

شبیه‌سازی و اعتبار‌سنجی تست‌های مانور استاندارد مدل

کانتینربر KCS به روش دینامیک سیالات محاسباتی

سعید کرمی^۱، عسگری براریان^۲، روح‌الله هادی پور گودرزی^۲

^۱دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، s_karami_mut_ac@dr.com

^۲دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری شمال

چکیده

امروزه حمل‌ونقل دریایی در حال افزایش و احتمال تصادم شناورها در مناطق پرتراکم افزایش یافته است. در این راستا بهبود عملکرد مانور شناور به‌طور مستقیم روی اقتصاد و امنیت ناوبری اثر می‌گذارد؛ بنابراین مطالعه پارامترهای مانور، موضوعی الزامی در فرآیند طراحی کشتی است. در این مطالعه معتبر سازی نتایج به‌واسطه عدم قطعیت و تأیید برای شناور مرجع KCS انجام شده است. شناور مرجع در عدد فرود ۰/۲۰۱ در حالت سه درجه آزادی شامل: سرچ، هیو و پیچ و شرایط آب آرام مورد بررسی قرار گرفت. سپس به روش دینامیک سیالات محاسباتی نتایج مورد مقایسه قرار گرفت. تأیید و اعتباربخشی طبق توصیه‌نامه ITTC به‌وسیله سه سطح شبکه‌بندی انجام و مقدار عدم قطعیت عددی نیز تخمین زده شد. مقدار عدم قطعیت کمتر از ۱۲ درصد و خطای عددی نسبت به تجربی نیز کمتر از ۶ درصد استخراج گردید. تطابق مناسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی ارائه شد. به‌منظور مدل‌سازی جریان حول بدنه از مدل دو فاز VOF و مدل آشفتگی DES بهره گرفته شد. اثر پروانه به روش دیسک محرک و طی یک روند نمای در پاشنه شناور وارد گردید.

کلمات کلیدی

روش حجم محدود، دینامیک سیالات محاسباتی، مدل حرکت صفحه‌ای، اسوی و یاو خالص، استاندارد IMO.

Simulation and validation of standard maneuver tests of KCS container model by computational fluid dynamics method

Saeed Karami¹, Rouhollah H. Goudarzi²

¹ Northern Research Center for Science & Technology, Malek Ashtar University of Technology, Iran; s_karami_mut_ac@dr.com

² Northern Research Center for Science & Technology, Malek Ashtar University of Technology, Iran

Abstract

Nowadays, maritime transport is increasing significantly, and the probability of collisions between ships in densely populated region has increased. In this regard, improving the ship maneuvering performance has a significant impact directly on the economy and safety of navigation. Therefore, the study of maneuver parameters is considered as a mandatory issue in the process of designing a ship. In this study, first the validation of the results has been done for the KCS. The benchmark ship at froud number 0.201 was simulated in three degrees of freedom including: surge, heave and pitch and calm water conditions, then the results were compared by computational fluid dynamics. Validation was performed according to the ITTC Recommendation by three levels of gridding, and the value of numerical uncertainty was also estimated. Uncertainty less than 12% and numerical error respect to experimental less than 6% were extracted. A good match was presented between the numerical and laboratory results. A good match was presented between the numerical and laboratory results. The two-phase flow the Volume Of Fluid (VOF) method and the DES turbulence model were used to model the flow around the hull. The effect of propeller was induced by actuator disk method and based on flowchart in ship stern.

Keywords

Finite volume method, Computational fluid dynamics, Planer motion mechanism, Yaw and sway pure, IMO Standard

امروزه حمل و نقل دریایی در حال افزایش و احتمال تصادم شناورها در مناطق پرتراکم افزایش یافته است. در این راستا بهبود عملکرد مانور شناور به طور مستقیم روی اقتصاد و امنیت ناوبری اثر می‌گذارد. چون پس از ساخت شناور تغییر ویژگی های مانور دشوار است، بنابراین مطالعه پارامترهای مانور، موضوعی الزامی در فرآیند طراحی کشتی است. سازمان دریایی بین‌المللی^۱ [۱] توصیه‌هایی در رابطه با رفتار مانور شناور با توجه به سناریو حرکت ارائه نموده است. طبق استاندارد باید در مراحل ابتدایی طراحی الزامات مانور ارضاء گردد. کویتز [۲] در سال ۱۹۶۴ برای شناور یک مدل ریاضیاتی برای بیان نیروها و گشتاورها، بر اساس بسط تیلور نسبت به متغیرهای حالت ارائه نمود. گرتر ۱۹۶۹ [۳] و فیلدمن [۴] ۱۹۷۹ برای روندهای زیرسطحی مدل دینامیک تا مرتبه دوم را ارائه و نیروهای رانش و سکان را همراه با بدنه معرفی نمودند. اوگاوا و کاسای در سال ۱۹۷۸ از حوضچه کشش ژاپن، مدل مدولار^۲ MMG را معرفی نمودند. این مدل شامل نیروهای پروانه، سکان و بدنه با سهم‌های جداگانه است [۵-۷]. لطیف و همکاران [۸] مانورهای تانکر اوزاکا را با مدل آبکویتز شبیه‌سازی کردند. اراکی و همکاران مانور مدل ONRT را در آب آرام به روش‌های تست حوضچه و CFD بررسی و مقایسه نمودند مطابق نتایج آن‌ها، نتایج روش CFD به تست تجربی نزدیک است. اراکی و همکاران [۹] مانور شناور ONRT را به روش مستقیم در آب آرام و موج بررسی نمودند. آن‌ها تست زیگراگ و دایره چرخش را در امواج از پشت^۳، مایل و از پشت^۴ انجام و در مدل سیستم- مبنا خود نیز برای وارد نمودن اثر موج از نیروی فرود-کریلوف و مدل ویبول استفاده نمودند. بالگوپلان و همکاران [۱۰]، حاجیوند و همکاران [۱۱] ضرایب هیدرودینامیکی را به روش عددی و تست محاسبه و تست‌های زیگراگ و دایره‌ای را محاسبه نمودند. جین و همکاران [۱۲] مانور زیگراگ و دایره شناور KCS را به روش CFD در آب آرام و موج منظم شبیه سازی نمودند. لی و همکاران [۱۳] یک مسیر مانور معین را شبیه‌سازی و ساختار ویک را در ملحقات و پروانه‌ها بررسی جزئی نمودند. هریس و همکاران [۱۴] اثرات سرعت و هندسی سکان را روی مانور بررسی نمودند. با افزایش سطح سکان و سرعت قطر دایره چرخش کاهش یافت. هریس و همکاران

[۱۵] سیستم رانش پاددار^۵ و پروانه مرسوم را در مانور دایره و زیگراگ مقایسه نمودند که رانش پاددار مؤثرتر بود. شینوی و همکاران [۱۶] ضرایب شناور کانتینربر را محاسبه و مانور چرخش و زیگراگ را با چهار درجه آزادی شناور شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها با تجربی تطابق مناسب داشت. یکی از مسائل مهم در مدل‌سازی مانور محاسبه نیروهای وارد به شناور در قالب مشتقات هیدرودینامیکی است. در این راستا می‌توان از روابط رگرسیون، تست‌های مقید در حوضچه، تعمیم نتایج شناور مشابه و CFD بهره برد. تایموری و همکاران [۱۷] ساوکس و همکاران [۱۸] روابط رگرسیونی برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیک را ارائه نمودند. کیم و همکاران [۱۹]، ساوکس و همکاران [۲۰] ضرایب استاتیکی و دینامیکی یک شناور را به روش تست مدل و عددی محاسبه نمودند. عدنیان و مهدی [۲۱] تأثیر دامنه و فرکانس را روی حرکت مقید پیچ خالص بررسی نمودند. اثر تغییرات دامنه و فرکانس می‌تواند تا ۳۵ درصد مقادیر ضرایب را تغییر دهد. اردشیری و همکاران اثر دامنه و فرکانس را روی یک بیضی‌گون در حرکات دینامیکی اسوی و یاو خالص بررسی نمودند. عباسی و همکاران [۲۲] آنالیز حساسیت را برای ضرایب هیدرودینامیکی و اثر آن را روی پارامتر دایره چرخش بررسی نمودند. حکمی‌فرد و رستمی [۲۳]، فروشانی و گندمکار [۲۴] ضرایب دینامیکی را محاسبه و معتبرسازی نمودند.

در این مقاله تست‌های مانور استاتیکی و دینامیکی مدل شناور KCS شبیه‌سازی و سپس اعتبارسنجی خواهد شد. در این راستا حرکات اسوی و یاو خالص طبق دامنه و فرکانس مشخص اعمال می‌گردد. در مانور استاتیکی نیز شناور در چند زاویه دریافت شبیه‌سازی می‌گردد. به‌منظور مدل‌سازی جریان حول بدنه از معادلات ناویراستوکس سه‌بعدی، مدل سطح آزاد VOF و اثر پروانه نیز به‌واسطه روش تئوری دیسک محرک اعمال خواهد شد.

۲- معتبرسازی

۲-۱- استخراج ضرایب استاتیکی و دینامیکی

در اینجا به‌منظور تأیید روش عددی از نتایج تجربی شناور کانتینربر KCS استفاده شده است. شناور KCS یک مدل مرجع بوده و به‌عنوان مرجع اکثر مسائل عددی (در

4 Quartering Sea

5 Podded

1 International Maritime Organization

2 Maneuvering Modeling Group

3 Following Sea

زمینه‌های مقاومت، دریامانی و مانور) در نظر گرفته می‌شود [۲۵]. در جدول ۱ مشخصات شناور ارائه شده است.

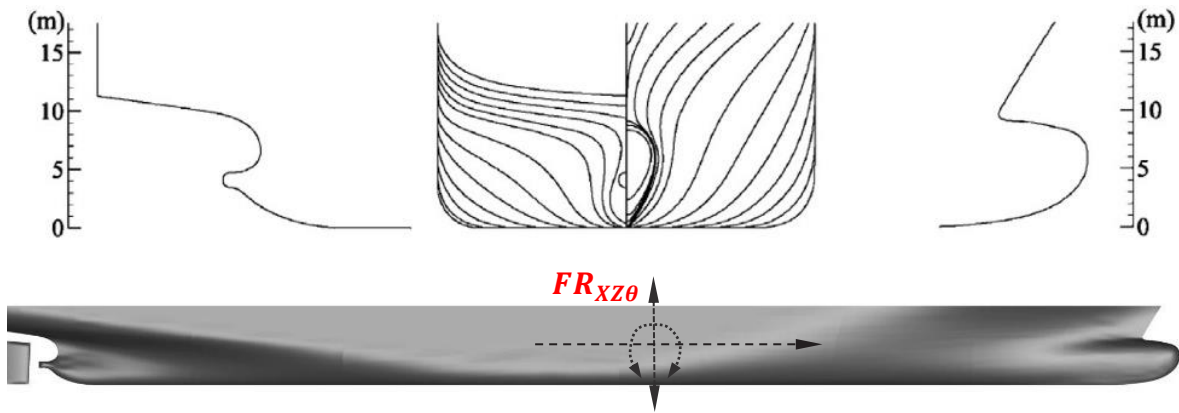
جدول ۱- مشخصات شناور KCS [۲۵]		
پارامتر	نماد و مقدار	بدنه
طول بین دو عمود	L_{pp} [m]	4.3671
عرض حداکثر خط آب	B [m]	0.6114
آبخور	d [m]	0.20506
حجم جابجایی	∇ [m ³]	0.3562
ضریب بلوکی	C_B [-]	0.651
ضریب مقطع میانی	C_M [-]	0.985
مرکز جرم طولی	LCG [m]	2.119
شعاع ژیراسیون رول	K_{xx}/L_{pp} [-]	0.4
شعاع ژیراسیون یاو	K_{yy}/L_{pp} [-]	0.25
سکان		
سطح کل سکان	S_R [m ²]	0.0415
سطح مؤثر سکان	A_R [m ²]	0.0196

پروانه		
قطر	D [m]	0.15
مرکز طولی پروانه	x_p/L_{pp} [-]	0.9825
مرکز عمودی پروانه	z_p/L_{pp} [-]	0.02913

در شکل ۱ خطوط بدنه، نمای جانبی شناور و درجات آزادی شناور شامل (سرج، هیو و پیچ $FR_{xz\theta}$) نشان داده شده است. معادله دینامیک سه درجه آزادی ساده شده در شبیه‌سازی CFD شامل:

$$\begin{cases} m[wq] = X \\ m[\dot{w} - uq] = Z \\ I_{yy} [\dot{q}] = M \end{cases} \quad (1)$$

متغیرهای X و Z دربرگیرنده مجموع نیروهای هیدرودینامیکی فشاری، ویسکوز روی المان‌های سطحی جسم صلب و نیروهای هیدرواستاتیکی هستند و M مجموع گشتاور حول محور y است که منجر به سرعت زاویه‌ای پیچ q می‌گردد.



شکل ۱- خطوط بدنه و نمای جانبی بدنه KCS

شناور که در مرز ورودی تعیین شده، مقدار $V_{inflowplane}$ در صفحه آفست شده تا ورودی دیسک محاسبه و ضریب پیشروی محاسبه می‌شود، سپس در مرحله ۲ طبق ضریب پیشروی مقدار ضرایب تراست و گشتاور میان‌یابی می‌گردد. در مرحله ۳ مقدار نیروهای تراست T و گشتاور Q ، در مرحله ۴ شعاع موضعی r و بی‌بعد r^* ، در مرحله ۵ ضرایب تجربی گلدشتاین $A_{x\theta}$ و نصف‌النهاری A_{θ} محاسبه می‌شوند، این ضرایب تجربی بوده و تابعی از تراست و گشتاور، ضخامت دیسک Δ ، شعاع هاب R_H و نوک پروانه R_p هستند. در

به‌منظور استخراج ضرایب استاتیکی و دینامیکی در شبیه‌سازی عددی از نکات توصیه‌نامه ITTC [۲۶، ۲۷] استفاده شده است. از آنجایی که هزینه محاسباتی روش دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند زیاد باشد، در این راستا به‌جای مدل‌سازی واقعی پروانه اثر آن به روش دیسک محرک [۲۸] در محاسبات وارد شده است. در روش دیسک محرک به‌جای پروانه یک دیسک با ضخامت معین قرار داده و سپس گشتاور و نیرو به مقاطع دیسک وارد و منتوم سیال افزایش می‌دهد. طبق شکل ۲ در مرحله ۱ براساس سرعت

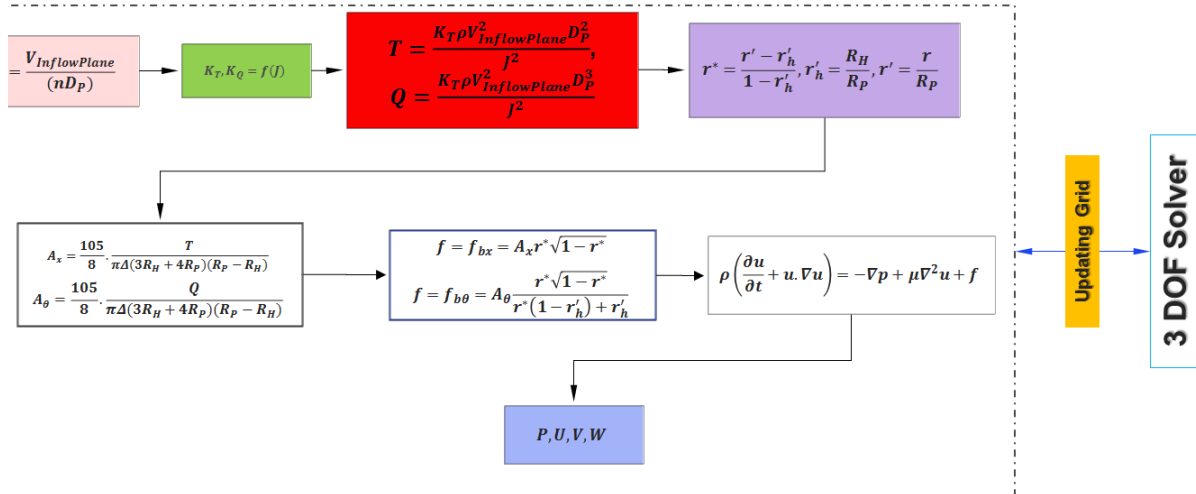
نقطه کار پروانه متناظر با نقطه خودرانش و دور پروانه ۱۴ دور بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

۱-۱-۲- مدل سازی حرکت

عملکرد هیدرودینامیکی مطلوب یک وسیله دریایی در مسائل هدایت، ناوبری و کنترل اهمیت بسیار زیادی دارد. یک ابزار مفید و مناسب برای بررسی نحوه عملکرد هیدرودینامیکی وسیله، شبیه سازی دینامیکی معادلات حرکت وسیله است. برای حل معادلات حرکت باید نیروها و گشتاورهای وارد بر وسیله تعیین گردد.

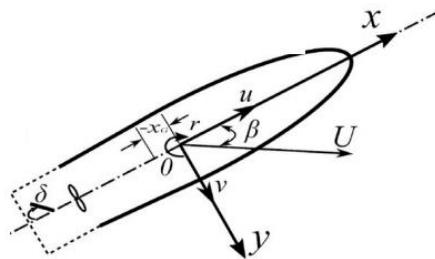
مرحله ۶ نیروهای محوری f_{bx} و نیروی نصف النهاری $f_{b\theta}$ تحت عنوان نیروی f محاسبه و در جمله منبع ناوبری- استوکس قرار داده شده و سپس به همراه حل معادله پیوستگی مقادیر سرعتها و فشارها با حضور اثر این جمله محاسبه می گردد.

همچنین نیروی دیسک محرک با مدل دینامیک سه درجه آزادی 3DOF بدنه صلب کوپل و اثر خود را وارد می نماید. در این روش دور پروانه n ، قطر پروانه D_p و منحنی عملکرد پروانه (بر حسب J) به عنوان ورودی در نظر گرفته می شود.



شکل ۲- روند محاسبه اثر پروانه به روش دیسک محرک

β داشته باشیم، می توان با مشتق گرفتن تغییرات نیرو نسبت به $v = U \sin \beta$ این ضرایب را به دست آورد. ورودی های این حالت سرعت کشش و زاویه دریفت است. خروجی تاریخچه زمانی نیروها و ممان وارد بر مدل است.



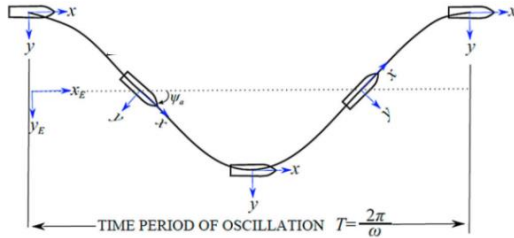
شکل ۳- نحوه حرکت دریفت استاتیکی

جدول ۲- حالات شبیه سازی استاتیکی [۴۶]

حالت	Fr [-]	β°	δ°
استاتیک	0.201	0, ± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 12	0

این نیروها و گشتاورها در قالب ضرایب هیدرودینامیکی بیان می شوند. این ضرایب در واقع نحوه تغییرات نیرو و گشتاور را تعیین می کنند. به طور کلی جهت استخراج ضرایب هیدرودینامیکی، می توان دو روش استاتیک و دینامیک برای مدل مقید انجام داد. در شرایط استاتیک، مدل مقید شده با سرعت ثابت ارا به کشیده می شود. حالت استاتیک شامل دریفت^۱ استاتیکی بدنه با زاویه دریفت β ، دریفت استاتیکی سکان با زاویه δ و ترکیبی دریفت بدنه- سکان به همراه زاویا β و δ است. در این بخش فقط دریفت استاتیکی بدنه معتبر سازی و ارائه شده است. به منظور انجام حالت استاتیکی، شناور حول محور یاو در چند زاویه قرار داده شده و سپس نیروها در مقابل سرعت عرضی ترسیم و ضرایب به دست می آیند. این حالت ضرایب مهمی از قبیل N_{Yv} , N_{Yvv} , N_{Yv} , N_{Yvv} را ارائه می نماید. طبق شکل ۳ اگر راستای محوری طولی شناور نسبت به سرعت کشش U زاویه

جهت عرضی و به صورت مماس بر مسیر حرکت نوسان می‌کند. در حالت اسوی خالص ضرایبی نظیر $N_{\dot{r}}$, $Y_{\dot{r}}$ را می‌توان استخراج نمود. طبق شکل ۵ در حالت یاو خالص شناور به صورت موازی با محور طولی حرکات سینوسی انجام می‌دهد.



شکل ۵- نحوه حرکت یاو خالص

مسیر حرکت، زاویه یاو لحظه‌ای، سرعت، شتاب زاویه‌ای و زاویه یاو ماکزیمم به صورت روابط ۷ الی ۱۱ است.

$$y = (y_0) \sin(\omega t) \quad (7)$$

$$\psi = (\psi_0) \cos(\omega t) \quad (8)$$

$$r = \dot{\psi} = -(\psi_0 \omega) \sin(\omega t) \quad (9)$$

$$\dot{r} = \ddot{\psi} = -(\psi_0 \omega^2) \cos(\omega t) \quad (10)$$

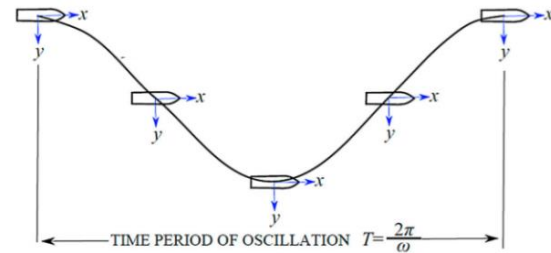
$$\psi_0 = \frac{y_0 \omega}{U_C} \quad (11)$$

در روابط ۹ و ۱۰ به ترتیب برابر با $r_{max} = (\psi_0 \omega)$ و $\dot{r}_{max} = (\psi_0 \omega^2)$ است [۲۹]. در حالت یاو خالص ضرایبی نظیر $N_{\dot{r}}$, $Y_{\dot{r}}$ را می‌توان استخراج نمود. در جدول ۳ شرایط ورودی شبیه‌سازی دینامیکی اسوی و یاو خالص ارائه شده است.

جدول ۳- حالات شبیه‌سازی دینامیکی [۴۶]

حالت	Fr[-]	β°	δ°	v'_{max}	r'_{max}
اسوی خالص		0	0	0.139	0
یاو خالص		0	0	0	0.406

در حالت دینامیکی مدل مجبور به حرکت بر اساس مسیرهای نوسانی سینوسی خواهد شد که به صورت ترکیبی از حرکات اسوی و یاو است. این حالات شامل اسوی خالص، یاو خالص و ترکیبی یاو-دریفت یا (اسوی) است. طبق شکل ۴ در حالت اسوی خالص شناور به صورت موازی با محور طولی حرکت سینوسی انجام می‌دهد.



شکل ۴- نحوه حرکت اسوی خالص

مسیر حرکت، سرعت، شتاب خطی، زاویه دریفت لحظه‌ای و ماکزیمم به صورت روابط ۲ الی ۶ است. در این حرکات مقادیر $r = \dot{r} = \psi = 0$ است.

$$y = (y_0) \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$v = \dot{y} = (y_0 \omega) \cos(\omega t) \quad (3)$$

$$\dot{v} = \ddot{y} = -(y_0 \omega^2) \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$\beta = \beta_0 \cos(\omega t) \quad (5)$$

$$\beta_0 = \frac{y_0 \omega}{U_C} \quad (6)$$

در روابط ۳ و ۴ به ترتیب $v_{max} = (y_0 \omega)$ و $\dot{v}_{max} = (y_0 \omega^2)$ است. همچنین فرکانس زاویه‌ای برابر با $\omega = 2\pi f$ است. در حالت یاو خالص شناور به صورت سینوسی

اگر جریان حول یک شناور را در نظر بگیریم، زمانی که جریان از سینه تا پاشنه طی می‌شود، با توجه به فرم پیچیده سینه و پاشنه گردان معکوس جریان به وجود می‌آید که منجر به جدایش جریان و آشفتگی می‌گردد؛ بنابراین به منظور مدل‌سازی عددی جریان باید معادلات حاکم بر جریان سیال آشفته حل شوند که شامل معادله پیوستگی و معادلات میانگیری شده سه بعدی ناویراستوکس است. به طور کلی سه دسته روش برای شبیه‌سازی جریان آشفته وجود دارند که عبارتند از: $RANS^y$ ، LES^h و DNS^a . به جزء روش شبیه‌سازی مستقیم که دارای هزینه محاسباتی بسیاری است. دو روش مرسوم LES و $RANS$ برای شبیه‌سازی جریان آشفته وجود دارد که تفاوت آن‌ها در نوع میانگیری از معادله ناویراستوکس است. در روش های LES از میانگیری مکانی با استفاده از فیلتر و در روش های $RANS$ از میانگیری زمانی استفاده می‌شود. روش DES اولین بار توسط اسپالارت و همکاران [۳۰] در سال ۱۹۹۴ به عنوان یک مدل توربولانسی یک معادله‌ای ارائه شد و در سال ۱۹۹۷ توسط اسپالارت، جو و استریلت برای اولین بار برای شبیه‌سازی جریان بر روی بال هواپیما با موفقیت به کار گرفته شد [۳۱]. منتر و کونتز با استفاده از مدل انتقال برشی SST با تغییر در صورت‌بندی، مدلی با عنوان DES^1* حفاظت‌شده را ارائه نمودند که در آن به منظور تعیین مرز حل بین DES و $RANS$ علاوه بر شبکه‌بندی به حل نیز وابسته باشد [۳۲]. DES یک مدل توربولانسی از نوع LES با دو طول مقیاس اختلاطی است که در ناحیه نزدیک دیواره از روش $RANS$ و در ناحیه دور از دیواره از روش LES استفاده می‌کند. اسپالارت [۳۳] در سال ۲۰۰۶ برای رفع برخی ایرادات روش DES اصلاحاتی روی روش مذکور انجام داد و مدل جدید $DDES^1$ یا شبیه سازی گردابه‌های جدا شده تأخیری را ارائه نمود. در مطالعه حاضر بر مبنای فرمول‌بندی روش DES از مدل آشفتگی $DDES$ با پایه $SST-K-Omega$ استفاده شده است. معادلات بر اساس روش حجم محدود گسسته‌سازی شده و سپس حل می‌شوند. در فرمول‌بندی $DDES$ به منظور

استفاده از مزایای روش DES باید اصلاحاتی را بر روی مدل $k-\omega$ انجام داد. برای نرخ پراکندگی مخصوص ω مقدار $\tilde{\omega}$ در نظر گرفته می‌شود که:

$$\tilde{\omega} = \omega \phi \quad (12)$$

و ϕ برابر است با

$$\phi = \max\left(\frac{l_t}{C_{DES}\Delta}, F, 1\right) \quad (13)$$

که $l_t = \frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega}$ طول مقیاس آشفتگی، k ضریب ثابت و برابر با 0.41 است. Δ بزرگ‌ترین فاصله بین مرکز یک سلول با مراکز سلول همسایگی‌اش است. β^* ضریب مدل و برابر با:

$$\beta^* = F_1\beta_1^* + (1 - F_1)\beta_2^* \quad (14)$$

و β_1^* و β_2^* هر کدام برابر با 0.09 هستند. و F_1 تابع ترکیب اول برای تعیین ناحیه نزدیک دیواره است:

$$F_1 = \tanh\left(\left[\min\left(\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega d'}, \frac{500\nu}{d'^2 CD_{k\omega}}\right), 1\right)\right]^4\right) \quad (15)$$

d فاصله از دیواره و $CD_{k\omega}$ ضریب دیفیوژن است:

$$CD_{k\omega} = \max\left(\frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, 10^{-20}\right) \quad (16)$$

k و ω به ترتیب انرژی جنبشی و نرخ پراکندگی بوده و از معادلات انتقال به دست می‌آیند. مقدار $F_2 = 1 - F_2$ و F_2 تابع ترکیب دوم:

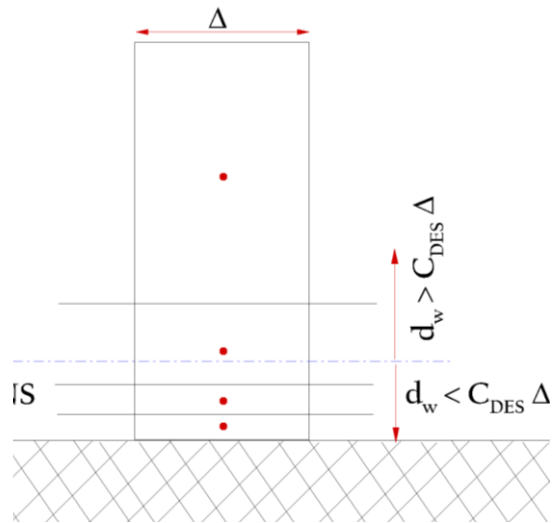
$$F_2 = \tanh\left(\left(\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^*\omega d'}, \frac{500\nu}{d'^2\omega}\right)\right)^2\right) \quad (17)$$

برای $\phi = 1$ مدل $RANS SST-K-Omega$ فعال و برای $\phi > 1$ مدل محاسباتی به سوی LES سوق می‌یابد. مقیاس طولی DES توسط رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود و در معادلات به جای d قرار داده می‌شود:

$$d_{DES} = \min(d_w, C_{DES}\Delta) \quad (18)$$

در رابطه فوق d_w فاصله از دیواره و C_{DES} برابر 0.165 و $\Delta = \max(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)$ است. مقیاس طولی به طور اتوماتیک مشخص می‌کند که در چه ناحیه‌ای باید $RANS$ و در کجا باید LES اجرا شود. در نواحی نزدیک دیواره که $d_w \leq C_{DES}$ حل $RANS$ و جایی که $d_w \geq C_{DES}$ باشد

حل LES را داریم. در شکل ۶ به صورت شماتیک این نواحی نشان داده شده است [۲۸].



شکل ۶- نواحی حل RANS و DES

ابعاد دامنه محاسباتی طبق منبع [۲۵] در نظر گرفته شده است. در شکل ۷ شرایط مرزی و شبکه بندی در سطح آزاد، پاشنه و قسمت دیسک پروانه ارائه شده است. در نواحی مورد نیاز ریزشدهی نسبت به نواحی دورتر اعمال گردید 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 شده است. شرایط مرزی برای مرزهای بالا و پایین و کنار به صورت سرعت اعمال گردید. برای صفحه پایین دامنه محاسباتی، شرط مرزی دیواره لغزشی (Slip wall) در نظر گرفته شد. استفاده از شرط مرزی سرعت ورودی در مرز بالا و کنار مانع از چسبیدن سیال به دیواره ها می شود، یعنی از ایجاد گرادیان سرعت بین سیال و دیواره جلوگیری و به ماندن شرط دیواره همراه با لغزش رفتار می نماید. در این حالت جریان در قسمت بالا و کنار به موازی با مرز خروجی هدایت شده و از انعکاس سیال به درون دامنه محاسباتی جلوگیری می کند. مرزهای کناری، پایین و بالایی را می توان به عنوان مرز دیواره همراه با لغزش نیز در نظر گرفت. به طور کلی تنظیم این شرایط مرزی باید به طوری باشد که فاصله

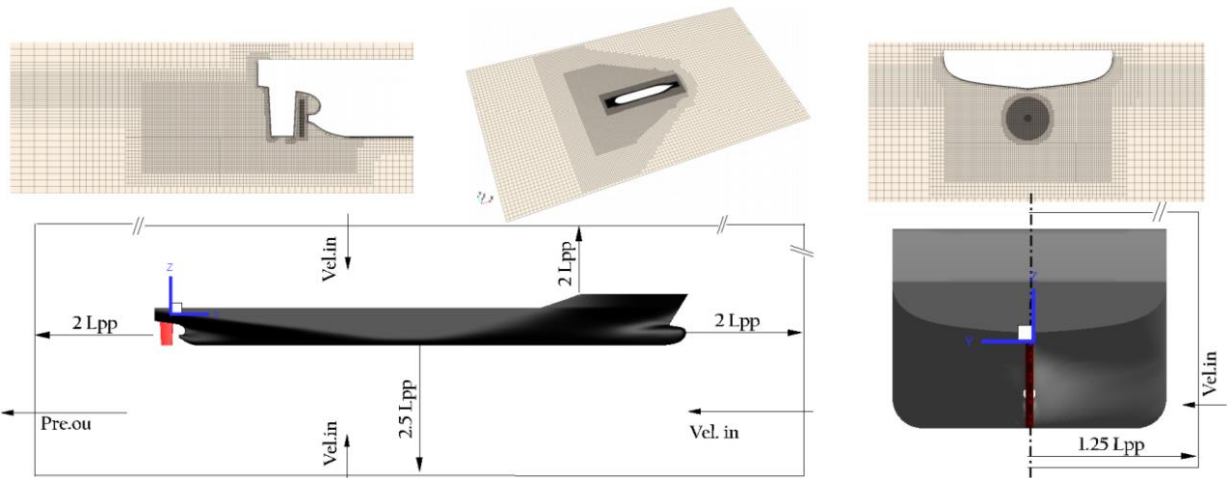
مناسب با بدنه را داشته تا کمترین اثر را روی بدنه بگذارد و شرط دوردست رعایت شود. شرط مرزی پشت شناور نیز فشار خروجی قرار داده تا از جریان بازگشتی^{۱۲} اجتناب شود [۳۴]. از آنجایی که تخمین مقدار کمیت ها در نزدیک دیواره هزینه زیادی دارد، در اینجا از توابع دیواره استاندارد برای محاسبه پارامترهای در نزدیک دیواره بهره گرفته شده است. در جریان حول بدنه وسایل متحرکه دریایی به دلیل وجود انحنا و فرم سه بعدی قسمت سینه و پاشنه معمولاً با توجه به رژیم جریان معکوس شدگی پروفیل جریان رخ می دهد که باید سعی شود پروفیل ها در این ناحیه صحیح پیش بینی تا جریان در بالادست و پایین دست نیز دقت مناسب داشت باشد. در این مطالعه از مدل رینولدز پایین استفاده و گره اول محاسباتی در محدوده $y^+ < 2$ قرار داده شده است (شکل ۸). یک پارامتر دیگر که در ارزیابی هیدروپنماتیکی مهم است عدد کورانت است. عدد کورانت به منظور ایجاد پایداری حل در زمان گسسته سازی معادلات دیفرانسیل پاره ای به کار می رود. این پارامتر برابر با $C = u \Delta t / \Delta x \leq C_{max}$ است. این 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 سیال از یک سلول به سلول مجاور در یک گام زمانی است. در شکل ۸ کانتور عدد کورانت ارائه شده است. به منظور انجام محاسبات مربوط به سطح آزاد از روش حجم سیال^{۱۳} استفاده شده است که معادله آن به صورت رابطه ۱۹ 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.

$$VOF + U \cdot \nabla VOF = 0 \quad (19)$$

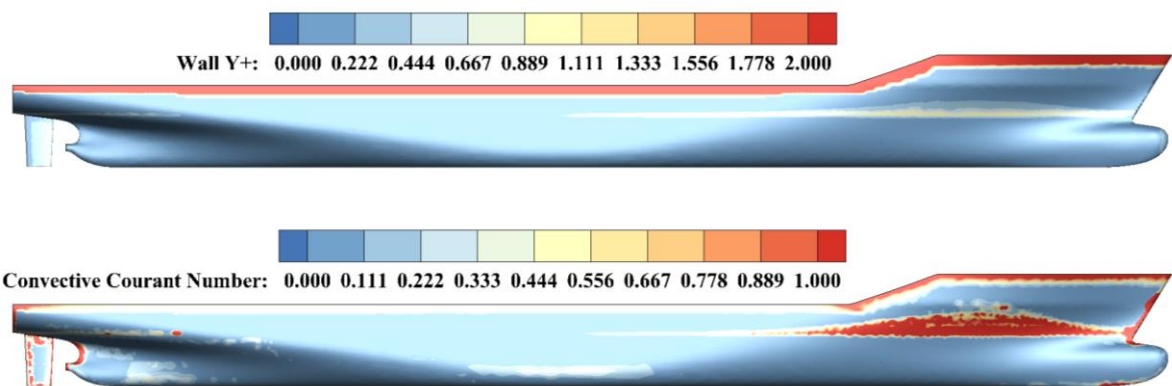
برای اطلاعات بیشتر در مورد مدل توربولانسی استفاده شده می توان به مراجع [۲۸، ۳۵، ۳۶] رجوع نمود. معادلات بالا براساس روش حجم محدود و به وسیله نرم افزار Star-CCM+® version 14.04.011 به صورت عددی حل شده اند.

¹² Back Flow

¹³ Volume of Fluid (VOF)



شکل ۷- ابعاد دامنه محاسباتی طبق منبع [۲۵] و اصلاحات شبکه‌بندی برای یک دنباله جسم و پروانه



شکل ۸- کانتور فاصله بی‌بعد از دیواره و عدد کورانت

۳-۱-۲- عدم قطعیت و تأیید نتایج

در دهه‌های اخیر، استفاده از روش‌های عددی بیش از پیش افزایش یافته است. در این راستا سخت‌گیری استانداردها به‌منظور تأیید نتایج دینامیک سیالات محاسباتی افزایش یافته و ارزیابی عدم قطعیت از قبیل اعتبارسنجی و تأیید^{۱۴} موردنیاز است. در سال ۱۹۹۸ انستیتوی هوانوردی و فضانوردی آمریکا^{۱۵} برای اولین بار روند بررسی عدم قطعیت دینامیک سیالات محاسباتی را ارائه نمود که شامل دو مرحله اعتبارسنجی و تأیید بود [۳۷]. شن و همکاران [۳۸] توزیع احتمال نتایج دینامیک سیالات محاسباتی و منابع عدم قطعیت عددی را موردبررسی قرار دادند. سایمون و همکاران [۳۹] آنالیز عدم قطعیت را برای شبیه‌سازی‌های حالت دائم معادلات ناویراستوکس بررسی نمودند. کرمی و همکاران [۴۰] پارامترهای عدم قطعیت را در شبیه‌سازی تست مقاومت مدل KCS محاسبه کردند. در این مطالعه پارامترهای عدم قطعیت مطالعه شده است. برای اطلاعات

بیشتر می‌توان به مراجع [۴۱-۴۵] رجوع نمود. تأیید نتایج بر مبنای سه سطح شبکه‌بندی با کد G1-3 ایجاد شده است. در جدول ۴ مقادیر تعداد هر المان هر شبکه ارائه شده است. خطا به‌وسیله معادله ۲۰ محاسبه شده است که D مقدار تست مدل و S مقدار شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. به‌منظور ایجاد شبکه‌های مختلف فاکتور رشد $\sqrt{2}$ در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج شاخص همگرایی در بازه $0 < R < 1$ قرار گرفت که همگرایی یکنواخت^{۱۶} و به معنای بهبود نتایج انتگرالی با افزایش تعداد سلول است. با بررسی نتایج، برای شبکه‌بندی با مقدار $3/36$ میلیون سلول میزان خطا مناسب و مقدار C کوچک‌تر از یک و طبق ITTC می‌توان تنها از U_{GT} را برای ارزیابی خطا استفاده نمود. U_{GT} مقدار عدم قطعیت تغییر گام زمانی و رشد شبکه است.

$$E\%D = (D - S)/D \times 100 \quad (20)$$

و عدم قطعیت تخمین زده شود؛ بنابراین برای حرکت اسوی:

$$Y = Y_{C1} \cos(\omega t) + Y_{S1} \sin(\omega t) + Y_{C3} \cos(3\omega t) \quad (22)$$

$$N = N_{C1} \cos(\omega t) + N_{S1} \sin(\omega t) + N_{C3} \cos(3\omega t)$$

برای ضرایب $Y_{\dot{v}}$ و $N_{\dot{v}}$ روابط زیر را داریم. برای سایر ضرایب می‌توان به مرجع [۲۹] رجوع نمود.

$$Y_{S1} = Y_{\dot{v}} \dot{v}_{max} \quad (23)$$

$$N_{S1} = N_{\dot{v}} \dot{v}_{max}$$

برای حرکت یاو خالص:

$$Y = Y_{S1} \sin(\omega t) + Y_{C1} \cos(\omega t) + Y_{S3} \sin(3\omega t) \quad (24)$$

$$N = N_{S1} \sin(\omega t) + N_{C1} \cos(\omega t) + N_{S3} \sin(3\omega t)$$

برای ضرایب $Y_{\dot{r}}$ و $N_{\dot{r}}$ روابط زیر را داریم.

$$Y_{C1} = Y_{\dot{r}} \dot{r}_{max} \quad (25)$$

$$N_{C1} = N_{\dot{r}} \dot{r}_{max}$$

به‌منظور برازش منحنی‌ها از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. به‌منظور استخراج نتایج آزمایش استاتیکی از شبکه G1 استفاده شد. در شکل ۱۵ نتایج دریافت استاتیکی ارائه که تطابق مناسبی با نتایج تجربی به‌دست آمد.

مقدار خطای تکرار U_I ناچیز بوده و $U_{SN} \approx U_{GT}$ است (جدول ۶). مقدار مطلق خطای مقایسه $|E|$ بر طبق داده‌های تست D و نتایج S بر اساس شبکه G_1 ارزیابی شده‌است. برای عدم قطعیت تست مدل U_D طبق گزارش مقدار $1\%D$ در نظر گرفته شده است. عدم قطعیت تست مدل دربرگیرنده خطای تجهیزات داده‌برداری 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 قابل‌اعتماد است. در شکل ۹ و ۱۲ مقادیر ورودی حرکت برای آزمایش اسوی و یاو خالص ارائه شده است. روابط بی‌بعدسازی:

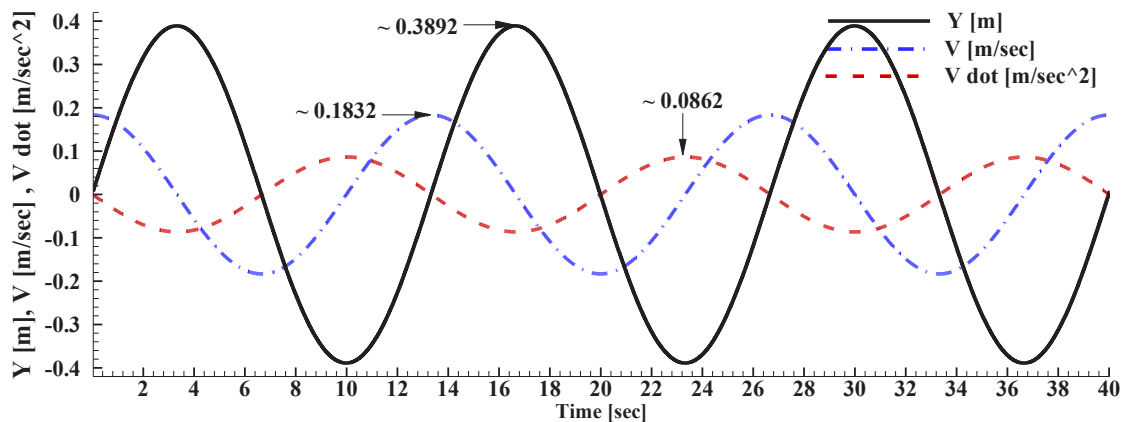
$$y'_0 = y_0/L_{pp}, \omega' = \omega L_{pp}/U_C$$

$$v'_{max} = v_{max}/U_C, r'_{max} = r_{max}L_{pp}/U_C \quad (21)$$

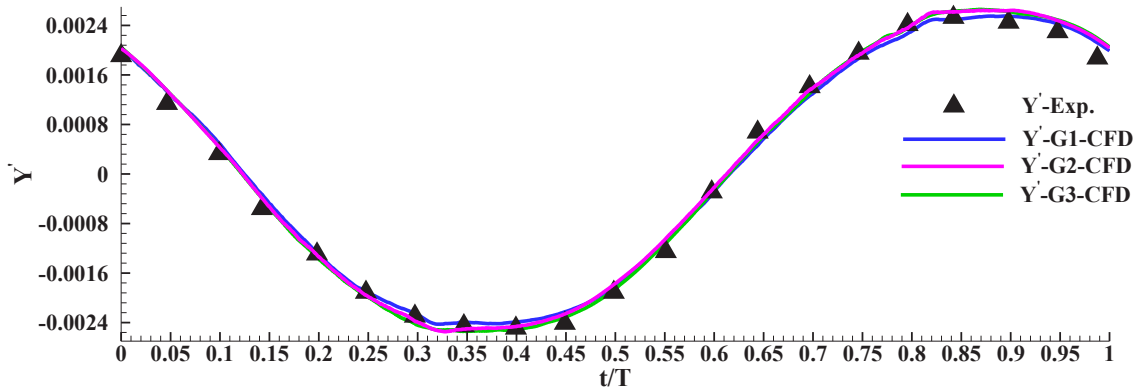
$$Y' = Y/0.5\rho U_C^2 L_{pp}^2$$

$$N' = N/0.5\rho U_C^2 L_{pp}^3$$

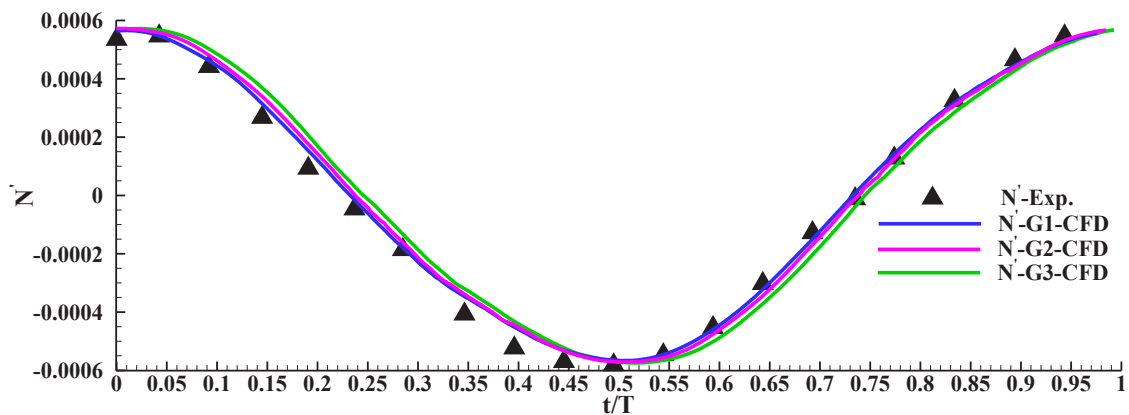
در شکل ۱۰، ۱۱، ۱۳ و ۱۴ تغییرات نیروها و گشتاور برای هر شبکه در کنار نتایج تجربی ارائه شده است. با توجه به اینکه حرکات از نوعی سینوسی است، ضرایب به دو دسته شتابدار و غیر شتابدار تقسیم می‌شوند. می‌توان با تجزیه به جملات سینوسی و کسینوسی مقادیر هر ضریب را محاسبه



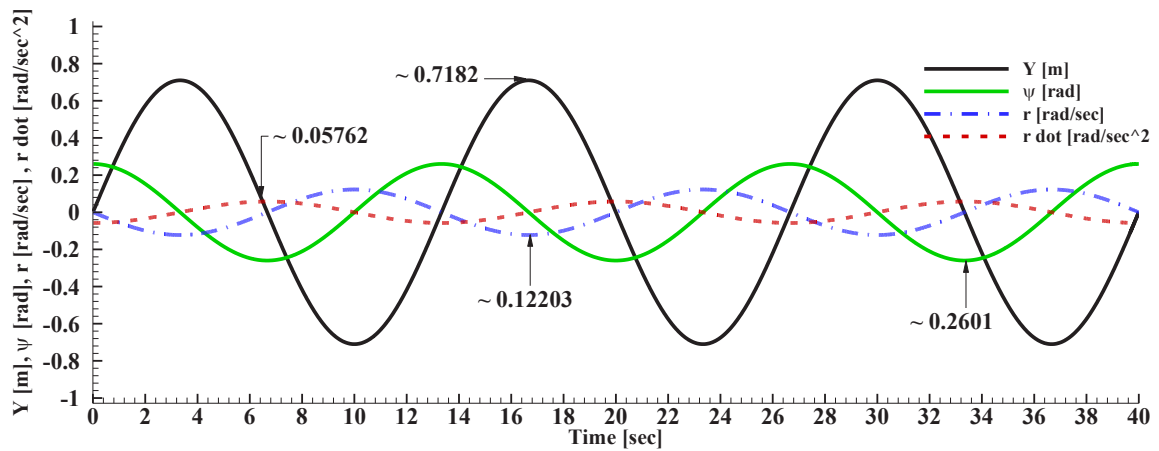
شکل ۹- ورودی جابجایی، سرعت و شتاب برای آزمایش اسوی خالص



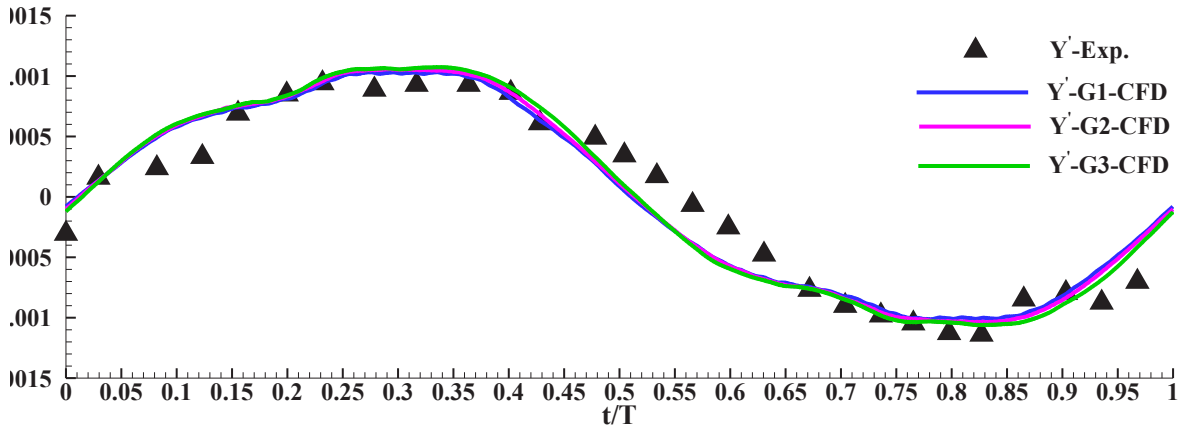
شکل ۱۰- تاریخچه نیروی عرضی Y برای شبکه G1 الی G3 در آزمایش اسوی خالص



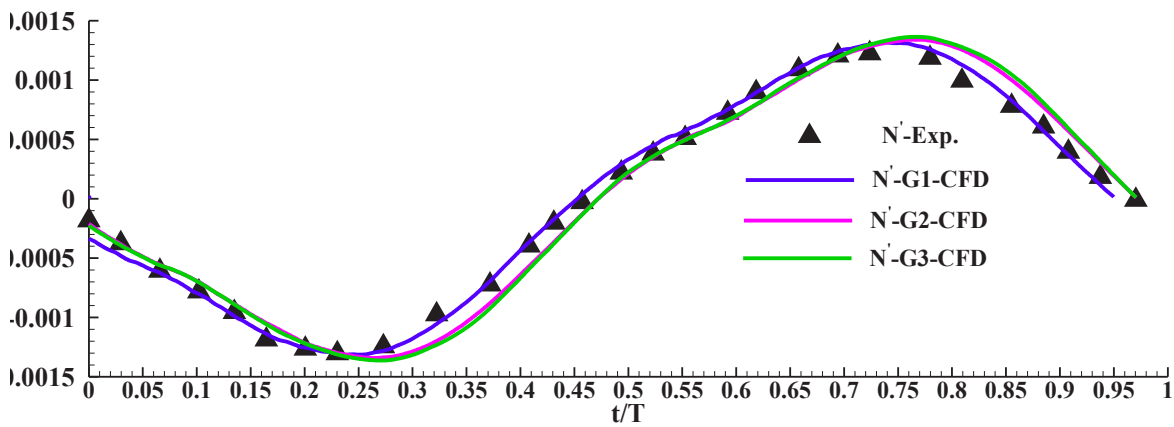
شکل ۱۱- تاریخچه گشتاور N برای شبکه G1 الی G3 در آزمایش اسوی خالص



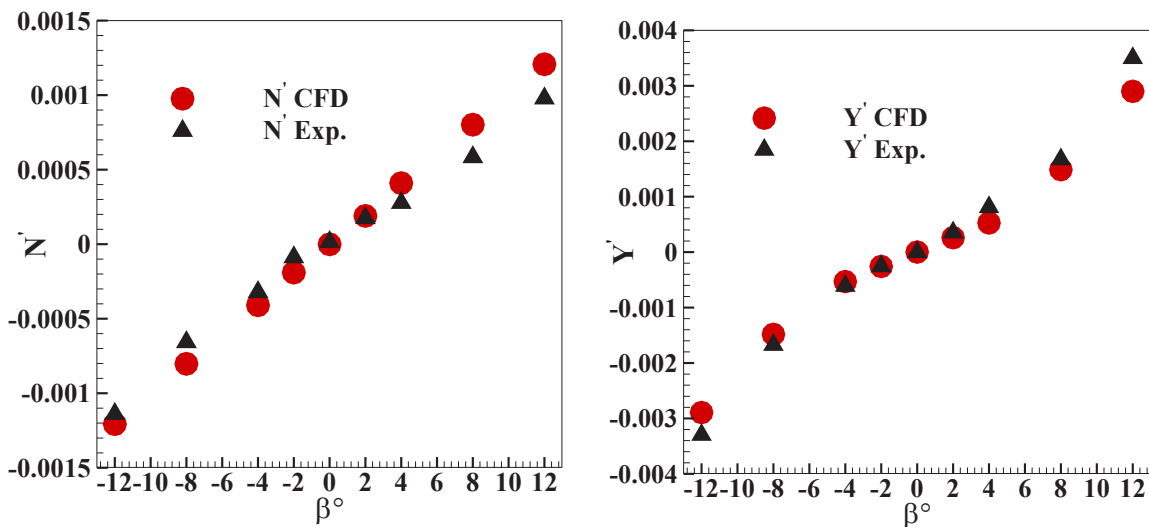
شکل ۱۲- ورودی جابجایی، یاء، سرعت و شتاب زاویه‌ای برای آزمایش یاء خالص



شکل ۱۳- تاریخچه نیروی عرضی Y برای شبکه G1 الی G3 در آزمایش یایو خالص



شکل ۱۴- تاریخچه گشتاور N برای شبکه G1 الی G3 در آزمایش یایو خالص



شکل ۱۵- مقادیر N و Y در آزمایش دریافت استاتیکی

جدول ۴- 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
$G_3, \Delta t_3$	1.68 M	T/400			

0.201	1.318 m/s	40 sec	T/600	2.38 M	$G_2, \Delta t_2$
			T/800	3.36 M	$G_1, \Delta t_1$

جدول ۵- مقایسه نتایج عددی و تجربی [۴۶] برای حرکت اسوی و یاو خالص

Pure Sway						
	$Y_{S1}(CFD)$	$N_{S1}(CFD)$	$Y_{S1}(EFD)$	$N_{S1}(EFD)$	$E[Y_{S1}]\%D$	$E[N_{S1}]\%D$
G_1	-31.57	7.973			0.441	4.617
G_2	-31.01	7.773			2.207	7.012
G_3	-30.24	7.556			4.635	9.606

Pure Yaw						
	$Y_{C1}(CFD)$	$N_{C1}(CFD)$	$Y_{C1}(EFD)$	$N_{C1}(EFD)$	$E[Y_{C1}]\%D$	$E[N_{C1}]\%D$
G_1	-6.144	-14.03			1.538	5.13
G_2	-5.832	-13.76			6.538	6.964
G_3	-5.3	-13.355			15.02	9.702

جدول ۶- نتایج تأیید برای حرکت اسوی و یاو خالص

Pure Sway										
	ε_{21}	ε_{32}	R	p	$GCI_{fine}^{21}(\%)$	δ_{RE}^*	C	U_{GT}	U_{SN}	$U_{SN}(\%S)$
Y_{S1}	-0.56	-0.77	0.727	0.918	5.91	-	0.375	3.359	3.359	10.642
N_{S1}	-0.2	-	0.921	0.235	36.8	-	0.585	0.625	0.625	7.846
		0.217				1.493				
						0.341				
Pure Yaw										
Y_{C1}	-	-	0.586	1.539	9.002	-	0.705	0.703	0.703	11.448
N_{C1}	-0.27	-	0.666	1.169	4.81	-0.54	0.5	1.079	1.079	7.697
		0.405				0.442				

جدول ۷- نتایج اعتبارسنجی برای حرکت اسوی و یاو خالص

Pure Sway				
	$ E (\%D)$	$U_D(\%D)$	$U_{SN}(\%S)$	$U_V(\%D)$
Y_{S1}	0.441	1	10.642	10.688
N_{S1}	4.617	1	7.846	7.909
Pure Yaw				
Y_{C1}	1.538	1	11.448	11.491
N_{C1}	5.13	1	7.697	7.761

و مورد تأیید قرار گرفت. عدم قطعیت طبق روند محاسبات توصیه‌نامه ITTC انجام شد. نتایج عددی تطابق مناسبی را با نتایج تجربی ارائه نمود. مقدار عدم قطعیت کمتر از ۱۲ درصد و خطای عددی نسبت به تجربی نیز کمتر از ۶ درصد استخراج گردید.

مراجع

- [۱] A. B. o. Shipping, "Guide for Vessle Maneuverability," ed. Houston, 2017, p. 111.
- [۲] M. A. Abkowitz, "Lectures on ship hydrodynamics--Steering and manoeuvrability," 1964.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

معتبرسازی عددی برای شناور کانتینربر کی‌سی‌اس انجام شده است. مشخصات آزمون استاتیکی و دینامیکی معرفی گردید. سپس پارامترهای عددی از قبیل نحوه مدل‌سازی ارائه شد. برای شبیه‌سازی اثر پروانه از روش دیسک محرک استفاده و روندنمای آن ارائه گردید. این روش نسبت به مدل‌سازی واقعی پروانه از لحاظ هزینه و دقت به‌صرفه‌تر است. از مدل آشفتگی DES استفاده و در شبیه‌سازی مقادیر فاصله بی‌بعد از دیواره و عدد کورانت کوچک‌تر از یک در نظر گرفته شد. در بخش بعد پارامترهای عدم قطعیت و تأیید نتایج برای آزمون دینامیکی استخراج

simulations using RANSE-based solver," *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 138, 2016.

[۱۷] G. Taimuri, J. Matusiak, T. Mikkola, P. Kujala, and S. Hirdaris, "A 6-DoF maneuvering model for the rapid estimation of hydrodynamic actions in deep and shallow waters," *Ocean Engineering*, vol. 218, p. 108103, 2020.

[۱۸] O. F. Sukas, O. K. Kinaci, and S. Bal, "Theoretical background and application of MANSIM for ship maneuvering simulations," *Ocean engineering*, vol. 192, 2019.

[۱۹] H. Kim, H. Akimoto, and H. Islam, "Estimation of the hydrodynamic derivatives by RaNS simulation of planar motion mechanism test," *Ocean engineering*, vol. 108, pp. 129-139, 2015.

[۲۰] O. F. Sukas, O. K. Kinaci, and S. Bal, "System-based prediction of maneuvering performance of twin-propeller and twin-rudder ship using a modular mathematical model," *Applied Ocean Research*, vol. 84, pp. 145-162, 2019.

[۲۱] ع. آرانی و میراعلم، "بررسی عددی تأثیر دامنه و بسامد نوسان یک AUV روی مشتقات هیدرودینامیکی در حرکت خالص هیو،" نشریه علمی-پژوهشی هیدروفیزیک، vol. 5.

[۲۲] عباسی، ثاراله، زینعلی، مرحمت، ولدی، "آنالیز حساسیت مانور پذیری یک وسیله زیرسطحی خودکنترل نسبت به تغییرات ضرایب جرم مجازی،" مکانیک سازه ها و شاره ها، vol. 9, pp. 1-13, 2019.

[۲۳] ح. فرد، مسعود، ر. ورنوسفادرانی، محمود، "محاسبه عددی و تحلیلی گشتاور مانک در جریان لزج برای یک زیردریایی هوشمند در وضعیت سووی خالص در آزمایش PMM،" مکانیک سازه ها و شاره ها، vol. 9, pp. 205-216, 2019.

[۲۴] ۱. فروشانی، گ. کار، and محمد، "استخراج ضرایب هیدرودینامیک با استفاده از مانور مکانیزم حرکت صفحه ای به کمک دینامیک سیالات محاسباتی،" مکانیک سازه ها و شاره ها، vol. 8, pp. 215-228, 2018.

[۲۵] Y. Liu, L. Zou, Z. Zou, and H. Guo, "Predictions of ship maneuverability based on virtual captive model tests," *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 12, pp. 334-353, 2018 2014.

[۲۶] A. C. Hochbaum, "Manoeuvring Committee Report & Recommendations," in *25th International Towing Tank Conference. Fukuoka, Japan*, ed, 2008, pp. 14-20.

[۲۷] ITTC, "Recommended Procedures and Guidelines Practical guidelines for ship CFD applications," in *26th International Towing Tank Conference*, ed, 2014 pp. 14-20.

[۲۸] I. STAR-CCM+, *STAR-CCM+ Documentation*, 2017.

[۲۹] S. Cook, "Effects of headwinds on towing tank resistance and PMM tests for ONR Tumblehome," 2011.

[۳۰] P. Spalart and S. Allmaras, "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows," in *30th aerospace sciences meeting and exhibit*, 1992, p. 439.

[۳۱] M. Shur, P. Spalart, M. Strelets, and A. Travin, "Detached-eddy simulation of an airfoil at high angle

[۳] M. Gertler and G. R. Hagen, "Standard equations of motion for submarine simulation," David w Taylor Naval Ship Research and Development Center Bethesda MD1967.

[۴] J. Feldman, "DTNSRDC revised standard submarine equations of motion," DAVID W TAYLOR NAVAL SHIP RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER BETHESDA MD SHIP ...1979.

[۵] T. I. Fossen, *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*: John Wiley & Sons, 2011.

[۶] A. Ogawa and H. Kasai, "On the mathematical model of maneuvering motion of ship," *International Shipbuilding Progress*, vol. 25, pp. 306-3019, 1978 1980.

[۷] H. Yasukawa and Y. Yoshimura, "Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 20, pp. 37-52, 2015.

[۸] S. Abdel-Latif, M. Abdel-Geliel, and E. E. Zakzouk, "Simulation of ship maneuvering behavior based on the modular mathematical model," in *International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology*, 2013, pp. 1-14.

[۹] M. Araki, H. Sadat-Hosseini, Y. Sanada, N. Umeda, and F. Stern, "Improved Maneuvering-Based Mathematical Model for Free-Running Ship Motions in Following Waves Using High-Fidelity CFD Results and System-Identification Technique," in *Contemporary Ideas on Ship Stability*, ed: Springer, 2019, pp. 91-115.

[۱۰] A. Balagopalan, K. Tiwari, T. Rameesha, and P. Krishnankutty, "Manoeuvring prediction of a container ship using the numerical PMM test and experimental validation using the free running model test," *Ships and Offshore Structures*, vol. 15, pp. 852-865, 2020.

[۱۱] A. Hajivand and S. H. Mousavizadegan, "Virtual simulation of maneuvering captive tests for a surface vessel," *International journal of naval architecture and ocean engineering*, vol. 7, pp. 848-872, 2015.

[۱۲] Y. Jin, A. R. Magee, L. J. Yiew, and Y. Zheng, "Dynamic manoeuvres of KCS in waves using URANS computations with overset grids," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, p. 012015.

[۱۳] J. Li, J. E. Martin, and P. M. Carrica, "Large-scale simulation of ship bubbly wake during a maneuver in stratified flow," *Ocean Engineering*, vol. 173, pp. 643.۲۰۱۹.۶۵۸-

[۱۴] A. H. Muhammad, M. A. Djabbar, and N. Yuniarsih, "Maneuvering performance of a ferry affected by rudder area and speed," *The Indonesian Journal of Naval Architecture*, vol. 1, 2013.

[۱۵] C. M. NOOR, K. SAMO, and W. W. NIK, "Ship manoeuvring assessment by using numerical simulation approach," 2012.

[۱۶] R. Rajita Sheno, P. Krishnankutty, and R. Panneer Selvam, "Study of maneuverability of container ship with nonlinear and roll-coupled effects by numerical

ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-03-01-01," in *In Proceedings of the International Towing Tank Conference, Wuxi, China, 18 September 2017*, 2017, pp. 7.5-02.

[۴۶] Yi. Liu, Lu. Zou, Zaojian. Zou, Haipeng. Guo, "Predictions of ship maneuverability based on virtual captive model tests" in *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, Taylor & Francis 2018*, pp. 334-353.

of attack," in *Engineering turbulence modelling and experiments 4*, ed: Elsevier, 1999, pp. 669-678.

[۳۲] F. Menter and M. Kuntz, "Adaptation of eddy-viscosity turbulence models to unsteady separated flow behind vehicles," in *The aerodynamics of heavy vehicles :trucks, buses, and trains*, ed: Springer, 2004, pp. 339-352.

[۳۳] P. R. Spalart, S. Deck, M. L. Shur, K. D. Squires, M. K. Strelets, and A. Travin, "A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities," *Theoretical and computational fluid dynamics*, vol. 20, p. 181, 2006.

[۳۴] T. Tezdogan, Y. K. Demirel, P. Kellett, M. Khorasanchi, and O. Turan, "Full-Scale unsteady RANS CFD Simulations of ship behaviour and Performance in head sea due to Slow Steaming," *Ocean Engineering*, vol. ۹۷, pp. 186-206, 2015.

[۳۵] V. Bertram, *Practical Ship Hydrodynamics*: Elsevier, 2012.

[۳۶] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*: Pearson Education, 2007.

[۳۷] A. I. o. Aeronautics and Astronautics, *AIAA guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations*: American Institute of aeronautics and astronautics, 1998.

[۳۸] H.-c. SHEN, Z.-q. YAO, B.-s. WU, N. ZHANG, and R.-y. J. J. o. S. M. YANG, "A new method on uncertainty analysis and assessment in ship CFD [J]," vol. 14, pp. 1071-1083, 2010.

[۳۹] C. D. Simonsen, F. J. C. Stern, and fluids, "Verification and validation of RANS maneuvering simulation of Esso Osaka: effects of drift and rudder angle on forces and moments," vol. 32, pp. 1325-1356, 2003.

[۴۰] S. Karami and R. H Goudarzi, "Verification and Validation Study of Computational Fluid Dynamics for KCS Container Ship Resistance Result Using Shear Stress Transport Turbulence Model," 2020.

[۴۱] R. P. ITTC and R. J. I. R. Procedures, "Guidelines: Practical Guidelines for Ship CFD Applications," vol. 7, pp. 02-03, 2011.

[۴۲] I. Q. Manual, "Uncertainty analysis in CFD uncertainty assessment methodology. The 22nd ITTC, Seoul and Shanghai," Report 1999.

[۴۳] I. R. Procedures, "ITTC-Recommended Procedures-Performance, Propulsion 1978 ITTC Performance Prediction Method," in *International Towing Tank Conference*, 1999, pp. 7.5-02.

[۴۴] I. R. Procedures, "Uncertainty analysis in CFD, uncertainty assessment methodology and Procedures. ITTC-Quality Manual," in *In Proceedings of the International Towing Tank Conference, Venice, Italy, 8-14 September 2002.*, 2002, pp. 7.5-02.

[۴۵] I. R. Procedures, "Uncertainty Analysis in CFD, Verification and Validation Methodology and Procedures.