۷، در حالت سه‌درجه آزادی شامل، سرج، هیو و پیچ و شرایط آب آرام مورد آزمایش قرار گرفت. سپس به روش دینامیک سیالات محاسباتی نتایج مورد مقایسه قرار گرفت. تایید و اعتباربخشی طبق توصیه‌نامه ITTC بوسیله سه سطح شبکه‌بندی انجام و مقدار عدم قطعیت عددی نیز تخمین زده شد. به منظور مدل‌سازی جریان حول بدنه از مدل دو فازی وی او اف و مدل آشفتگی کی - اپسیلون بهره گرفته شد. تطابق مناسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی ارائه شد.

کلمات کلیدی: شناور سه‌بدنه؛ دینامیک سیالات محاسباتی؛ مقاومت شناور؛ آشفتگی جریان؛ آزمایش شناور؛ حوضچه کشت؛ اعتباربخشی؛ تایید.

The Calculation of Trimaran Vessel Resistance and Uncertainty estimation in Calm water condition by Experimental and Numerical methods

S. Karami^{1*}, R. Hadipour Goudarzi², M. Zand Rad Mojarad³

¹ Ma. Ocean. Eng., Hydrodynamic & Propulsion, MUT, Northern Research Center for Science & Technology, Iran.

² Ma., Ocean. Eng., NAVAL Architecture, MUT, Northern Research Center for Science & Technology, Iran.

³ Ma., Ocean. Eng., Hydrodynamic, IMU, NIMALA, Iran.

Abstract

Nowadays, the study of Trimaran vessels has increased due to its various properties. The Trimaran vessel or three hull is an example of a multi-hull vessel that has suitable hydrostatic and hydrodynamic properties. These vessels have a length-to-width and draught ratios, so they offer reduced wave-making resistance and power, respectively. In this study is presented the method and process of performing resistance test for a displacement trimaran vessel. Construction conditions were performed according to the ITTC recommendation. The vessel was tested at Froude numbers: 0.42, 0.23, 0.17 and three degrees of freedom: surge, heave, pitch and calm water conditions. Then, the results were compared by computational fluid dynamics method. Verification and Validation were performed according to the ITTC recommendation by three levels of gridding and the amount of numerical uncertainty was estimated. In order to model the flow around the hull, the two-phase VOF model and $k - \epsilon$ turbulence model were used. Good agreement was obtained between numerical and experimental results.

Keywords: Trimaran Vessel; Computational Fluid Dynamic; Ship Resistance; Turbulent Flow; Vessel Experiment; Towing Tank; Validation; Verification.

۱- مقدمه

توسعه شناورهای چند بدنه از نیمه دوم قرن بیستم آغاز شده است. امروزه صدها شناور چند بدنه با طرح‌های مختلف ساخته و عملیاتی شده‌اند. شناورهای چند بدنه دارای فرم‌های متعارف، غیرمتعارف و تعداد بدنه متفاوت از یکدیگر هستند. بنابراین هر کدام ویژگی‌های خاص به خود را ارائه می‌نمایند. شناور تریماران^۱ یا سه بدنه یک نمونه از شناورهای چند بدنه است که دارای خواص هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی مناسب است [۱]. این شناور دارای یک بدنه مرکزی طویل لاغر و دو بدنه کوتاهتر متقارن یا نامتقارن در طرفین بدنه اصلی است. ساختار تریماران نسبت طول به عرض بزرگتر L_w/B_w را ارائه می‌دهد که موجب کاهش مقاومت موج‌سازی در سرعت‌های بالا و از رشد بیش از حد آن جلوگیری می‌نماید. نسبت طول به آبخور بالا L_w/T در مقایسه با تک بدنه معادل (تناژ یکسان) موجب دستیابی به برد بیشتر به واسطه توان کمتر می‌شود. به عنوان نمونه در یک شناور تریماران نسبت به یک شناور تک بدنه معادل مقدار ۲۰ درصد مقاومت شناور کاهش می‌یابد. تداخل جریان بین بدنه‌های جانبی و وسط موجب می‌شوند که امواج کوچکتری ایجاد و در نتیجه انرژی امواج پراکنشی^۲ کاهش و بر مقاومت موج‌سازی غلبه شود. از جمله مزایای دیگر شامل: عرشه وسیع‌تر، آبخور کمتر و تعادل عرضی بهتر، امکان هدایت خروجی موتور در بین بدنه‌ها و ردیابی کمتر در مقاصد نظامی را برشمرد. در شناورهای تریماران بدنه جانبی معمولاً تناژی کمتر از ۱۰ درصد بدنه اصلی را دارا هستند [۲-۴]. این عوامل در سال‌های اخیر باعث شده مطالعه روی این شناورها بیش از پیش گردد.

طرح اولیه شناور سه بدنه با تناژ بالا اولین بار توسط آقای زینگ و پتیسون از دپارتمان مهندس مکانیک در دانشگاه یوسی ال ارائه شد. طرح ارائه شده شامل بدنه باریک در وسط با نسبت لاغری بالا (طول بر روی حجم جابجایی به توان یک سوم) و دو بدنه جانبی لاغر با جابجایی کوچک بود. آن‌ها طراحی خود را از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند [۵]. اکبری و همکاران [۶] مقاومت یک شناور سه بدنه

را بوسیله روش تجربی و عددی استخراج نمودند. بدنه وسط شناور از نوع شکافنده امواج^۳ در نظر گرفته شده بود. آن‌ها در مطالعه خود جانمایی‌های مختلف طولی و عرضی^۴ را برای بدنه‌های جانبی در چند سرعت بررسی و معتبرسازی نمودند. دنگ و همکاران [۷] اثر زاویه‌ای تریم^۵ و سینکج^۶ را روی مقاومت بررسی نمودند. آن‌ها دو رویکرد مدل ثابت^۷ و ۶ درجه آزادی^۸ را در مطالعه عددی خود وارد نمودند. نتایج مدل ۶ درجه آزادی به نتایج تجربی نزدیک و اختلاف مدل ثابت و تجربی در سرعت‌های متوسط و بالا بسیار افزایش یافت. دوبروسکوی [۲] انواع شناورهای چند بدنه را بواسطه شاخص‌های هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی در سیکل طراحی بررسی و معرفی نمود. گانگ و همکاران [۸] به روش عددی مستقیم برخی تست‌های حرکتی شامل: دایره چرخش، زیگزگ و .. را مدلسازی نمودند. نتایج آن‌ها تطابق مناسبی با آزمایش دریای آزاد^۹ داشت. هافز و کوت [۴] با استفاده از روش تئوری نواری فرم‌ها و آرایش‌های جانمایی مختلف را از منظر مقاومت بررسی نمودند. هاتلویک [۹] مقاومت شناور سه‌بدنه را بررسی کرد. حیدری و همکاران [۱۰] اثرات جانمایی، تغییر زاویه‌ای تریم، یاو و هیل اعمالی به بدنه‌های جانبی را روی مقاومت بررسی نمودند. آن‌ها دریافته‌اند که در اعداد فرود پایین، تغییرات بدنه جانبی اثر چندانی روی مقاومت ندارد. افزایش تریم به پاشنه موجب کاهش مقاومت بدنه جانبی می‌شود. زاویه هیل مثبت در اعداد فرود بالا موجب کاهش مقاومت و در زاویه منفی مقاومت را افزایش نمود. زاویه یاو مثبت باعث افزایش و مقدار منفی در اعداد فرود بالا موجب کاهش مقاومت گردید. سو و همکاران [۱۱]، سان [۱۲] و لوهیلیما [۱۳] بوسیله روش دینامیک سیالات محاسباتی و تجربی مقاومت را بررسی نمودند. در این مقاله مطالعه تجربی و عددی مقاومت روی یک شناور سه‌بدنه سنگین صورت گرفته است. روش انجام تست آزمایشگاهی و روند مدلسازی عددی ارائه شده و نتایج

³ Wave Piercing

⁴ Stagger

⁵ Trimming

⁶ Sinkage

⁷ Captive

⁸ 6-DOF

⁹ Trial

¹ Trimaran

² Dissipated

جابجایی سنگین است و در قسمت سینه آن از سونار استفاده شده است. مقیاس مدل 1:55.85 است. مراحل کلی ساخت مدل طبق شکل ۱ است. ساخت مدل به عنوان اولین قدم در تست‌های آزمایشگاه دریایی از اهمیت بسیاری برخوردار است. از این رو دقت ساخت و سپری کردن استانداردهای ساخت مدل در اولویت قرار دارند. در مرحله اول فایل طراحی شده بررسی و عیوب هندسی که در ساخت اشکال ایجاد نمایند،

عددی مورد تایید و اعتبارسنجی قرار گرفته است؛ همچنین ویک پروانه بواسطه یک دیسک در پاشنه استخراج شد.

۲- مطالعه آزمایشگاهی

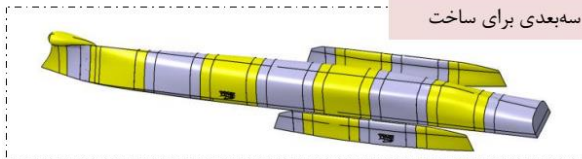
۲-۱- مشخصات هندسی و ساخت مدل

در جدول ۱ مشخصات هندسی به تفکیک در مقیاس واقعی و مدل آزمایشگاهی ارائه شده است. شناور سه بدنه از کلاس

جدول ۱- مشخصات هندسی شناور در مقیاس واقعی و مدل ۲/۵ متری آزمایشگاه دریایی خلیج فارس

مقیاس مدل			مقیاس واقعی			نماد، واحد	پارامتر
جانبی	میانی	سه‌بدنه	جانبی	میانی	سه‌بدنه		
۰/۹۴۸	۲/۴۰۸	۲/۴۰۸	۵۲/۹۹۸	۱۳۴/۴۸۷	۱۳۴/۴۸۷	L_{pp} [m]	طول خط آبخور
۰/۰۳۵	۲۰۹۰	۰/۵۴۹	۲	۱۱/۶۹۸	۳۰/۶۶	B_{WL} [m]	عرض ماکزیمم خط آب
۰/۰۳۵	۰/۱۳۰	۰/۱۳۰	۲	۷/۱۷۲	۷/۲۷۲	T [m]	آبخور
۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۲۶۴	۰/۰۲۷۷	۱۱۱/۷۶	۴۶۰۹/۰	۴۸۳۲/۸۳	∇ [m ³]	حجم جابجایی
۰/۰۰۰۶۵	۰/۰۲۶۵	۰/۰۲۷۸	۱۱۴/۶	۴۷۲۴	۵۴۴۹	Δ [ton]	تناژ
۰/۰۶۹۸	۰/۶۷۵	۰/۸۱۴	۲۱۷/۸۹	۲۱۰۵/۲۱	۲۵۴۰/۹۷	S_W [m ²]	سطح خیس بدون سکان
			-			S_R [m ²]	سطح خیس سکان
۰/۰۲۲۸	۰/۴۲۰	۰/۴۶۵	۷۱/۳۲	۱۳۱۰/۵۵	۱۴۵۲/۵۸	S_{WL} [m ²]	مساحت سطح آبخور
۰/۵۳	۰/۶۱	۰/۶	۰/۵۳	۰/۶۱	۰/۶	$C_B = \nabla / (L_{pp} B_{WL} T)$ [-]	ضریب بلوکی
۰/۹۱۵	۰/۸۲	۰/۹۰۱	۰/۹۱۵	۰/۸۲	۰/۹۰۱	$C_M = A_M / (B_{WL} T)$ [-]	ضریب مقطع میانی
۰/۶۵۵	۰/۶۶۸	۰/۶۶۳	۰/۶۵۵	۰/۶۶۸	۰/۶۶۳	$C_P = \nabla / (A_M L_{pp})$ [-]	ضریب منشوری
۰/۴۸۰۳	۱/۱۵۰۶	۱/۱۳۲	۲۶/۸۲	۶۴/۲۵۲	۶۳/۲۲۳	LCB(from stern) [m]	طول مرکز بویانسی
	۱/۱۳۲			۶۳/۲۲۳		LCG (from stern) [m]	طول مرکز جرم از پاشنه
	۰/۱۳۸			۷/۷۲		KG [m]	ارتفاع عمودی مرکز جرم
	۰/۰۹۴۳			۵/۲۷		PP (from stern) [m]	موقعیت صفحه پروانه
	۵			۵		Shaft Angle [degree]	شیب شفت پروانه
			۰/۴			K_{xx}/B_{wl} [-]	نسبت شعاع ژیراسیون رول
			۰/۲۵			$K_{yy}/L_{pp}, K_{zz}/L_{pp}$ [-]	نسبت شعاع ژیراسیون یاو/ پیچ

۱) آماده سازی سطح مدل سه‌بدنی برای ساخت



۲) ساخت مدل باتوجه به الزامات تست و طراحی



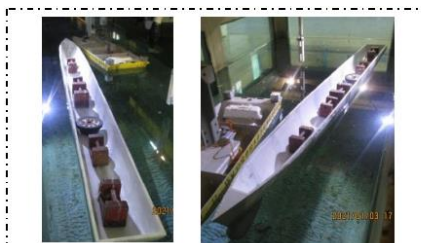
۳) مونتاژ قطعات مدل



۴) کنترل دقت ساخت بدنه



۵) تست آببندی



۶) لایه نشانی فایبر



۷) سطح سازی و رنگ مدل



شکل ۱- مراحل ساخت و آماده‌سازی مدل

آغشته شده تا از نفوذ آب به داخل بدنه جلوگیری شود. منافذ و محل اتصالات لایه‌های پرینت قطعات بیرون بدنه‌ها با استفاده از محلول کلروفروم، آب‌بند شد. ابتدا لایه بیرونی آغشته به کلرو فروم و آب‌بند گردید، سپس تست آب‌بندی داخل حوضچه با بارگذاری کامل انجام شد و پس از اطمینان از آب‌بندی بیرونی، در مرحله ششم لایه نشانی فایبر صورت گرفت. ابتدا سطح داخلی بدنه به کمک لایه فایبر ۲۰۰ گرمی پوشش داده می‌شود تا به استحکام و آب-بندی بدنه کمک نماید. در مرحله آخر برای داشتن سطحی صیقلی و یک دست در چندین مرحله اصلاح سطح و مراحل آماده‌سازی مدل برای رنگ نهایی صورت می‌گیرد. در این مرحله سطح مدل بتانه‌کاری، سنباده‌زنی، شستشو و آسترپاشی می‌گردد. در نهایت در صورت وجود زبری، پوست پرتقالی‌شدن، شره رنگ و اشکال در چسبندگی رنگ به بدنه، نقاط مورد نظر اصلاح و در نهایت رنگ نهایی بر روی مدل اعمال شد.

۲-۲- الزامات قبل از تست مدل

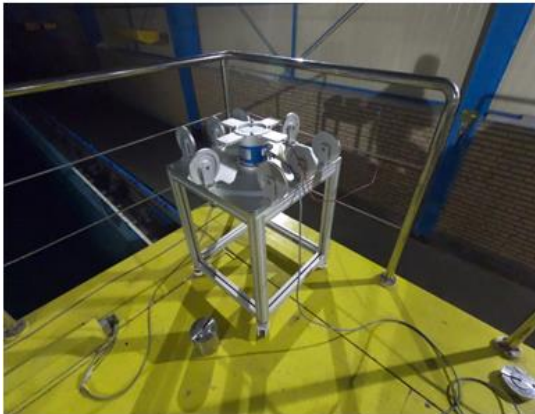
با توجه به اینکه در آزمایشگاه‌های دریایی، تشابه فرود بین مدل و شناور اصلی برقرار می‌گردد، اما امکان تشابه عدد رینولدز وجود ندارد با استفاده از نصب مغشوش‌ساز در سینه مدل، آشفته‌سازی رژیم جریان به منظور عبور از عدد رینولدز بحرانی انجام می‌شود. در شکل ۲ نصب مغشوش‌ساز جریان نشان داده شده است. موقعیت نصب نوار سنباده در فاصله ۶ درصدی از Lpp از سینه شناور است.



شکل ۲- نصب نوار مغشوش‌ساز جریان

بررسی و اصلاح می‌گردد. با توجه اینکه ساخت مدل سبک‌تر موجب تنظیم راحت‌تر توزیع گرمی و نصب راحت‌تر تجهیزات روی مدل می‌گردد، در این راستا از روش پرینتر سه‌بعدی استفاده گردید. با توجه به محدودیت روش ساخت، مدل بصورت بخش‌بندی شده ساخت شد. برای جنس ماده از فیلامنت ای بی اس استفاده شد. ای بی اس ماده‌ای مستحکم با چگالی ۱۰۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب و دمای پرینت بین ۲۱۰ الی ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد است. در مرحله دوم با توجه به سه بدنه بودن مدل، برای تراز نگه داشتن سطح بدنه‌ها نسبت به یکدیگر و ثابت نگه داشتن بدنه‌ها نسبت به یکدیگر، یک صفحه مکانیزم مونتاژ در نظر گرفته شده است. در مرحله سوم مونتاژ قطعات صورت گرفت. از این رو در هر قسمت از مدل که برای ساخت با دستگاه آماده شده است یک سری راهنما و نقاط اتصال با قطعات کناری در نظر گرفته شد که به وسیله پین این قطعات به هم متصل می‌شوند. پس از هم-سطحی و تراز کردن قطعات نسبت به یکدیگر با استفاده از محلول کلروفروم محل اتصال قطعات آغشته به محلول شده و با توجه واکنش بین محلول و فیلامنت، با یک فشار حداقلی اتصال محکمی بین دو قطعه مجاور ایجاد می‌شود. با توجه به بارگذاری این مدل در تست، استحکام مدل باید در حد قابل قبولی باشد، از این رو در محل اتصال قطعات به یکدیگر علاوه بر لایه نشانی فایبر در داخل بدنه، پله‌ای در سطح بیرونی ایجاد شده و با دو لایه فایبر ۲۰۰ اتصال قطعات استحکام بیشتری یافته است.

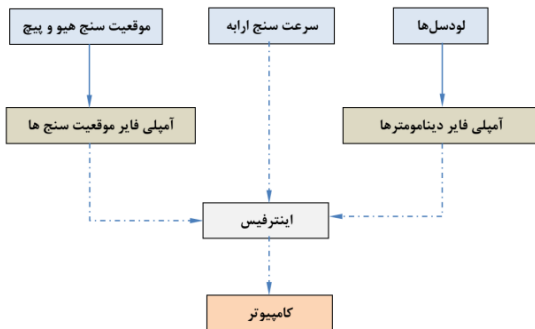
در مرحله چهار دقت ساخت مدل واررسی می‌گردد. مطابق توصیه‌نامه [۱۴] باید حداکثر خطای مدل ساخته شده در طول $1.0 \text{ mm} \pm$ یا $0.05\% \text{ Lpp}$ و در عرض و ارتفاع $1/0 \pm \text{mm}$ باشد. با داشتن فایل سه‌بعدی هندسه بدنه، تعداد ۱۰ عدد شابلون عرضی (Section)، یک عدد شابلون صفحه مرکزی (Buttock) و دو عدد شابلون موازی صفحه آب‌خور (Water Line) تهیه گردید. پس از هم‌بندی قطعات و ساخت، هر کدام از پانتون‌ها به طور مستقل به کمک شابلون‌های طراحی شده در مقاطع عرضی و طولی مورد بررسی قرار گرفت. در قسمت آخر با استفاده از شابلون‌هایی که برای دو پانتون برای رعایت فاصله پانتون‌ها طراحی شده بود، اتصال سه بدنه صورت گرفت. در مرحله پنجم تست آب‌بندی بدنه بررسی شد. در این مرحله داخل بدنه‌ها به یک لایه رزین



شکل ۴- میز کالیبراسیون دینامومتر



شکل ۵- آمپلی‌فایرهای دینامومتر و موقعیت سنج



شکل ۶- مسیر انتقال داده‌ها به کامپیوتر

ارابه کشش می‌تواند به ۱۹ متر بر ثانیه برسد. سناریو تست طبق جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۷ موقعیت نصب سنسورهای موقعیت، نیرو و شماتیک خطرانش نمایش داده شده است. در این راستا دو سنسور جابجایی در سمت سینه و پاشنه نصب شد که مقادیر جابجایی عمودی را استخراج می‌نمایند. به منظور در نظر گرفتن صحیح نیروی خط رانش یا تراست پروانه‌ها در محل طولی مرکز جرم LCG یک راستای عمود

به منظور رسیدن به آب‌خور طراحی مدل لازم است تا مقادیر مشخص توزیع وزنی در داخل مدل قرار گیرد. این وزنه‌ها باید طوری نسبت به مرکز ثقل قرار گیرند تا روابط ۱ الی ۳ ارضا شوند.

$$LCG = x_G = \frac{\sum_{i=1}^n x_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (1)$$

$$TCG = y_G = \frac{\sum_{i=1}^n y_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (2)$$

$$VCG = z_G = \frac{\sum_{i=1}^n z_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (3)$$

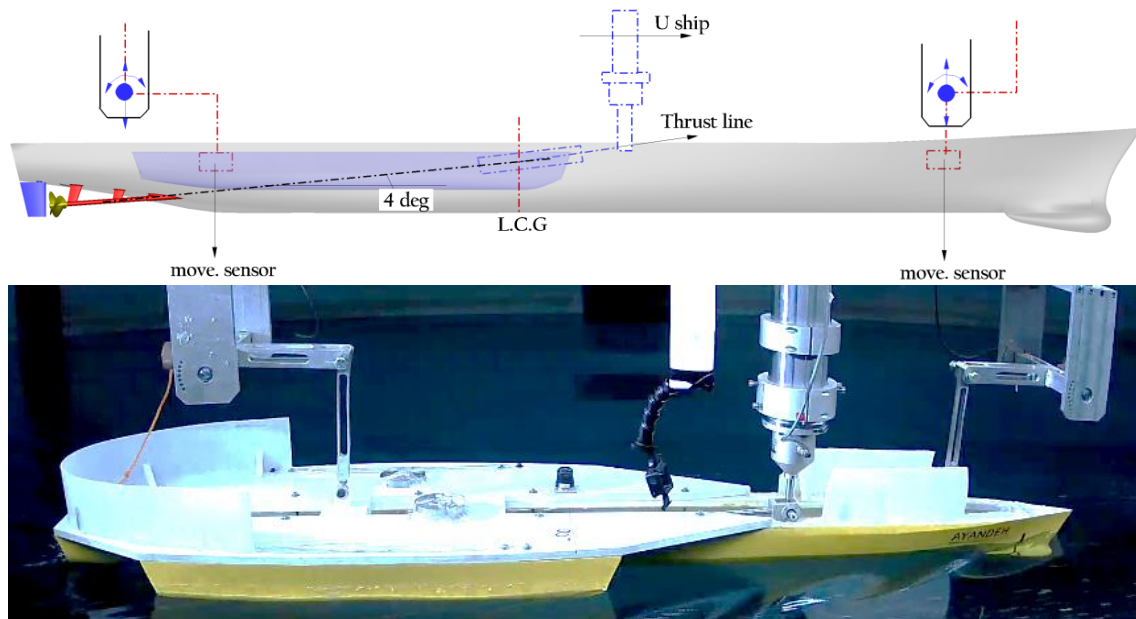
m جرم هر وزنه، x، y و z نیز به ترتیب مختصات مرکز جرم طولی، عرضی و عمودی هر وزنه نسبت به پاشنه است. جهت حصول اطمینان از صحت چینش وزنه‌ها، به کمک دستگاه مرکز ثقل یاب مختصات مرکز ثقل اندازه‌گیری شد. در شکل ۳ میز تعیین مرکز ثقل نشان داده شده است.

باید نوع دینامومترهای مناسب را با توجه به نوع تست و مقیاس نیروهای وارده به بدنه انتخاب و کالیبره نمود. دینامومتر مورد استفاده در این آزمایش از نوع تک جزیبی (فقط استخراج نیروی راستای X) و توانایی استخراج نیرو تا حداکثر ۵۰ کیلوگرم را دارا است. کالیبراسیون با استفاده از وزنه‌های دقیق انجام می‌پذیرد تا ضریب تبدیل ولتاژ به کیلوگرم استخراج گردد. در شکل ۴ میز کالیبراسیون دینامومترها نشان داده شده است. در شکل ۵ آمپلی‌فایر دینامومتر و موقعیت‌سنج نشان داده شده است. شکل ۶ روند داده‌برداری نتایج آزمایش را نشان می‌دهد.

آزمایش در حوضچه کشش خلیج فارس صورت گرفته است. ابعاد حوضچه $4.5 \times 6 \times 402$ m و حداکثر سرعت



شکل ۳- میز تعیین مرکز ثقل مدل



شکل ۷- موقعیت نصب سنسورهای جابجایی، دینامومتر و زاویه خط کشش

استخراج نمود که در روش تست دشواری و پیچیدگی‌های خاص به خود را دارد. به منظور شبیه‌سازی عددی مقاومت، طبق توصیه‌نامه [۱۵-۱۷] شرایط شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. از آنجایی که هزینه محاسباتی روش دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند زیاد باشد، در این راستا از شرط تقارن استفاده شده است، بطوریکه فقط نیمی از ساختار سه-بدنه در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳- معادلات حرکت جسم صلب

به منظور استخراج حرکات شناور و در نظر گرفتن برهمکنش سیال و حرکات کشتی از معادلات DFBI^۱ استفاده شده است. معادلات حرکت جسم صلب بصورت کوپل با معادلات ناویر استوکس حل و حرکات و نیروها روی بدنه شناور اعمال می‌شود. معادلات بوسیله طرح گسسته‌سازی مرتبه دوم حل می‌شوند. روابط ۴ و ۵، معادلات حرکات خطی (قانون دوم نیوتن) و حرکات دورانی (قانون اویلر) را ارائه می‌کند.

$$f = m \frac{dv}{dt} \quad (۴)$$

$$M \frac{d\vec{\omega}}{dt} + \vec{\omega} \times M \times \vec{\omega} = n \quad (۵)$$

^۱ Dynamic Fluid Body Interaction

جدول ۲- سناریوی آزمایش

شرایط آب	حرکات آزاد	U [m/s] model	U [knot] ship
Calm water	surge	۰/۸۳	۱۲
	sinkage	۱/۱	۱۶
	trim	۲/۰۶	۳۰

در نظر گرفته و با تقاطع زاویه خط شفت پروانه‌ها که در اینجا ۴ درجه است محل بستن دینامومتر و خط کشش بدست آمده است.

۳- مطالعه عددی

۳-۱- مدل‌سازی عددی

یکی از روش‌های مناسب برای معتبرسازی نتایج هیدرودینامیک شناور استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی است. این روش دارای مزایایی از قبیل استخراج ساختار ویسکوز جریان در نزدیک دیواره‌ها، استخراج ویک دنباله اجسام، پدیده جدایش جریان و مسائل اندرکنش است. همچنین بوسیله ابزار دینامیک سیالات محاسباتی می‌توان داده‌های نزدیک دیواره یا ویک صفحه پروانه را آسانتر

حول هر محور شامل K, M, N است. سرعت‌های خطی شامل u, v, w و زاویه‌ای شامل p, q, r است. موقعیت و زاویه در سیستم مختصات زمینی به ترتیب شامل x, y, z و θ, φ و ψ است.

بررسی شناور در حالت ۶ درجه آزادی دشوار بوده و معمولاً با توجه به مسئله مورد نظر (فقط تعیین مقاومت و حرکات آهسته) درجات آزادی کاهش می‌یابد. در مطالعه پیشرو حرکات سرج، پیچ و هیو شناور آزاد در نظر گرفته شده است. معادله کلی حرکت جسم صلب برای حرکت سرج، هیو و پیچ بصورت زیر خواهد بود. معادله حرکت خطی سرج و هیو:

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] = X^b \quad (۸)$$

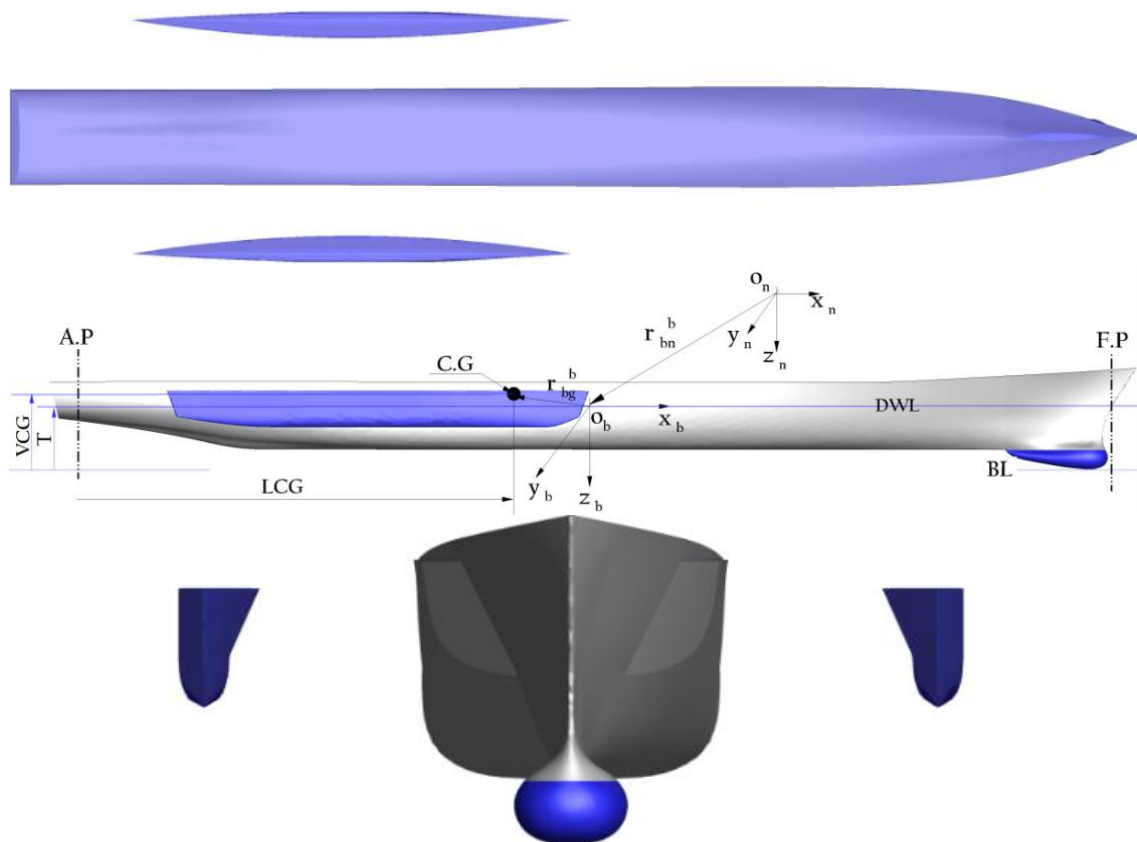
$$m[\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rp + \dot{p})] = Z^b \quad (۹)$$

برای نیروها و گشتاورهای وارده طبق روابط ۶ و ۷ زیرنویس p, τ و g به ترتیب ناشی از نیروها و گشتاورهای فشاری، ویسکوز و گرانش است. سایر نیروهای خارجی تعریف شده است.

$$f = f_r \left(f_p + f_\tau + f_g + \sum f_{ext} \right) \quad (۶)$$

$$n = f_r \left(n_p + n_\tau + \sum n_{ext} \right) \quad (۷)$$

با توجه به شکل ۹ یک شناور در محیط دریا دارای ۶ درجه آزادی است. سه حرکت خطی: سرج، اسوی و هیو و سه حرکت دورانی: رول، پیچ و یاو را شامل می‌شود. طبق شکل ۹ یک سیستم مختصات به بدنه شناور متصل بوده و با شناور حرکت می‌نماید. سیستم مختصات دیگر، مختصات زمینی است و می‌تواند در هر موقعیتی در نظر گرفته شود. برای تعیین مسیر حرکت وسیله پیشرونده در دستگاه مختصات زمینی از روی سرعت‌های خطی و زاویه‌ای باید تبدیل مختصات صورت گیرد. نیروها در راستای طول، عرض و ارتفاع شناور به ترتیب شامل X, Y, Z و گشتاور



شکل ۹- شناور از نماهای مختلف و دستگاه مختصات بدنی و زمینی

روش DNS که دارای هزینه محاسباتی بسیار بالا است. دو روش مرسوم LES و RANS برای شبیه‌سازی جریان آشفته وجود دارد که تفاوت آن‌ها در نوع میانگیری از معادله ناویر استوکس است. در روش‌های LES از میانگیری مکانی با استفاده از فیلتر و در روش‌های RANS از میانگیری زمانی استفاده می‌شود. در این مقاله از روش معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز RANS استفاده شده است. از مزایای این روش نسبت به روش‌های دیگر، هزینه محاسباتی کمتر و مقرون به صرفه‌تر بودن برای نوع مسئله مدنظر در این مقاله است. در روش متوسط‌گیری، پیش‌بینی خواص جریان آشفته به واسطه متوسط‌گیری زمانی (یا متوسط‌گیری دسته‌جمعی^۴) از معادلات ناویر-استوکس به دست می‌آید. این روش بدین‌صورت است که متغیرهای فشار و سرعت در هر لحظه با یک مقدار نوسانی در زمان، میانگین‌گیری می‌شوند (معادله ۱۸ و ۱۹). سپس این معادلات در معادلات پایه وارد و برای کل دامنه محاسباتی حل می‌شوند.

$$P = \bar{P} + p \quad (18)$$

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (19)$$

معادلات پایه حاکم بر جریان تراکم ناپذیر شامل معادله پیوستگی و ممنتوم^۵ است که به ترتیب در معادلات ۲۰ و ۲۱ آمده است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (21)$$

که در آن x_j مؤلفه‌های مختصات در دستگاه کارتزین، u_j مؤلفه‌های سرعت متناسب با جهت‌های x_j چگالی سیال، ρ ویسکوزیته سینماتیکی و $\nu = \mu / \rho$ نشان‌دهنده زمان است [۲۲ و ۲۳].

با قرار دادن معادلات ۱۸ و ۱۹ در معادلات ۲۰ و ۲۱ و متوسط‌گیری زمانی معادلات به‌اختصار RANS برای جریان غیرقابل تراکم به دست می‌آید که شامل معادله ۲۲ و ۲۳ است:

معادله حرکت پیچ:

$$\begin{aligned} I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz}) r p - (\dot{p} + q r) I_{xy} \\ + (p^2 - r^2) I_{zx} + (q p - \dot{r}) I_{yz} \\ + m [z_g (\dot{u} - v r + w p) \\ - x_g (\dot{w} - u q - v p)] = M^b \end{aligned} \quad (10)$$

متغیرهای \dot{p} نمایش دهنده شتاب‌های زاویه‌ای هستند. چون سیستم مختصات بدنه روی مرکز جرم قرار گرفته است مقادیر بردار مرکز جرم صفر هستند [۱۸-۲۱]. بنابراین:

$$r_{bg}^b = [x_g \ y_g \ z_g]^T = [0 \ 0 \ 0]^T \quad (11)$$

ماتریس ممان اینرسی بصورت:

$$I_0 = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (12)$$

چون محورهای مختصات همراستا با محورهای اینرسی هستند:

$$I_0 = \text{diag}[I_{xx} \ I_{yy} \ I_{zz}] \quad (13)$$

در نهایت با توجه به درجات آزادی و بردار سرعت:

$$\vec{V} = [u, 0, w, 0, q, 0] \quad (14)$$

معادلات حرکت سرج، هیو و پیچ:

$$m[wq] = X^b \quad (15)$$

$$m[\dot{w} - uq] = Z^b \quad (16)$$

$$I_{yy}[\dot{q}] = M^b \quad (17)$$

X و Z در برگزیده مجموع نیروهای هیدرودینامیکی فشاری و ویسکوز روی المان‌های سطحی جسم صلب و نیروهای هیدرواستاتیکی هستند و M مجموع گشتاور حول محور y بوده که منجر به سرعت زاویه‌ای پیچ می‌گردد.

۳-۳- معادلات پایه و آشفتگی

به‌منظور مدل‌سازی عددی جریان باید معادلات حاکم بر جریان سیال آشفته حل شوند که شامل معادله پیوستگی و معادلات میانگیری‌شده سه‌بعدی ناویر استوکس است. به‌طور کلی سه دسته روش برای شبیه‌سازی جریان آشفته وجود دارند که عبارتند از: RANS^۱، LES^۲ و DNS^۳. به جزء

^۱ Reynolds-Average Navier-Stokes

^۲ Large Eddy Simulation

^۳ Direct Numerical Simulation

^۴ Ensemble

^۵ Momentum

در این رابطه C_μ به‌عنوان یک ضریب ثابت معرفی می‌شود. مقادیر k و ε نیز مستقیماً از معادلات انتقال دیفرانسیلی به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\vartheta + \frac{C}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (26)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\vartheta + \frac{\vartheta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (27)$$

ثوابت موجود در رابطه ۲۶ و ۲۷ از طریق آزمایش‌های تجربی بر روی لایه‌مرزی آشفته و متناسب با فیزیک جریان، در نظر گرفته می‌شوند [۲۳]. مقادیر این پارامترها برابر با $\sigma_k = 1$ ، $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ، $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ، $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ، $C_\mu = 0.09$ است. در معادله ۲۸، با استفاده از فرض بوزینسکس برای عبارت P_k داریم:

$$P_k = -\frac{1}{\rho} \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{v}_i'}{\partial x_j} = 2\vartheta_t S_{ij} S_{ij} \quad (28)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (29)$$

به منظور انجام محاسبات مربوط به سطح آزاد از روش حجم سیال^۵ استفاده شده است که معادله آن بصورت رابطه ۳۰ است. مقدار کسر حجمی برای هوا برابر با یک، برای آب برابر با صفر و در مرز مشترک بین دو فاز مقداری بین صفر و یک دارد.

$$\nabla \cdot \mathbf{F} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{F} = 0 \quad (30)$$

معادلات بالا براساس روش حجم محدود و بوسیله نرم افزار Star-CCM+® version 14.04.011 بصورت عددی حل شده‌اند. از آنجاییکه تخمین مستقیم مقدار کمیت‌ها در نزدیک دیواره هزینه زیادی دارد، در این جا از توابع دیواره استاندارد ترکیبی^۶ برای محاسبه پارامترهای در نزدیک دیواره دیواره از قبیل سرعت و آشفتگی بهره گرفته شده است. در جریان حول بدنه وسایل متحرکه دریایی به دلیل وجود انحنا و فرم سه‌بعدی قسمت سینه و پاشنه معمولاً با توجه به رژیم جریان معکوس شدگی پروفیل جریان رخ می‌دهد که باید

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\vartheta \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i' u_j'} \right] \quad (23)$$

در معادله ۲۳، عبارت $\overline{u_i' u_j'}$ تانسور تنش رینولدز است و شش متغیر مجهول جدید به سیستم معادلات وارد می‌کند (بدون اضافه کردن معادله‌ای جدید). معادلات متوسط-گیری شده رینولدز نیز دارای چهار مجهول، شامل سه مؤلفه‌ی سرعت و یک مؤلفه‌ی فشار هستند. درنهایت یک سیستم معادلات شامل چهار معادله و ده مجهول به دست می‌آید که این معادلات به‌صورت یک سیستم معادلات کوپل عمل کرده و بر روی یکدیگر تأثیر هم‌زمان خواهند گذاشت. یکی از پرکاربردترین مدل‌های توربولانس دو معادله‌ای، مدل کا-اپسیلون^۱ است که با توجه هزینه محاسباتی مناسب در بیشتر مسائل مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله به‌منظور وارد نمودن اثرات آشفتگی از این مدل استفاده می‌شود که بر اساس فرض بوزینسک^۲ استوار است. فرض بوزینسک مطابق رابطه ۲۴، تانسور تنش رینولدز را به گرادین‌های سرعت و ویسکوزیته آشفتگی مرتبط می‌کند:

$$\overline{u_i' u_j'} = -\vartheta_T \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} = -2\vartheta_t S_{ij} + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (24)$$

که در آن δ_{ij} دلتا کرانکر^۳ و ϑ_t ویسکوزیته آشفتگی است که واحد آن m^2/s است. در مدل توربولانسی کا-اپسیلون، انرژی جنبشی آشفتگی k با واحد m^2/s^2 و پراکنندگی گردابه آشفتگی^۴ (نرخ که نوسانات سرعت پخش می‌شوند) ε با واحد m^2/s^3 بیان می‌شوند. ویسکوزیته آشفتگی با استفاده از معادله ۲۵ به دست می‌آید.

$$\vartheta_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (25)$$

¹ K-Epsilon

² Boussinesq

³ Kronecker

⁴ Turbulence Eddy Dissipation

⁵ Volume of Fluid (VOF)

⁶ Blended Wall Functions

محاسباتی جلوگیری می‌کند. انتخاب شرط مرزی ورودی سرعت براساس مرز پایین، به منظور ایجاد شرط آب عمیق است. مرزهای کناری، پایین و بالایی را می‌توان به عنوان مرز دیواره همراه با لغزش نیز در نظر گرفت [۲۵]. بطور کلی تنظیم این شرایط مرزی باید بطوری باشد که فاصله مناسب با بدنه را داشته تا کمترین اثر را روی بدنه بگذارد و شرط دوردست رعایت شود. به منظور بوجود آمدن پایداری در روند گسسته‌سازی معادلات، گام زمانی با ضریب ۰/۵ با افزایش تعداد سلول کاهش یافته است [۲۶]. بدین صورت که گام زمانی برای شبکه ۳ برابر با ۰/۱۱۶، برای شبکه ۲ برابر با ۰/۰۵۸ و شبکه ۱ برابر با ۰/۰۲۹ ثانیه در نظر گرفته شد. برای محاسبه گام زمانی از توصیه [۱۵-۱۷] استفاده شده که معمولاً مقداری بین $0.005 - 0.01Lpp/U$ در نظر گرفته می‌شود.

۴- عدم قطعیت و تایید نتایج

در دهه‌های اخیر، استفاده از روش‌های عددی بیش از پیش افزایش یافته است. در این راستا سخت‌گیری استانداردها به منظور تایید نتایج دینامیک سیالات محاسباتی افزایش یافته و ارزیابی عدم قطعیت از قبیل اعتبارسنجی و تایید مورد نیاز است. در سال ۱۹۹۸ انستیتوی هوانوردی و فضاوردی آمریکا^۳ برای اولین بار روند بررسی عدم قطعیت دینامیک سیالات محاسباتی را ارائه نمود که شامل دو مرحله اعتبارسنجی و تایید بود [۲۷]. شن و همکاران [۲۸] توزیع احتمال نتایج دینامیک سیالات محاسباتی و منابع عدم قطعیت عددی را مورد بررسی قرار دادند. سایمون و همکاران [۲۹] آنالیز عدم قطعیت را برای شبیه‌سازی‌های حالت دائم معادلات ناویر استوکس بررسی نمودند. گرمی و همکاران [۳۰] پارامترهای عدم قطعیت را برای کشتی کانتینر بر کی سی اس برای تست عددی مقاومت بررسی و استخراج نمودند. در این مطالعه پارامترهای عدم قطعیت مطالعه شده است. برای اطلاعات بیشتر می‌توان به مراجع [۳۱-۳۵] رجوع نمود.

سعی شود پروفیل‌ها در این ناحیه صحیح پیش‌بینی تا جریان در بالادست و پایین دست نیز دقت مناسب داشت باشد. این نواحی باید نسبت به سایر نواحی ریزتر شبکه‌بندی گردد. همچنین به منظور استخراج دقیق‌تر درگ فشاری دنباله جسم اصلاحاتی طبق شکل ۹ ایجاد شده است.

در شکل ۱۰ محدوده فاصله بی بعد از دیواره ارائه شده است. برای اطلاعات بیشتر در مورد مدل توربولانسی استفاده‌شده می‌توان به مراجع [۲۲-۲۴] رجوع نمود. عدد کورانته به منظور ایجاد پایداری حل در زمان گسسته‌سازی معادلات دیفرانسیل پاره‌ای به کار می‌رود. این پارامتر برابر با $C = u\Delta t/\Delta x \leq C_{max}$ است که پارامتر وابسته به گام زمانی، طول مشخصه سلول و مقدار سرعت است که بنا به توصیه باید حدوداً کوچکتر از ۱ باشد. اگر مقدار آن کوچکتر از یک باشد، مبین حرکت ذره سیال از یک سلول به سلول مجاور در یک گام زمانی است. طبق شکل ۱۰ مقدار این پارامتر زیر ۱ است. به منظور کاهش هزینه محاسباتی، تنها نیمی از بدنه شناور شبیه‌سازی شده‌است. به منظور اعمال این شرایط از شرط مرزی تقارن استفاده شده‌است. این شرط تنها برای جریان از روبرو قابل بکار بردن است. بر روی بدنه شناور شرط مرزی بدون لغزش و برای مرز ورودی شرط مرزی سرعت در نظر گرفته شد.

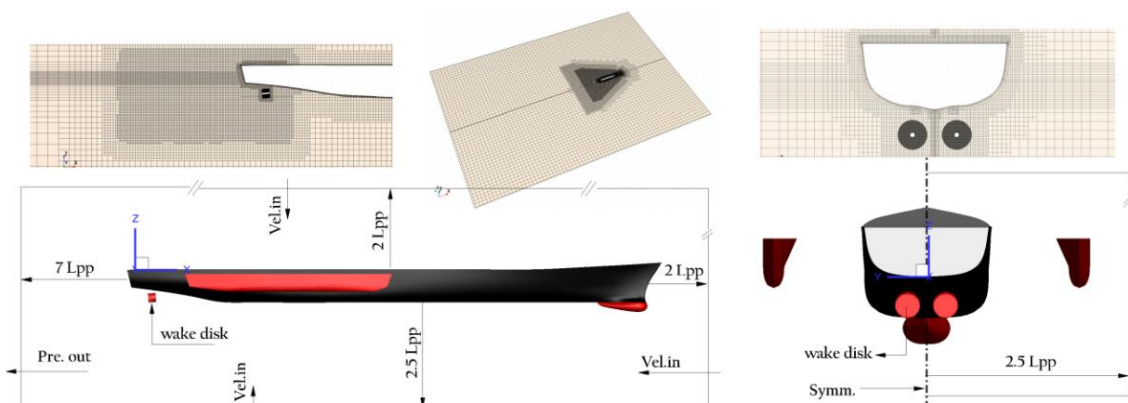
برای جریان خروجی نیز پروفیل هیدرواستاتیکی متناسب با چگالی آب و هوا به تفکیک در نظر گرفته شده‌است. شرط مرزی پشت شناور نیز فشار خروجی قرار داده تا از جریان بازگشتی^۱ جلوگیری شود. شرایط مرزی برای مرزهای بالا و پایین و کنار به صورت سرعت اعمال گردید. همچنین مرز کنار را می‌توان بصورت متقارن در نظر گرفت. برای مرز پایین جهت در نظر گرفتن بستر دریا بصورت همراه با لغزش و سرعت ورودی اعمال گردید. استفاده از شرط مرزی سرعت ورودی در مرز بالا و کنار مانع از چسبیدن سیال به دیواره‌ها می‌شود، یعنی از ایجاد گرادیان سرعت بین سیال و دیواره جلوگیری و به مانند شرط دیواره همراه با لغزش رفتار می‌نماید.

در این حالت جریان در قسمت بالا و کنار به موازی با مرز خروجی هدایت‌شده و از انعکاس سیال به درون دامنه

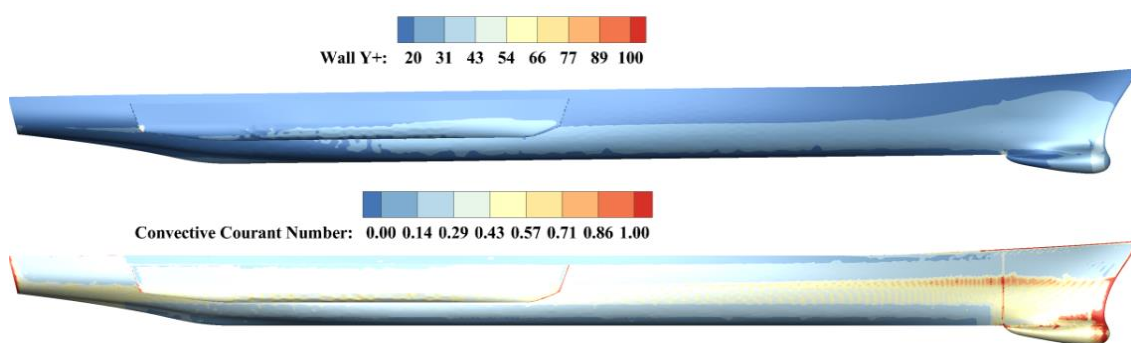
² Validation and Verification (V&V)

³ American Institute of Aeronautics and Astronautics

¹ Back Flow



شکل ۹- ابعاد دامنه محاسباتی و اصلاحات شبکه‌بندی برای یک دنباله جسم و دیسک پروانه



شکل ۱۰- خطوط همتراز فاصله بی بعد از دیواره و عدد کورانت

خطای گسسته‌سازی به سمت صفر و به حالت پیوسته در معادلات حاکمه انتگرالی نزدیک‌تر شویم. در این راستا تایید یک فرآیند برای تخمین عدم قطعیت و خطا در شبیه‌سازی عددی است که مشخص می‌کند که آیا معادلات مدل‌سازی به درستی حل شده باشند [۳۶]. این روش براساس برونیابی ریچاردسون [۳۷] است و برای تخمین خطای گسسته‌سازی و تایید از آن استفاده می‌شود. در این روش سه سطح شبکه‌بندی G1 الی G3 با نرخ رشد $\sqrt{2}$ تولید می‌شود. در این راستا با توجه به مقدار فاصله بی بعد از دیواره و عدد کورانت که باید کوچکتر از یک باشد و همچنین نبود جریان بازگشتی، یک سطح اولیه شبکه انتخاب و سپس در دو سطح دیگر مقدار ریز شونده‌گی افزایش می‌یابد، همچنین با افزایش المان‌ها مقدار گام زمانی نیز نصف می‌شود. بین آن‌ها مقدار عدم شاخص همگرایی تعیین می‌شود. شرایط همگرایی شامل:

۴-۱- مقایسه نتایج، تایید و اعتباربخشی

به منظور مقایسه نتایج، خطا بوسیله معادله ۳۱ محاسبه شده است که D نتیجه تست مدل (نیرو و حرکات) و S مقدار شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

$$E\%D = (D - S)/D \times 100 \quad (31)$$

در جداول ۴ و ۵ مقایسه مقادیر محاسبه‌شده عددی و تجربی ارائه شده است. این پارامترها شامل نیروی مقاومت و حرکات تریم و سینکیج است. با توجه به نتایج با افزایش تعداد سلول دقت نتایج عددی بهبود یافته است. گام اول در تایید دینامیک سیالات محاسباتی مطالعه همگرایی شبکه است. در این روند فرض می‌شود که تعداد نقاط گره افزایش یافته و فاصله بندی شبکه^۱ به سمت صفر میل نموده، همچنین باید

^۱ Grid Spacing

جدول ۳- گام زمانی و تعداد سلول برای سه حل متفاوت

پارامتر	تعداد سلول محاسباتی (میلیون)	گام زمانی (s)	زمان کل شبیه‌سازی (s)	سرعت ارزیابی (m/s)	فرود
$G_3, \Delta t_3$	۱/۱۵۲	۰/۰۱۱۶			
$G_2, \Delta t_2$	۱/۶۲۴	۰/۰۰۵۸	۶۰	۲/۰۶۵	۰/۴۲
$G_1, \Delta t_1$	۲/۲۹۰	۰/۰۰۲۹			

جدول ۴- مقایسه نتایج عددی و تجربی برای مقاومت با گرید ۱ الی ۳

	$R_T(CFD)$	$R_T(EFD)$	$E[RT]\%D$
G_1	۱۱/۳۲		۴/۴۷
G_2	۱۰/۹۸	۱۱/۸۵	۷/۳۴
G_3	۱۰/۴۲		۱۲/۰۶

در این مطالعه پارامترهای دیگر بررسی نشده بنابراین U_P برابر با صفر است. خطای تکرار بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$U_I = 1/2(\hat{S}_{max} - \hat{S}_{min}) \quad (34)$$

\hat{S}_{min} و \hat{S}_{max} مقادیر حداکثر و حداقل نتایج شبیه‌سازی شده در دو پریود نوسانی آخر و برای شبکه ریز بدست می‌آید. در این مطالعه برای مقاومت کل و حرکات تریم و سینکیج، این مقدار استخراج شده است. برای تایید براساس سه راه حل، نسبت همگرایی R بصورت:

$$R = \varepsilon_{21}/\varepsilon_{32} = (S_2 - S_1)/(S_3 - S_2) \quad (35)$$

که S_1 ، S_2 و S_3 مقادیر متوسط حل‌های عددی به ترتیب برای شبکه ریز، متوسط و درشت است. زمانی که همگرایی یکنواخت باشد، مقدار $0 < R < 1$ و زمانی که $-1 < R < 0$ باشد، حل نوسانی و اگر $|R| > 1$ باشد، حل واگرا بوده و نمی‌توان عدم قطعیت را تخمین زد. در همگرایی یکنواخت از روش برونیابی ریچارسون (RE)^۱ برای تخمین U_{GT} استفاده می‌گردد و برای همگرایی نوسانی از تخمین زیر استفاده استفاده می‌شود.

$$U_{GT} = (S_u - S_L)/2 \quad (36)$$

شاخص $R = \varepsilon_{21}/\varepsilon_{32}$

اختلاف حل شبکه متوسط و ریز $\varepsilon_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$

اختلاف حل شبکه درشت و متوسط $\varepsilon_{32} = \varphi_3 - \varphi_2$

واگرایی $R > 1$

همگرایی نوسانی $R < 0$

همگرایی $0 < R < 1$

با توجه به تعریف اختلاف بین نتیجه یک شبیه‌سازی S و حالت صحیح T ، خطای شبیه‌سازی δ_S است که این خطا در برگزیده خطای عددی δ_{SN} و خطای مدلسازی δ_{SM} است و برابر با $\delta_S = S - T = \delta_{SN} + \delta_{SM}$ است. عدم قطعیت عددی بوسیله رابطه ۳۲ زیر بیان می‌شود.

$$U_{SN}^2 = U_I^2 + U_G^2 + U_T^2 + U_P^2 \quad (32)$$

زیر نویس های I, G, T, P به ترتیب عدم قطعیت تکرار، اندازه شبکه، گام زمانی و پارامترهای دیگر است. در مطالعه عملکرد کشتی چون از شبیه‌سازی در حالت غیر دائم استفاده شده است عدم قطعیت‌های U_G و U_T ترکیب شده و از تخمین عدم قطعیت گسسته‌سازی U_{GT} استفاده می‌شود که البته باید فاکتور اصلاح یکنواخت باشد؛ بنابراین برای U_{SN} داریم:

$$U_{SN}^2 = U_I^2 + U_{GT}^2 + U_P^2 \quad (33)$$

^۱ Richardson Extrapolation (RE)

$$(2) |E| < U_{req} < U_V \quad | \quad (5) U_V < U_{req} < |E|$$

$$(3) U_{req} < |E| < U_V \quad | \quad (6) U_{req} < U_V < |E|$$

سه حالت اول بیانگر رسیدن به اعتبارسنجی در سطح U_V و سه حالت آخر نیز بیانگر عدم رسیدن به اعتبارسنجی است.

طبق جدول ۳، تایید نتایج بر مبنای سه سطح شبکه-بندی با کد G1-3 ایجاد شده است. با توجه به نتایج مقاومت و حرکات، شاخص همگرایی در بازه $0 < R < 1$ قرار گرفت که همگرایی یکنواخت^۱ و به معنای بهبود نتایج انتگرالی با افزایش تعداد سلول است. با بررسی نتایج، شبکه‌بندی G_1 با مقدار $2/9$ میلیون سلول حدود $4/47$ درصد با نتایج حوضچه کشش اختلاف داشت. مقدار C کوچکتر از یک و طبق ITTC می‌توان تنها از U_{GT} را برای ارزیابی خطا استفاده نمود. مقدار خطای تکرار U_I ناچیز بوده و $U_{SN} \approx U_{GT}$ است (جدول ۶). عدم قطعیت عددی برای مقاومت کمتر از ۸ درصد بدست آمد. مقدار مطلق خطای مقایسه $|E|$ بر طبق داده‌های تست D و نتایج S بر اساس شبکه G_1 ارزیابی شده است. برای عدم قطعیت تست مدل U_D طبق مقدار $1\%D$ در نظر گرفته شده است. عدم قطعیت تست مدل در برگزیده خطای تجهیزات داده برداری از قبیل سنسورها و دینامومترها است. طبق جدول ۷ مقدار $|E|$ کمتر از مقدار U_V است و اعتبارسنجی در سطح U_V صورت گرفته و نتایج قابل اعتماد است. عدم قطعیت اعتبارسنجی تریم و سینکیج به ترتیب ۸ و $3/8$ درصد به دست آمده است. در شکل ۱۱ و ۱۲ خطوط الگوی سطح آزادی در آزمایش حول بدنه در سینه و پاشنه ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بالا آمدگی آب در سینه و فرورفتگی در پاشنه مشابه تصویر مدل تست استخراج شده است. مقایسه نتایج عددی آزمایشگاهی برای سایر سرعت‌ها در جدول ۸ ارائه شده است. خطای مقاومت در دو سرعت معادل ۱۲ و ۱۶ نات نزدیک به سرعت ۳۰ نات بود. تغییرات تریم نیز در سرعت ۱۲ نات خطای کمتری را ارائه نمود. تغییرات سینکیج با کاهش سرعت خطای آن افزایش یافت. یکی از پارمترهای مهم برای طراحی پروانه موردنیاز است. استخراج مقادیر ویک در صفحه پروانه است [۳۹-۴۱]. زمان حرکت شناور در دریا، جریان ورودی به بدنه با جریانی

که S_L و S_u به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر در تاریخچه زمانی نتایج شبیه‌سازی است. بر طبق روش RE خطای تخمینی δ_{RE}^* برابر با:

$$\delta_{RE}^* = \frac{\varepsilon_{21}}{r^p - 1} \quad (37)$$

که r و p به ترتیب پارامتر نسبت اصلاح و مرتبه دقت است. مرتبه دقت بوسیله رابطه:

$$p = \frac{\ln(\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21})}{\ln(r)} \quad (38)$$

فاکتور تصحیح C برابر با:

$$C = \frac{r^p - 1}{r^{Pest} - 1} \quad (39)$$

$Pest$ یک تخمین برای مرتبه دقت جمله اول است، بطوریکه اندازه شبکه و گام زمانی به سمت صفر میل نماید و به محدوده مجانب دار رسیده شده باشد (به عنوان مثال $C \rightarrow 1$). در این مطالعه چون از طرح گسسته‌سازی مرتبه ۲ استفاده شده است، بنابراین این پارامتر برابر ۲ در نظر گرفته شده است. U_{GT} بوسیله ۳۳ تخمین زده می‌شود که بوسیله ویلسون [۳۸] و توصیه در ITTC است.

$$U_{GT} = \begin{cases} [9.6(1-C)^2 + 1.1|\delta_{RE}^*|] & |1-C| < 0.125 \\ (2|1-C| + 1)|\delta_{RE}^*| & |1-C| \geq 0.125 \end{cases} \quad (40)$$

طبق روند ITTC رابطه ۴۰ یک تخمین را در زمانی که $C \rightarrow 1$ یا $C < 1$ باشد، ارائه می‌دهد.

اعتبارسنجی به عنوان فرآیندی برای ارزیابی عدم قطعیت شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های مرجع یا آزمایشگاهی است. این روند بررسی می‌کند که آیا معادلات حاکمه به درستی حل شده‌اند. خطای مقایسه E به عنوان اختلاف بین نتایج آزمایش D و شبیه‌سازی S است که برابر با:

$$E = D - S = T + \delta_D - (T + \delta_{SM} + \delta_{SN}) = \delta_D - (\delta_{SM} + \delta_{SN}) \quad (41)$$

عدم قطعیت اعتبارسنجی U_V بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$U_V^2 = U_D^2 + U_{SN}^2 \quad (42)$$

که U_D عدم قطعیت تست مدل است. برای اینکه مشخص شود به اعتبارسازی رسیده است خطای E با عدم قطعیت اعتبارسنجی U_V و عدم قطعیت اعتبارسنجی با شبیه‌سازی مرجع U_{req} مقایسه می‌شود. اگر سه متغیر نابرابر باشند، یکی از حالات زیر را داریم:

$$(1) |E| < U_V < U_{req} \quad | \quad (4) U_V < |E| < U_{req}$$

¹ Monotonic

جدول ۵- مقایسه نتایج عددی و تجربی برای سینکج و تریم با گرید ۱ الی ۳

	$\sigma[mm](CFD)$	$\tau^0[deg.](CFD)$	$\sigma[mm](EFD)$	$\tau^0[deg.](EFD)$	$E[\sigma]\%D$	$E[\tau^0]\%D$
G_1	-۷/۳	-۰/۵۹۸			۱/۳۵	-۱/۳۵۵
G_2	-۷/۵	-۰/۶۴	-۷/۴	-۰/۵۹	-۱/۳۵	-۸/۴۷
G_3	-۷/۸۸	-۰/۷۱۸			-۶/۴۸	-۲۱/۶۹

جدول ۶- نتایج تایید

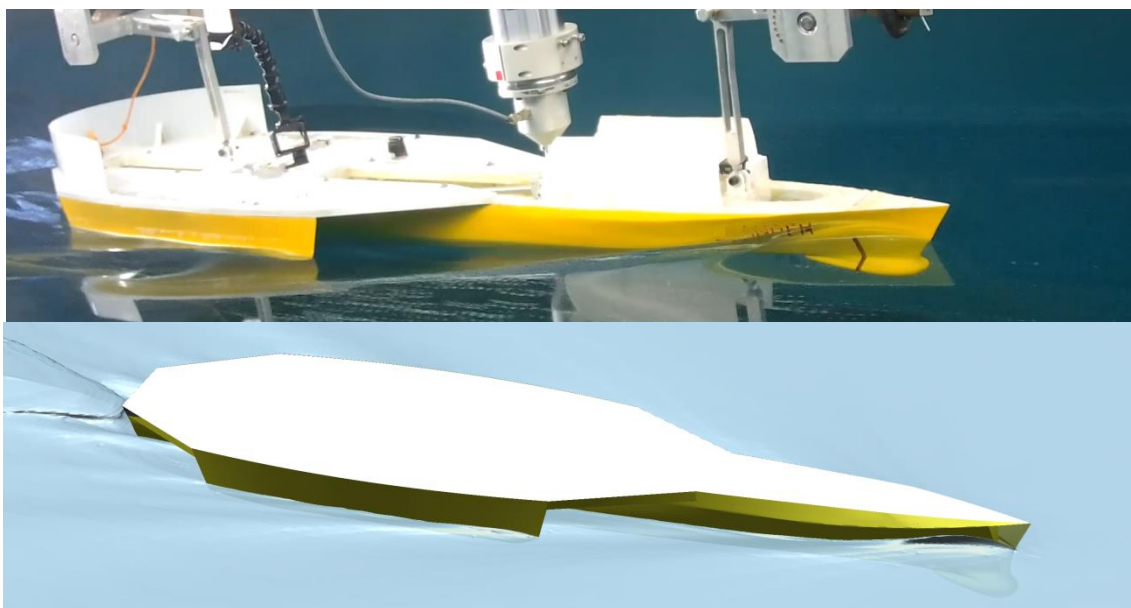
	ε_{21}	ε_{32}	R	p	δ_{RE}^*	C	U_{GT}	U_I	U_{SN}	$U_{SN}(\%S)$
Resis.	-۰/۳۴	-۰/۵۶	۰/۶۰۷	۱/۴۳۹	-۰/۵۲۵	۰/۶۴۷	۰/۸۹۶	۰/۰۰۱	۰/۸۹۶	۷/۹۱
Trim	۰/۰۴۲	۰/۰۷۸	۰/۵۳۸	۱/۷۸۶	۰/۰۴۴۴	۰/۹۵۲	۰/۰۴۸۲	۰/۰۲	۰/۰۴۸۲	۸/۰۷
Sinkage	۰/۲	۰/۳۸	۰/۵۲۶	۱/۸۵۲	۰/۲۲۲	۰/۹	۰/۲۶۶	۰/۰۱	۰/۲۶۶	۳/۶۵۵

جدول ۷- نتایج اعتبارسنجی

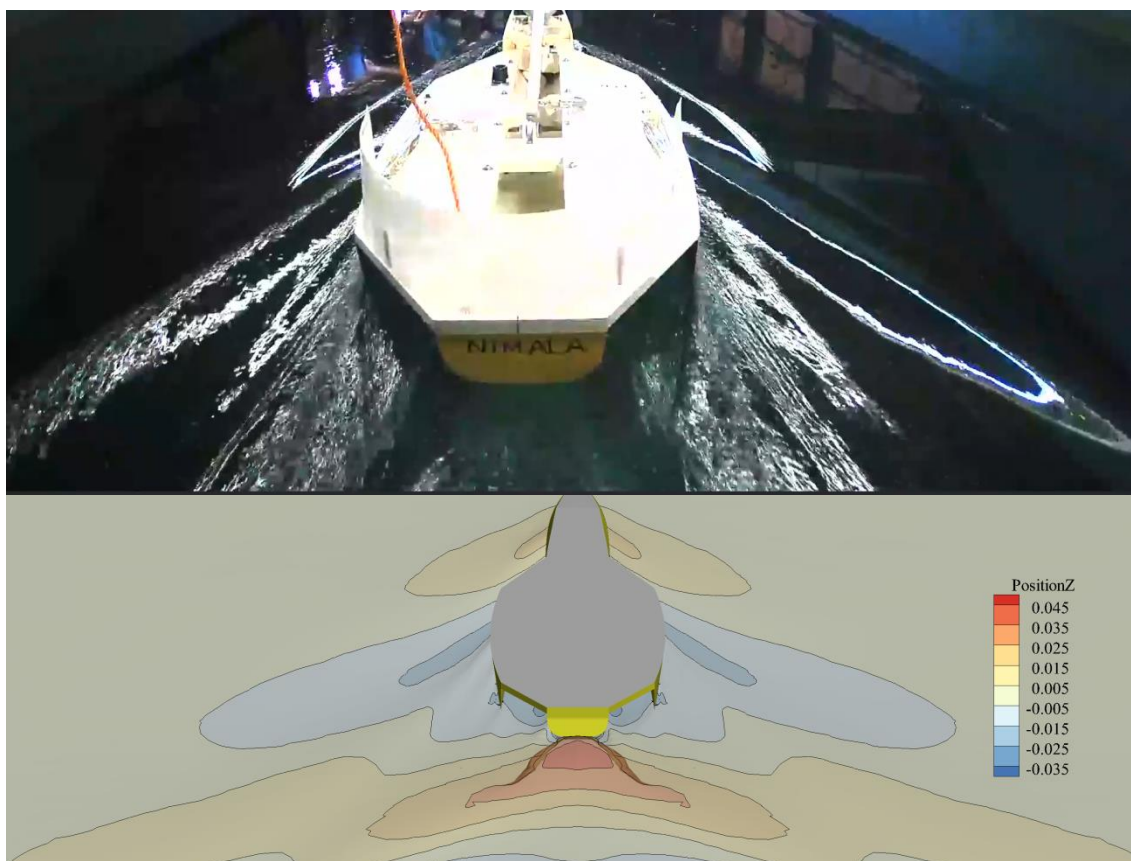
	$ E (\%D)$	$U_D (\%D)$	$U_{SN} (\%S)$	$U_V (\%D)$
Resis.	۴/۴۷	۱	۷/۹۱	۷/۹۸
Trim	۱/۳۵۵	۱	۸/۰۷	۸/۱۳۱
Sinkage	۱/۳۵	۱	۳/۶۵۵	۳/۷۸۹

جدول ۸- مقایسه نتایج عددی و تجربی برای مقاومت، تریم و سینکج برای سایر سرعت‌ها بوسیله شبکه بندی G2

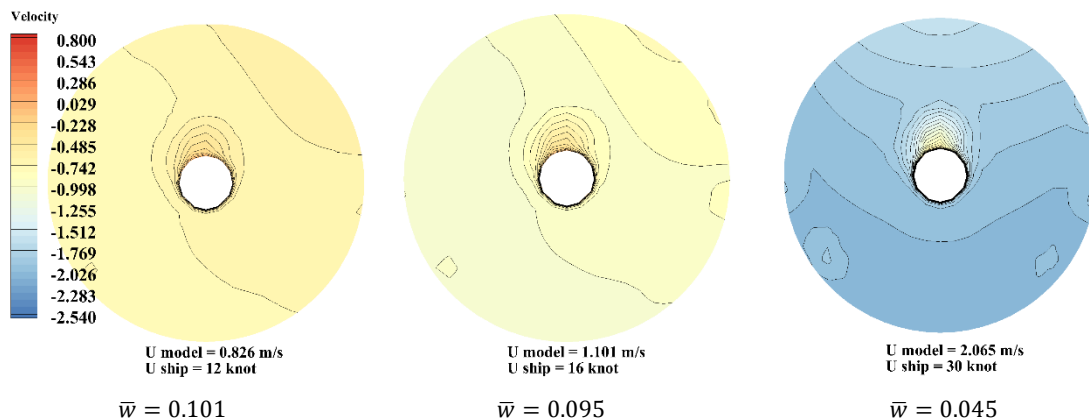
$U [m/s]$	۰/۸۲	۱/۱۰۱	۲/۰۶
$R_T(CFD)$	۱/۴۷	۲/۴۸	۱۰/۹۸
$R_T(EFD)$	۱/۵۶۸	۲/۶۴۶	۱۱/۸۵
$E[RT]\%D$	۶/۲۵	۶/۲۷	۷/۳۴
$\tau^0[deg.](CFD)$	$-۸/۹e^{-5}$	۰/۰۱۲	-۰/۶۴
$\tau^0[deg.](EFD)$	۰	۰/۰۱۱	-۰/۵۹
$E[\tau^0]\%D$	-۰/۰۰۸۹	-۹/۰۹	-۸/۴۷
$\sigma[mm](CFD)$	-۰/۶۵	-۱/۴	-۷/۵
$\sigma[mm](EFD)$	-۰/۸	-۱/۲	-۷/۴
$E[\sigma]\%D$	-۱۸/۷۵	-۱۶/۶	-۱/۳۵



شکل ۱۱- تغییرات سطح آزاد در سینه در سرعت $2/065$ متر بر ثانیه معادل سرعت واقعی ۳۰ نات



شکل ۱۲- تغییرات سطح آزاد در پاشنه در سرعت $2/065$ متر بر ثانیه معادل سرعت واقعی ۳۰ نات



شکل ۱۳- مقادیر ویک در سرعت‌های مختلف

جسم صلب و شبیه‌سازی جریان آشفته ارائه شد و پارامترهای مهم صحت شبیه‌سازی جریان از قبیل فاصله بی‌بعد از دیواره، و عدد کورانت برای شبیه‌سازی استخراج و تایید گردید. در مطالعه عددی از مدل آشفتگی کی اسپیلون و مدل دو فازی وی او اف استفاده شد. اصلاحات متناسب با گرادیان‌های فشار در شبکه بندی در نظر گرفته شد. در بخش سوم عدم قطعیت و تایید نتایج ارائه شد. روند انجام محاسبات طبق توصیه‌نامه ITTC صورت گرفت. پارامترهای موثر و معیارها ذکر گردید. در این راستا سه سطح شبکه بندی با فاکتور رشد $\sqrt{2}$ مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. و روی این سه شبکه بندی محاسبات صورت گرفت. نتایج تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. خطای مقاومت برای شبکه ریز کمتر از ۵ درصد، برای تریم و سینکیج نیز کمتر از ۱/۵ درصد بود. مقدار عدم قطعیت عددی و اعتباربخشی برای بررسی مقاومت بدنه کمتر از ۸ درصد و برای تریم و سینکیج به ترتیب ۸ و ۳/۷ درصد بدست آمد. خطای عددی مقاومت در سرعت گشت‌زنی و حداقل در محدوده نزدیک به سرعت ماکزیمم بود. خطای تریم نیز در سرعت حداقل کمترین بود. خطای سینکیج با کاهش سرعت افزایش یافت. الگوی سطح آزاد شبیه‌سازی عددی حول بدنه استخراج و با تصاویر تست مقایسه شد که به وضوح بالآمدگی آب در سینه و فرورفتگی در پاشنه مشاهده گردید. مقدار ویک ورودی به پروانه بواسطه یک دیسک در پاشنه محاسبه گردید.

که در پاشنه مشاهده می‌شود، متفاوت است که این اثر را با پارامتر ویک معرفی می‌شود. مقدار ویک بوسیله رابطه زیر محاسبه می‌شود. \bar{V} سرعت متوسط در صفحه پروانه، V_{Ship} سرعت در مرز ورودی دامنه محاسباتی است.

$$\bar{w} = 1 - \bar{V}/V_{Ship} \quad (41)$$

در شکل ۱۳ خطوط هم‌تراز مقادیر ویک در سرعت‌های مختلف ارائه شده است. که با افزایش سرعت مقدار ویک کاهش یافته است. دلیل این امر افزایش آشفتگی و در نهایت فرصت کمتر برای جدایش جریان است. قسمت بالای صفحه ویک را که بیشترین اتلاف سرعت را شامل می‌شود ناحیه مرگ می‌نامند. معمولاً در کیفیت ویک بیشتر یکنواختی مطلوب‌تر است، یعنی جریان بصورت هم‌راست‌تر وارد پروانه شده و از بارگذاری‌های نامتقارن روی پروانه کاسته شود. از مقادیر ویک برای محاسبه سرعت پیشروی و ضریب پیشروی در چرخه طراحی پروانه استفاده می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری

در بخش اول آزمایش مقاومت برای یک شناور سه بدنه سنگین در سرعت‌های حداقل، گشت‌زنی و ماکزیمم در حوضچه کشش انجام گردید. روند انجام آزمایش و الزامات هر مرحله ارائه شد. روند ساخت مدل و توصیه‌های ساخت طبق ITTC ارائه و روی مدل اجراء شد. آزمایش در شرایط آب آرام و با آزادی حرکات سرج، سینکیج و تریم صورت گرفت. شرایط پیش تنظیم آزمایش و تجهیزات آزمایش معرفی گردید. در بخش دوم معادلات حاکمه دینامیک

[18] STAR CCM+ (2017) User Guide Version 14.04.

[19] Guo H.p and Z.j. Zou J. (2017) System-based investigation on 4-DOF ship maneuvering with hydrodynamic derivatives determined by RANS simulation of captive model tests. *Appl Ocean Res* 68: 11-25.

[20] Shenoi RR, Krishnankutty P, Selvam RP, Kulsreshtha A (2013) Prediction of maneuvering coefficients of a container ship by numerically simulating HPMM using RANSE based solver. in *Proc. 3rd MASHCON*, Ghent, Belgium.

[21] Yeo D, Yun K, Kim Y (2016) Experimental Study on the Manoeuvrability of KVLCC2 in Shallow Water. in *4th MASHCON* 287-294.

[22] STAR-CCM+ (2017) STAR-CCM+ Documentation.

[23] Versteeg HK, Malalasekera W (2007) An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. Pearson Education.

[24] Bertram V. (2012) *Practical ship hydrodynamics*. Elsevier sci.

[25] Tezdogan T, Demirel YK, Kellett P, Khorasanchi M, Turan O (2015) Full-Scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance. *Head Sea Due To Slow Steaming Ocean Eng* 97: 186-206.

[26] Luis AEC, Vaz G, Hoekstra M (2010) Code verification, solution verification and validation in RANS solvers. *Proc Int Conf. Offshore Mech Arct Eng OMAE*.

[27] A. I. O. (1998) *Aeronautics and Astronautics. guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations*. AIAA.

[28] Shen Hc, Yao Zq, Wu BS, Zhang N, RYJJOS, Yang M (2010) A new method on uncertainty analysis and assessment in ship CFD. *J Hydrodyn B* 10: 1071-1083.

[29] Simonsen CD, Stern FJC (2003) Verification and validation of RANS maneuvering simulation of Esso Osaka: effects of drift and rudder angle on forces and moments. *Comput Fluids* 32 :1325-1356.

[۳۰] [کرمی س، هادی پور گودرزی ر (۲۰۲۰) مطالعه تایید و اعتبارسنجی در روش دینامیک سیالات محاسباتی برای نتایج مقاومت کشتی کاننتینربر KCS بوسیله مدل توربولانسی انتقال تنش برشی. فصلنامه علمی پژوهشی دریا فنون ۸۵-۷۰: (۲)۸.

[31] ITTC (2011) *Guidelines: Practical guidelines for ship cfd applications*. 7: 02-03.

[32] ITTC Manual (1999) *Uncertainty analysis in CFD uncertainty assessment methodology*. The 22nd ITTC, Seoul and Shanghai.

۵- مراجع

[1] Dubrovsky V (2016) Specificity and designing of multi-hull ships and boats. *Specificity and Designing of Multi-Hull Ships and Boats* 1-217.

[2] Dubrovsky VA (2010) Multi-Hulls: Some new options as the result of science development. *Brodogradnja: Tisak* 61: 142-152.

[3] Grafton TJ (2008) *The roll motion of trimaran ships*. University of London, UCL.

[4] Hafez K, El-Kot A (2012) Comparative investigation of the stagger variation influence on the hydrodynamic interference of high speed trimaran. *Alex Eng J* 51: 153-169.

[5] Zhang J (1997) *Design and hydrodynamic performance of trimaran displacement ships*. UCL.

[6] Akbari VK, Khedmati M, HasanAbadi A, Mohammadi A (2018) Resistance Prediction for a novel trimaran with wave piercing bow. *IJMT* 29: 33-40.

[7] Deng R, Li C, Huang D, Zhou G (2015) The effect of trimming and sinkage on the trimaran resistance calculation. *Procedia Eng* 126: 327-331.

[8] Gong J, Li Y, Jiang F (2019) Numerical simulation about the manoeuvre of trimaran and asymmetric twin hull with hull attitude taken into account by OpenFOAM. *J Mar Sci* 1-18.

[9] Hatlevik AS (2018) Resistance analysis of trimaran service vessel using CFD. NTNU.

[10] Heidari M, et al. (2019) Numerical analysis of side hull configuration in Trimaran. *Rev Int Metodos Numer Para Calc Diseno Ing* 35.

[11] Su G, Shen H, Su Y (2020) Numerical Prediction of hydrodynamic performance of planing trimaran with a wave-piercing bow. *J Mar Sci Eng* 9: 897.

[12] Son CH (2015) *CFD Investigation of resistance of high-speed trimaran hull forms*. Florida Tech.

[13] Luhulima RB (2017) An investigation into the resistance of displacement trimaran: A Comparative analysis between experimental and CFD approaches. *IASET* 6: 9-18.

[14] ITTC (2017) *ITTC Recommended Guideline: Model Manufacture Ship Models:1-7*.

[15] ITTC (2014) *ITTC-Recommended Procedures and guidelines Pracial guidelines for ship CFD application* 7.5-03-02-03.

[16] ITTC (2014) *ITTC Recommended Procedures and guidelines practical guidelines for ship Resitance CFD* 7.5-03-02-04.

[17] ITTC (2014) *ITTC-Recommended Procedures and guidelines Practical Guideline Practical Guidelines for RANS calculation of Nominal wakes* 7.5-03-03-02.

- [38] Wilson R, Shao J, Stern FJ (2004) Discussion: Criticisms of the correction factor verification method. *J Fluids Eng* 26: 704-706.
- [39] Carlton J (2012) *Marine propellers and propulsion*. Butterworth-Heinemann.
- [۴۰] کرمی س، ملکی ع، هادیپورگودرزی ر ا، علیزاده ا (۲۰۲۰) طراحی و بررسی عددی جریان پایا و ناپایا حول پروانه باز و بسته در آب آزاد بوسیله مدل های SRANS و URANS. فصلنامه علمی پژوهشی مکانیک تبریز ۱۹۴-۱۸۵ (۳): ۵۰.
- [۴۱] کرمی س، میرزایی ق، ملکی ع (۲۰۲۰) تحلیل عددی جریان حول یک پروانه گام ثابت و PBCF به روش CFD. فصلنامه علمی پژوهشی دریا فنون ۱۱۱-۹۸ (۳): ۷.
- [33] ITTC Procedures (1999) ITTC-Recommended Procedures-Performance, Propulsion in International Towing Tank Conference 7.5-02.
- [34] ITTC Procedures (2002) Uncertainty analysis in CFD, uncertainty assessment methodology and Procedures. in *In Proceedings of the International Towing Tank Conference, Venice, Italy* 7.5-02.
- [35] ITTC Procedures (2017) Uncertainty Analysis in CFD, Verification and Validation Methodology and Procedures. ITTC-Recommended Procedures and Guidelines 7.5-03-01-01. In *Proceedings of the International Towing Tank Conference, Wuxi, China*.
- [36] Oberkampf WL, Blottner FG (1998) Issues in computational fluid dynamics code verification and validation. *AIAA J* 36: 687-695.
- [37] Richardson LF, Gaunt JA (1927) containing papers of a mathematical or physical character. VIII. The deferred approach to the limit. *JSTOR* 226: 636-646.