



Effect of Motion Domain and Velocity on Calculation of Underwater Vehicle Coefficients

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ardeshiri S.¹ MSc,
Mousavizadegan S.H.² PhD,
Kheradmand S.^{*3} PhD

How to cite this article

Ardeshiri S, Mousavizadegan S.H, Kheradmand S. Effect of Motion Domain and Velocity on Calculation of Underwater Vehicle Coefficients. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(1):117-128.

ABSTRACT

Hydrodynamic coefficients have primary importance in determining the maneuvering characteristic of a marine vehicle. The use of computational fluid dynamics (CFD) methods due to the lower cost of these methods compared to laboratory methods in determination of hydrodynamic coefficients have always been considered. Validation of the CFD methods and enhancing their accuracy are the major topics in the application of CFD for the underwater vehicle. The hydrodynamic coefficients of an elliptical-shape underwater vehicle and the effect of motion amplitude and velocity parameters have been investigated by the STAR-CCM+ software and through dynamic overset meshing. The results of the simulations have been compared and analyzed and the error reduction criteria have been presented considering the amplitude dimensions and velocity values in the simulation. In addition, an innovative method for simultaneous calculation of hydrodynamic coefficients of surge motion has been presented which shows good accuracy by comparing the results with theoretical and laboratory data.

Keywords Hydrodynamic Coefficient; Surge Coefficients; Velocity; Amplitude; Underwater; Overset Mesh

¹Marine Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Malek-Ashtar University of Technology, Shahinshahr, Iran

²Maritime Department, Maritime Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

³Aerodynamic, Propulsion & Energy Conversion Department, Mechanical Engineering Faculty, Malek-Ashtar University of Technology, Shahinshahr, Iran

*Correspondence

Address: Aerodynamic, Propulsion & Energy Conversion Department, Mechanical Engineering Faculty, Malek-Ashtar University of Technology, Shahinshahr, Iran
Phone: +98 (31) 45914485
Fax: +98 (31) 45227136
kheradmand@mut-es.ac.ir

Article History

Received: September 30, 2018

Accepted: May 4, 2019

ePublished: January 01, 2020

CITATION LINKS

[1] Stability and motion control of ocean vessels [2] Using CFD software to calculate hydrodynamic coefficients [3] A CFD based investigation of the unsteady hydrodynamic coefficients of 3-D fins in viscous flow [4] Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation [5] Parametric identification and sensitivity analysis for autonomous underwater vehicles in diving plane [6] Numerical investigation of dynamic stability of an AUV [7] Numerical simulation of rotating arm test for prediction of submarine rotary derivatives [8] A numerical and experimental investigation of effect of control surface angle on an autonomous underwater vehicle drag [9] Investigation of hydrodynamic derivatives of an AUV based on the water tunnel testing maneuvers [10] Calculation of AUV hydrodynamic coefficients using computational fluid dynamic [11] Numerical investigation of oscillation frequency and amplitude effects on the hydrodynamic coefficients of a body with NACA0012 hydrofoil section [12] Numerical investigation of flow past a prolate spheroid [13] Adaptive control of nonlinear systems: A case study of underwater robotic systems [14] Nonlinear modelling of marine vehicles in 6 degrees of freedom [15] Experimental techniques and methods of analysis used in submerged body research [16] The DTMB planar- motion-mechanism system (PMM) [17] Determination of added mass and inertia moment of marine ships moving in 6 degrees of freedom [18] Hydrodynamics [19] A new k-epsilon eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows: Model development and validation [20] The numerical computation of turbulent flows [21] Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies [22] Verification of codes and calculations [23] Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics [24] Forces and torques on a prolate spheroid: Low-Reynolds-number and attack angle effects

بررسی تأثیر سرعت و دامنه حرکت در محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی شناور زیرسطحی

سجاد اردشیری MSc

گروه دریا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، ایران

سیدحسین موسوی زادگان PhD

گروه دریا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

سعید خردمند* PhD

گروه آیرودینامیک، پیشرانس و تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، ایران

چکیده

ضرایب هیدرودینامیکی در تعیین مانور متحرک‌های دریایی از اهمیت اولیه برخوردار است. استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی با توجه به هزینه کمتر این روش‌ها در مقایسه با روش‌های آزمایشگاهی در تعیین ضرایب هیدرودینامیکی، همواره مورد توجه بوده است. اعتبارسنجی این روش‌ها و افزایش دقت در کاربرد آن امروزه از مباحث اصلی در روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای شناورهای زیرسطحی است. با استفاده از نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام و بهره‌گیری از مش دینامیک اورست، ضرایب هیدرودینامیکی یک زیرسطحی متقارن بیضیگون، محاسبه و اثر پارامترهای سرعت و دامنه حرکت جسم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته و معیارهای کاهش خطا در خصوص ابعاد دامنه و مقدار سرعت در شبیه‌سازی ارائه شده است. همچنین یک روش ابداعی برای محاسبه همزمان ضرایب هیدرودینامیکی حرکت سرج ارائه شده است که با مقایسه نتایج با داده‌های تئوری و آزمایشگاهی دقت مناسبی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: ضرایب هیدرودینامیکی، حرکت سرج، سرعت، دامنه، زیرسطحی، مش اورست

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۱۴

*نویسنده مسئول: kheradmand@mut-es.ac.ir

۱- مقدمه

مانور شناورها معمولاً با توانایی‌های حفظ مسیر، تغییر مسیر و تغییر سرعت مشخص می‌شود. مدل‌های ریاضی متفاوتی برای تعیین و تخمین مانورپذیری یک شناور سطحی یا زیرسطحی در مراحل مختلف طراحی، توسعه داده شده که از جمله آنها، مدل‌های مبتنی بر مشتق‌ها یا ضرایب هیدرودینامیکی است. این مدل‌ها بر مبنای مدل اولیه ابکویتز (Abkowitz) [1] و استفاده از بسط سری تیلور توسعه داده شده‌اند که تعیین ضرایب یا مشتق‌های هیدرودینامیکی یک نیاز اولیه برای تخمین و پیش‌بینی مانور یک متحرک دریایی در این گونه مدل‌ها است. ضرایب هیدرودینامیکی در این مدل‌ها به سه دسته: ضرایب بازگرداننده (Restoring Coefficients)، ضرایب بازدارنده (Damping Coefficients) و ضرایب جرم‌افزوده (Added Mass Coefficients) تقسیم‌بندی می‌شوند. ضرایب بازگرداننده وابسته به موقعیت جسم است و معمولاً در اثر تقابل نیروهای وزن و بویانسی حاصل می‌شود. این

ضرایب تابع موقعیت و معمولاً به‌صورت تحلیلی و دقیق قابل محاسبه هستند. ضرایب بازدارنده تابع سرعت جسم است و در اثر ویسکوزیته سیال و موج حاصل روی سطح آزاد آب در اثر حرکت جسم ایجاد می‌شود. ضرایب جرم‌افزوده تابع شتاب حرکتی جسم حاصل می‌شود. شتاب جسم باعث شتاب‌دارشدن حرکت ذرات سیال شده و این باعث اتلاف انرژی جسم می‌شود.

روش‌های متفاوت تجربی و تحلیلی برای تعیین ضرایب بازدارنده و جرم‌افزوده، توسعه داده شده است. روش‌های تجربی شامل انجام آزمایش روی مدل مقیاس‌بندی‌شده جسم در حوضچه کشش (Towing Tank) و حوض مانور (Maneuvering Basin) است. آزمایش‌های مرسوم، تحت عنوان آزمایشات مدل مقید (Captive Model) موسوم هستند که شامل آزمایش‌های کشش مورب (Oblique Towing)، آزمایش‌های مکانیزم حرکت صفحه‌ای (Planar Motion Mechanism; PMM) و آزمایش‌های بازوی چرخان (Rotating Arm) می‌شوند. آزمایش‌های کشش مورب و مکانیزم حرکت صفحه‌ای در حوضچه کشش و آزمایش‌های بازوی چرخان در حوض مانور انجام می‌شود. آزمایش‌های کشش مورب و بازوی چرخان جهت تعیین ضرایب بازدارنده و آزمایش‌های مکانیزم حرکت صفحه‌ای برای تعیین کلیه ضرایب بازدارنده و جرم‌افزوده هستند. برای انجام این آزمایشات نیاز به امکانات آزمایشگاهی بزرگ دریایی برای تعیین ضرایب با دقت بالا و با اثرات مقیاس حداقلی است.

محاسبه ضرایب بازدارنده و جرم‌افزوده با مشابه‌سازی جریان سیال اطراف جسم با روش‌های تحلیلی یا عددی امکان‌پذیر است. روش‌های تحلیلی معمولاً بر مبنای تئوری پتانسیل توسعه‌یافته و ضرایب جرم‌افزوده و بخشی از ضرایب بازدارنده مربوط به موج حاصل در اثر حرکت جسم روی سطح آزاد آب را تعیین می‌کند. ضرایب بازدارنده و جرم‌افزوده را می‌توان با شبیه‌سازی مجازی آزمایشات مدل مقید با کمک دینامیک سیالات محاسباتی (Computational Fluid Dynamics; CFD)، محاسبه نمود. ژانگ و همکاران [2] با به‌کارگیری نرم‌افزار فلوئنت ضرایب هیدرودینامیکی یک شناور زیرسطحی را از طریق شبیه‌سازی آزمایش پی‌ام‌ام به‌دست آوردند. نذیر و همکاران [3] از نرم‌افزار فلوئنت برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی یک ربات زیردریایی و یک فین سه‌بعدی، استفاده کردند. پن و همکاران [4] با استفاده از کد تجاری فلوئنت ضرایب هیدرودینامیکی مدل زیردریایی سابوف را استخراج نمودند که نتایج تطابق مناسبی را با مقادیر آزمایشگاهی نشان می‌دهد. زو و همکاران [5] شناسایی پارامتری و آنالیز حساسیت شناور زیرسطحی هوشمند نسبت به ضرایب هیدرودینامیکی آن را با استفاده از روش عددی مورد بررسی قرار دادند. منصورزاده و همکاران [6]، ضرایب هیدرودینامیکی یک ای‌یووی (Autonomous Underwater Vehicle; AUV) را از طریق شبیه‌سازی عددی کشش مدل شناور با زاویه انحراف و نیز بازوی چرخان به روش محاسباتی، استخراج نمودند و از آن برای تعیین پایداری استفاده کردند. پن و

معادلات دینامیکی یک متحرک دریایی با شش درجه آزادی را می‌توان به صورت رابطه زیر نوشت [13, 14].

$$(M_{RB} + M_A) \ddot{v} + [C_{RB}(v) + C_A(v)] \dot{v} + D(v) v + G(\eta) = \tau_E + \tau \quad (1)$$

که در آن M_{RB} ، M_A به ترتیب ماتریس اینرسی جسم صلب و جرم افزوده، $C_{RB}(v)$ و $C_A(v)$ به ترتیب ماتریس کوریولیس و گریز از مرکز جسم صلب و جرم افزوده، $D(v)$ ماتریس دمپینگ (که حاوی ضرایب نیرو و ممان‌های درگ و لیفت است)، $G(\eta)$ بردار نیروها و ممان‌های بازگرداننده، τ_E و τ به ترتیب بردار نیروها و ممان‌های محیطی، سامانه هدایت و سیستم رانش هستند. ضرایب ماتریس M_{RB} تابع جرم و توزیع جرم جسم، ضرایب ماتریس C_{RB} تابع جرم، توزیع جرم و همچنین مشخصات حرکتی جسم است. ماتریس‌های M_A و $D(v)$ شامل ضرایب جرم اضافی و ضرایب نیروها و گشتاورهای بازدارنده (دمپینگ) هستند. مجموع این ضرایب در اینجا به عنوان ضرایب هیدرودینامیکی نامیده شده است. تعیین ضرایب هیدرودینامیکی یک الزام اولیه برای حل معادله (۱) و تعیین مشخصات مانورپذیری یک شناور است. برای محاسبه این مقادیر باید جریان اطراف جسم، آنالیز و بررسی شود. از جمله آزمایش‌ها برای تعیین مشتق‌های هیدرودینامیکی آزمایش‌های سووی خالص (Pure Sway) و یاو خالص (Pure Yaw) با استفاده از مکانیزم حرکت صفحه‌ای (پی‌ام‌ام) است.

جدول ۱) کمیت‌های مورد استفاده در معادلات دینامیکی یک شناور زیرسطحی

نوع حرکت یا چرخش	نام حرکت	نیروها و گشتاورها	سرعت‌های خطی و زاویه‌ای	موقعیت و زوایای اولیه
حرکت در جهت x	سرج (Surge)	X	u	x
حرکت در جهت y	سووی (Sway)	Y	v	y
حرکت در جهت z	هیو (Heave)	Z	w	z
چرخش حول محور x	رول (Roll)	K	p	ϕ
چرخش حول محور y	پیچ (Pitch)	M	q	θ
چرخش حول محور z	یاو (Yaw)	N	r	ψ

۳- مکانیزم حرکت صفحه‌ای (پی‌ام‌ام) و تست سرج

اولین مکانیزم حرکت صفحه‌ای کاملاً کاربردی در سال ۱۹۶۰ در حوضچه کشش دیوید تیلور (David Taylor Model Basin; DTMB) نصب شد. گودمن [15] و گتلا [16] توضیح مشابهی از مشخصات فیزیکی تاسیسات و همچنین قوانین تئوری که تست پی‌ام‌ام بر مبنای آن انجام می‌شود، ارائه کرده‌اند. این نوع آزمایش شامل یک وسیله الکترومکانیکی است که برای حرکت دادن مدل، به صورت یک سری از حرکات نوسانی از پیش برنامه‌ریزی شده در

همکاران [7] با استفاده از روش عددی، مانور بازوی چرخان را روی مدل شناور سابوف شبیه‌سازی نمودند و ضرایب وابسته به این آزمایش را استخراج نمودند. نتایج، تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند. جو/نمردی و همکاران [8] به بررسی اثر تغییر زاویه سطوح کنترل افقی بر میزان درگ وارد بر ربات هوشمند زیرسطحی به دو روش عددی و تجربی پرداختند که نتایج نشان‌دهنده تطابق خوب دو روش است. نوری و همکاران [9]، تخمین مشتقات هیدرودینامیکی زیرسطحی را با استفاده از ترکیب روش عددی و نیمه تجربی انجام دادند. با مقایسه‌ای که با نتایج آزمایشگاهی انجام شده، نتیجه گرفته شده است که ترکیب روش سی‌اف‌ادی با آزمایش در مرحله طراحی تفصیلی روش کارآمدی است. حاجیوند و همکاران [10] روش سی‌اف‌ادی را برای استخراج ضرایب هیدرودینامیک یک شناور با نسبت طول به قطرهای مختلف مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند، ضرایب هیدرودینامیکی با افزایش طول افزایش می‌یابند.

هر چند که تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در ابعاد و موضوعات مختلف در زمینه تعیین رفتار و محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی شناورهای زیرسطحی به روش عددی انجام شده است، اما هنوز تعیین پارامترهای شبیه‌سازی عددی جهت محاسبه صحیح ضرایب هیدرودینامیکی در آزمایشات مختلف از چالش‌های جدی در این موضوع است. در شبیه‌سازی و محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی با استفاده از آزمایشات پی‌ام‌ام، استقلال نتایج از سه پارامتر دامنه، سرعت و فرکانس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شجاعی‌فرد و همکاران [11] حساسیت ضرایب هیدرودینامیکی هیدروفرویل دوبعدی با مقطع NACA0012 را نسبت به دامنه و نوسان از روش سی‌اف‌ادی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نبود اطلاعات کافی در زمینه اعتبارسنجی مدل دوبعدی، ایشان تنها پارامتر درگ را به عنوان مبنای بررسی صحت روش عددی قرار داده و حساسیت ضرایب عددی را نسبت به دامنه و فرکانس مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند تغییرات دامنه و فرکانس بر ضرایب حاصل از شبیه‌سازی اثرگذار است.

بیضی‌گون دوار به‌طور گسترده برای تخمین مشخصات هیدرودینامیکی شناورهای زیرسطحی متقارن استفاده می‌شود. اگرچه شکل هندسی بیضی‌گون دوار، ساده است، اما در مانور، میدان جریان اطراف آن به‌طور مناسبی بر اژدها، زیردریایی‌ها، جدایش جریان، لایه مرزی و غیره قابل تعمیم است [12]. همچنین این هندسه شبیه به هندسه مورد علاقه برای ای‌یووی‌ها است. در مقاله پیش رو تأثیر پارامترهای دامنه و سرعت شبیه‌سازی آزمایشات پی‌ام‌ام بر ضرایب هیدرودینامیکی یک زیرسطحی بیضی‌گون مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- معادلات دینامیکی

جدول ۱، کمیت‌های مختلف مورد استفاده در معادلات دینامیکی یک شناور زیرسطحی را بیان می‌کند.

در این روش مقادیر سرعت زاویه‌ای r و شتاب زاویه‌ای $\dot{r}$ در محور مختصات متصل به بدنه در طول مسیر حرکت همیشه صفر است. جابجایی y ، سرعت v و شتاب $\dot{v}$ می‌تواند به صورت زیر بیان شوند:

$$y = -a_0 \sin \omega t \quad (4)$$

$$\dot{y} = v = -a_0 \omega \cos \omega t \quad (5)$$

$$\ddot{y} = \dot{v} = -a_0 \omega^2 \sin \omega t \quad (6)$$

که در آن a_0 دامنه و ω فرکانس نوسانات حرکت هستند. در این حالت حرکت هارمونیک بالا و پایین در جهت جریان و یک زاویه برخورد بر بدنه وجود دارد. در یک سیکل حرکت سرعت v و شتاب $\dot{v}$ بین حداکثر مقادیر مثبت و منفی تغییر می‌کند و بنابراین دامنه نیروی Y و ممان N بر مدل اعمال می‌شود. این نیروها در معادلات سووی و یاو مشاهده می‌شود که در معادلات (۷) و (۸) ارائه شده است.

$$Y = (m - Y_v) \dot{v} + (mx_G - Y_r) \dot{r} - Y_v + (m - Y_r) r \quad (7)$$

$$N = (mx_G - N_v) \dot{v} + (I_z - N_r) \dot{r} - N_v v + (mx_G U_0 - N_r) r \quad (8)$$

با توجه به اینکه $r = \dot{r} = 0$ است بنابراین معادلات به صورت معادلات زیر ساده می‌شوند:

$$Y = (m - Y_v) \dot{v} - Y_v \quad (9)$$

$$N = (mx_G - N_v) \dot{v} - N_v v \quad (10)$$

مقادیر نیروی Y و ممان N می‌تواند به دو بخش در فاز و خارج فاز جابجایی y تجزیه شود. از معادلات سووی خالص، شتاب $\dot{v}$ تابع سینوسی است که با جابجایی y هم‌فاز است، برخلاف سرعت v که تابعی کسینوسی بوده و با جابجایی y ، ۹۰ درجه اختلاف فاز دارد. اجزاء هم‌فاز نیروی Y_{in} و ممان N_{in} به طور مستقیم در ارتباط با شتاب $\dot{v}$ هستند و بنابراین می‌توانند برای محاسبه مشتقات شتاب $\dot{v}$ و Y_v استفاده شوند. به طور مشابه، نیرو و ممان خارج از فاز جابجایی (Y_{out} و N_{out}) مشتقات Y_v و N_v را حاصل می‌کنند. هنگامی که نیرو و ممان هم‌فاز حرکت هستند یعنی ($v=0$ و $\dot{v} = a_0 \omega^2$)، مشتقات شتاب وابسته (نیروهای جرم‌افزوده) از روابط زیر حاصل می‌شوند:

$$Y_v = m - \frac{Y_{in}}{a_0 \omega^2}, N_v = mx_G - \frac{N_{in}}{a_0 \omega^2} \quad (11)$$

برای شرایط خارج از فاز ($\dot{v} = 0$ و $v = a_0 \omega$)، نیروها و ممان‌های در ارتباط با سرعت (دمپینگ) به صورت زیر استخراج می‌شوند:

$$Y_v = -\frac{Y_{out}}{a_0 \omega}, N_v = -\frac{N_{out}}{a_0 \omega} \quad (12)$$

برای حرکت یاو خالص، ضروری است که مقادیر $v = \dot{v} = 0$ باشد، بنابراین سرعت مدل باید مماس بر مسیر حرکت باشد. این تست ما را قادر می‌سازد تا بتوانیم مشتقات هیدرودینامیک حرکت چرخش یعنی Y_r, Y_v, N_r, N_v را محاسبه کنیم.

شکل ۳، حرکت یاو خالص را نشان می‌دهد که در آن سرعت V منتهی به جسم مماس بر مسیر حرکت است. در این روش جزء عمودی سرعت یعنی v و بنابراین مشتق آن یعنی $\dot{v}$ در دستگاه مختصات بدنه در طول سیکل حرکت صفر باقی می‌ماند. پارامترهای

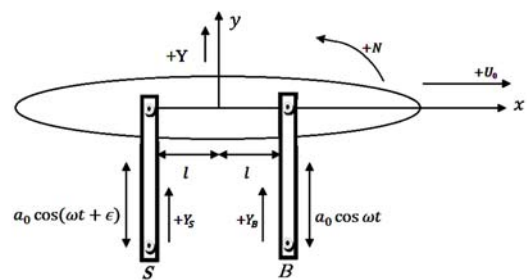
حوضچه کشش مورد استفاده قرار می‌گیرد. مکانیزم حرکت صفحه‌ای اصولاً شامل دو محرک الکترومکانیکی است که به صورت عمودی و افقی روی دستگاه آزمایش نصب می‌شود. پی‌ام‌ام یک نوسان‌ساز افقی یا عمودی است که در یک حوضچه کشش استفاده می‌شود. پی‌ام‌ام (شکل ۱) قادر است که مدل را در حرکات زیگزآگی (سووی) خالص در صفحه افق و هیو خالص (Pure Heave) در صفحه عمود (یا ماهیگون) (یاو) خالص در صفحه افق و پیچ خالص (Pure Pitch) در صفحه عمود (یا ترکیبی از این دو به نوسان درآورد). پی‌ام‌ام‌ها معمولاً شامل دو بازو هستند که مدل را به صورت افقی یا عمودی دچار نوسان می‌کنند. این آزمایشات برای تعیین نیروها و ممان‌های عمل‌کننده روی مدل در نتیجه این حرکات‌ها استفاده می‌شود. نتایج این تست‌ها برای به دست آوردن ضرایب هیدرودینامیکی خطی یا غیرخطی شناور استفاده می‌شود. مدل در سرعت طراحی کشیده می‌شود و دامنه حرکات سووی و یاو متغیر است. فرض می‌شود که ضرایب محاسبه شده در فرکانس‌های پایین مستقل از فرکانس باشند. بنابراین میزان جابجایی دو بازوی S و B به صورت رابطه زیر به دست می‌آید.

$$y_b = a_0 \cos \omega t \quad (2)$$

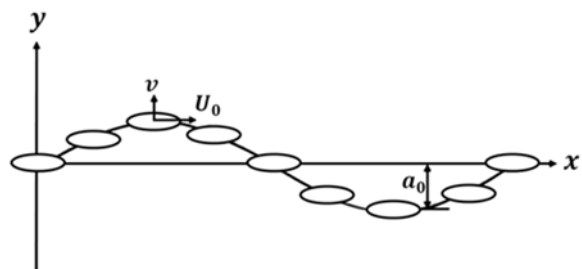
$$y_s = a_0 \cos(\omega t + \epsilon) \quad (3)$$

در صورتی که اختلاف فاز دو بازو $\epsilon = 0$ باشد، حرکت سووی خالص است و در صورتی که اختلاف فاز آن‌ها $\epsilon = \pi$ باشد، حرکت یاو خالص ایجاد می‌شود. تست مکانیزم حرکت صفحه‌ای (در صفحه افق) برای محاسبه ضرایب دمپینگ Y_v, Y_r, N_v, N_r و ضرایب جرم‌افزایی Y_v, Y_r, N_v, N_r طراحی شده است.

تست پی‌ام‌ام حرکت سووی خالص (شکل ۲) شامل حرکتی نوسانی مقید در راستای y با سرعت ثابت U_0 است، به طوری که مدل باید همیشه موازی با محور مرکزی حوضچه قرار بگیرد.



شکل ۱) تنظیمات مکانیزم حرکت صفحه‌ای در صفحه افق



شکل ۲) آزمایش حرکات زیگزآگی صفحه‌ای در صفحه افق (سووی خالص)

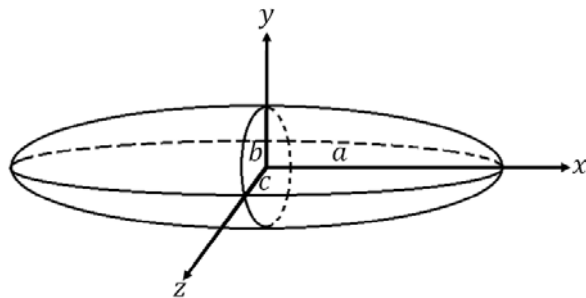
این آزمایش دو ضریب هیدرودینامیکی با یک بار انجام آزمایش به دست می‌آیند. در شبیه‌سازی عددی، نیروی هیدرودینامیکی در جهت X به صورت زیر تجزیه می‌شود.

$$X = X_u \dot{u} + X_u(u + U) = X_u \dot{u} + X_u u + X_u U \quad (۲۳)$$

در حالت $\dot{u} = 0$ ، نیروی اندازه‌گیری‌شده، نیروی درگ $X_u(u + U)$ است. اما زمانی که $u = 0$ باشد، نیروی درگ به همراه سهم نیروی $X_u \dot{u}$ اندازه‌گیری $X_u \dot{u} + X_u U$ می‌شود. بنابراین در ابتدا باید مقدار نیرویی که شناور در جهت X حول آن نوسان می‌کند، یعنی نیروی درگ حالت دائم $X_u U$ محاسبه شود. در نتیجه مقدار X_u ضریب $X_u = \frac{X_{Ave}}{U}$ محاسبه می‌شود. سپس برای محاسبه مقدار ضریب X_u ، نیرو در حالت $u = 0$ خوانده شده و مقدار مربوط به حالت دائم $X_u U$ از آن کاسته می‌شود $(X_u = m - \frac{X_{in} - X_u U}{a_0 \omega^2})$.

۴- محاسبات جرم‌افزوده به روش تئوری

همانند هر بدنه با تابع جریان پتانسیل شناخته‌شده، بیان ریاضی برای جرم‌افزوده یک جسم دوکی‌شکل داری محورهای تقارن و $a > b$ وجود دارد [17]. برای محاسبه مشتقات جرم‌افزوده برای یک بیضی‌گون به صورت تئوری، محورهای مختصات به این صورت در نظر گرفته شده که جهت جریان در جهت عکس محور x ، جهت محور y در راستای عمودی است. به طوری که صفحه xy صفحه متقارن عمودی است. مرکز مختصات همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است بر مرکز بیضی‌گون قرار گرفته است.



شکل ۵) بیضی‌گون دوار با مشخصات ابعادی و محور مختصات متصل به جسم

بیضی‌گون دوار همان‌گونه که در شکل ۵، نشان داده شده است از چرخش بیضی حول محور اصلی به دست می‌آید. معادله کلی بیضی‌گون به صورت رابطه (۲۴) است.

$$\frac{x^2}{a^2} = \frac{y^2}{b^2} = \frac{z^2}{c^2} \quad (۲۴)$$

برای بیضی‌گون دوار $b/c = 1$ و $a > b$ است. خروج از مرکزی e قطاع، حول محور اصلی، به صورت رابطه (۲۵) به دست می‌آید.

$$e = 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (۲۵)$$

سایر پارامترهای مورد نیاز به صورت روابط ذیل به دست می‌آید:

$$A_0 = \frac{2(1-e^2)}{e^3} \left(\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1-e}{1+e} \right) - e \right) \quad (۲۶)$$

$$B_0 = \frac{1}{e^2} - \frac{1-e^2}{2e^3} \ln \left(\frac{1-e}{1+e} \right) \quad (۲۷)$$

حرکت در مورد حرکت یابو خالص را می‌توان به صورت روابط (۱۳) تا (۱۵) نوشت:

$$\psi = -\psi_0 \cos \omega t, y = -a_0 \sin \omega t \quad (۱۳)$$

$$\dot{\psi} = r = -\psi_0 \omega \sin \omega t \quad (۱۴)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{r} = -\psi_0 \omega^2 \cos \omega t \quad (۱۵)$$

که $\psi_0 = \frac{a_0 \omega}{U_0}$ دامنه نوسانات زاویه‌ای است. برای حرکت یابو خالص، معادلات حرکت سووی و یابو به صورت زیر ساده می‌شود:

$$Y = (mx_G - Y_r) \dot{r} + (mU_0 - Y_r) r \quad (۱۶)$$

$$N = (I_z - N_r) \dot{r} + (mx_G U_0 - N_r) r \quad (۱۷)$$

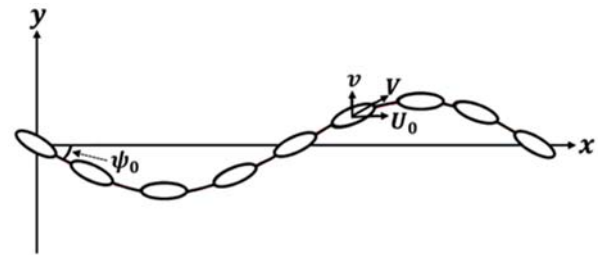
Y و N را به دو دسته، در فاز جابجایی زاویه‌ای ($\dot{\psi} = r = 0$) و خارج فاز جابجایی زاویه‌ای ($\ddot{\psi} = \dot{r} = 0$) تجزیه می‌کنیم.

مشتقات هیدرودینامیکی از روابط (۱۸) و (۱۹) به دست می‌آید.

$$Y_r = mx_G - \frac{Y_{in}}{\psi_0 \omega^2}, N_r = I_z - \frac{N_{in}}{\psi_0 \omega^2} \quad (۱۸)$$

$$Y_r = mU_0 - \frac{Y_{out}}{\psi_0 \omega}, N_r = mx_G U_0 - \frac{N_{out}}{\psi_0 \omega} \quad (۱۹)$$

برای تعیین X'_u (شکل ۴)، مدل را با سرعت $u + U$ به سمت جلو حرکت می‌دهیم که در آن $u = -a_0 \omega \cos \omega t$ است [1].



شکل ۳) آزمایش ماهی در صفحه افق (یابو خالص)



شکل ۴) آزمایش سرچ خالص

معادله حرکت سرچ، از مجموعه حرکات خطی‌سازی‌شده در صفحه افقی xy ، به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$(m - X_u) \dot{u} - X_u(u + U) = X \quad (۲۰)$$

مثل حرکات قبل با توجه به معادلات حرکت در جهت محور طولی و در نظر گرفتن دو وضعیت $u = 0$ و $\dot{u} = 0$ خواهیم داشت. وقتی

$\dot{u} = 0$ یعنی $u = -a_0 \omega$ باشد نیروی اندازه‌گیری‌شده متناسب با $-X_u(u + U)$ است. لذا داریم:

$$X_u = \frac{X_{out}}{U - a_0 \omega} \quad (۲۱)$$

از آنجایی که مقدار $a_0 \omega^2$ ناچیز است، این نیرو بیشتر ناشی از نیروی درگ است. وقتی $u = 0$ یعنی $\dot{u} = a_0 \omega^2$ باشد داریم:

$$X_u = m - \frac{X_{in} + UX_u}{a_0 \omega^2} \quad (۲۲)$$

در این حالت مانند حالات قبل، زیرنویس‌های in و out به ترتیب مربوط به اندازه نیروی X در فاز سرعت و خارج از فاز آن است. با

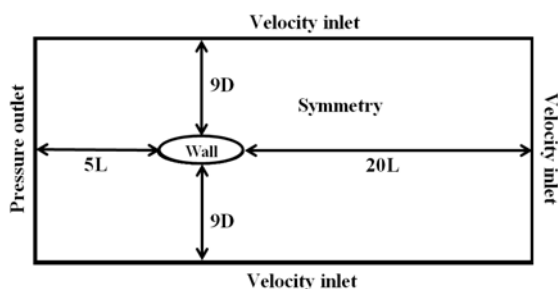
نسبت به روش استاندارد دارد. در این روش از معادله جدیدی برای محاسبه لزجت توربولانسی، بهره برده شده است و همچنین معادله نرخ اضمحلال (Dissipation Rate) از معادله‌ای برای انتقال میانگین مربعات نوسانات و رتیبستی اقتباس شده است [19,20]. برای انجام محاسبات چگالی آب دریا ۹۹۷/۵۶۱ کیلوگرم بر متر مکعب و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

۶- شبیه‌سازی عددی

تمامی شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای این تحقیق توسط کد تجاری استار سی‌سی‌ام پلاس (Star-CCM+) انجام شده است. شبیه‌سازی حجم محدود گذرا که مدل جریان مجزا (پیش‌بینی-اصلاح) (Segregated (Predictor-Corrector) Flow) و الگوریتم حل سیمپل (SIMPLE) را برای معادلات فشار به کار می‌گیرد، مورد استفاده قرار گرفته است.

۶-۱- دامنه محاسباتی

با توجه به ماهیت شتاب‌دار بودن حرکات در شبیه‌سازی آزمایشات دینامیکی باید از شبکه‌بندی استفاده نمود که قابلیت حرکت داشته باشد. بدین منظور از شبکه‌بندی اورست (Overset) برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. شبکه‌بندی اورست، جهت شبکه‌بندی غیرپیوسته چندگانه، برای گسسته‌سازی دامنه جریان استفاده می‌شود. اجزاء شبکه می‌تواند هر نوع سایز، اندازه و شکل را داشته باشند اما باید به گونه‌ای با دیگر اجزاء روی هم قرار بگیرند که هم‌پوشانی کامل روی دامنه محاسباتی ایجاد شود. با توجه به استفاده از مش اورست، لازم است علاوه بر در نظر گرفتن فواصل به‌صورتی که شرط مغروق‌بودن جسم را ارضا میکند، فواصل طولی به گونه‌ای انتخاب شود که ضمن حرکت جسم تداخلی با مرزها ایجاد نشود. همچنین برای بررسی گذر زمان حل بر نتایج، دامنه محاسباتی به گونه‌ای انتخاب شد که پریودهای حرکتی بعدی نیز قابل بررسی باشد. بنابراین دامنه انتخاب‌شده، دامنه نسبتاً عریضی است. دامنه محاسباتی به‌صورت شکل ۶ برای آزمایشات سووی خالص و یو خالص در نظر گرفته شده است. صفحه روبروی حرکت جسم و صفحات بالا و پایین شرط مرزی جریان سرعت ورودی، صفحه پشت حرکت جسم شرط فشار خروجی، صفحه تقارن بیضی‌گون (صفحه طولی) و صفحه موازی آن که صفحه پشت جسم از دیدگاه خواننده است شرط تقارن و در نهایت برای جسم مغروق شرط دیواره بدون لغزش در محاسبات اعمال شده است.



شکل ۶ ابعاد دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

مقدار جرم جابجاشده توسط بیضی‌گون m ، با دانسته ρ و مقدار ممان آن یعنی $I_y = I_z$ به‌صورت روابط (۲۸) و (۲۹) بیان می‌شود.

$$m = \frac{4}{3}\pi\rho ab^2 \quad (28)$$

$$I_y = I_z = \frac{4}{3}\pi\rho ab^2(a^2 + b^2) \quad (29)$$

فاکتورهای لامب [18] به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$k_1 = -\frac{A_0}{2-A_0} \quad (30)$$

$$k_2 = -\frac{B_0}{2-B_0} \quad (31)$$

$$k' = \frac{e^2(B_0-A_0)}{(2-e^2)(2e^2-(2-e^2)(B_0-A_0))} \quad (32)$$

با تعاریف فوق مشتقات جرم و اینرسیایی برای بیضی‌گون دوار به‌صورت روابط (۳۳) تا (۳۵) به‌دست می‌آید:

$$X_{\dot{u}} = k_1 m \quad (33)$$

$$Y_{\dot{v}} = Z_{\dot{w}} = -k_2 m \quad (34)$$

$$N_{\dot{r}} = M_{\dot{q}} = -k' I_y \quad (35)$$

برای بیضی‌گون دوار با نسبت طول به قطر $\frac{1}{4}$ جرم‌افزوده بدون بعد در حرکت سووی بر اثر شتاب سووی $\ddot{u}$ به‌صورت رابطه (۳۶)، بر اثر حرکت یو به‌صورت رابطه (۳۷) و برای حرکت سرچ به‌صورت رابطه (۳۸) است.

$$Y'_{\dot{v}} = \frac{Y_{\dot{v}}}{\frac{1}{2}\rho l^3} = -0.02668 \quad (36)$$

$$N'_{\dot{r}} = \frac{N_{\dot{r}}}{\frac{1}{2}\rho l^5} = -0.0011 \quad (37)$$

$$X'_{\dot{u}} = \frac{X_{\dot{u}}}{\frac{1}{2}\rho l^3} = -0.00131 \quad (38)$$

۵- معادلات حرکت سیال و شرایط محیطی

معادلات حاکم بر حرکت سیال شامل معادلات پیوستگی و مومنوم هستند. با حل این معادلات می‌توان مشخصات جریان از قبیل سرعت و فشار را به‌دست آورد. با توجه به ماهیت توربولانسی جریان، با استفاده از عبارات میانگین‌گیری‌شده زمانی سرعت و فشار، معادلات متوسط‌گیری‌شده نایر استوکس (رنز: Navier-Stokes) به‌صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \right. \quad (39)$$

که ν ویسکوزیته سینماتیکی سیال است. ρ و u_i به‌ترتیب معرف چگالی و مؤلفه سرعت $i=1,2,3$ ام هستند و p بیانگر فشار استاتیکی و $-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j = \tau_{ij}$ مبین تنش رینولدز است که از رابطه (۴۰) محاسبه می‌شود.

$$-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (40)$$

در رابطه فوق δ_{ij} دلتا کرونکر و μ_t لزجت توربولانسی (Turbulent Viscosity) است که با توجه به مدل توربولانسی انتخابی، مدل‌سازی می‌شود. از مدل توربولانسی کی-اِپسیلون ری‌الایزبل (Realizable K-ε) استفاده شده است. این روش توسعه‌یافته روش استاندارد کی-اِپسیلون است و دو تغییر اساسی

در روابط فوق n تعداد سلول، r نسبت تعداد سلولها، $D=3$ برای هندسه سه بعدی، ε نسبت خطای پارامترهای کلیدی، f_i پارامتر کلیدی، $F_s=1/20$ فاکتور اطمینان، پارامتر α که وقتی نزدیک یک باشد پارامتر f_i مستقل از شبکه خواهد بود، p مرتبه تغییرات پارامترها است که برای سه سطح مش به صورت رابطه زیر محاسبه می شود.

$$p = \frac{1}{\ln r_{12}} |\ln |\varphi_{23}/\varphi_{21}| + q(p)| \quad (40\text{-الف})$$

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{12}^p - s}{r_{23}^p - s} \right) \quad (40\text{-ب})$$

$$s = 1. \operatorname{sgn} (\varphi_{23}/\varphi_{21}) \quad (40\text{-ج})$$

که در روابط فوق $\varphi_{12} = f_1 - f_2$ و $\varphi_{23} = f_2 - f_3$ است.

جدول (۲) مقادیر GCI در $\theta = 4 \text{ deg}$

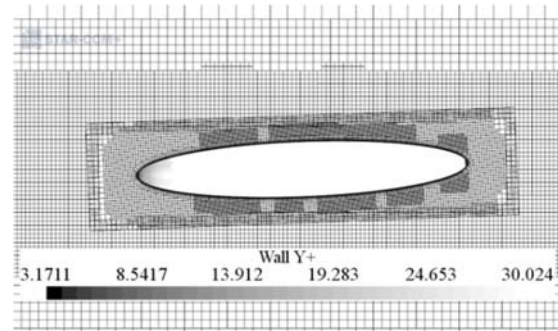
X (N)	Y (N)	N (N-m)	
۱۲/۵۸۹	۵/۲۵۵	۱۲/۰۱۹	$n_1 = ۵۸۸۱۳۱۵$
۱۲/۶۳۸	۵/۲۸۶	۱۲/۰۲۵	$n_2 = ۳۱۸۵۳۷۷$
۱۲/۷۴۲	۵/۳۳۰	۱۲/۰۰۱	$n_3 = ۱۵۶۲۵۲۷$
۱/۲۲۶	۱/۲۲۶	۱/۲۲۶	r_{12}
۱/۲۶۷	۱/۲۶۷	۱/۲۶۷	r_{23}
۴/۹	۳/۱	۰/۶	$\varepsilon_{21}(\%)$
۱۰/۴	۴/۴	۲/۵	$\varepsilon_{23}(\%)$
۲/۷۰۹	۰/۹۰۵	۵/۶۹۵	p
۰/۶۶۱	۳/۶۵۱	۰/۰۲۸	$GCI_{12}^{fine}(\%)$
۱/۱۴۵	۴/۳۶۷	۰/۰۹۱	$GCI_{23}^{fine}(\%)$
۱/۰۰۲	۱/۰۰۴	۰/۹۹۹	α

۷- اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه سازی حرکت سرج

با شبیه سازی حرکت سرج شتابدار دو ضریب X'_{ii} و X''_{ii} که از ضرایب مهم در شبیه سازی حرکت شناور هستند، تعیین می شوند. در این مطالعه جهت شبیه سازی روش ابداعی مورد استفاده قرار گرفته است. مقدار $U = 0$ در نظر گرفته شد و با استفاده از مش اورست شناور در یک مسیر رفت و برگشت به نوسان وا داشته شد. بنابراین نیاز به محاسبه مجزای مقدار درگ حالت دائم وجود ندارد و مقدار $X_{ii} = -\frac{X_{out}}{a_0 \omega}$ و $X'_{ii} = -\frac{X_{in}}{a_0 \omega^2}$ خواهد شد. ابتدا از حل مرسوم یعنی جسم با دیواره بدون لغزش (No-Slip Wall) برای تعیین ضرایب فوق استفاده شده است. سپس جهت تعیین تاثیرات پدیده جدایش و لایه مرزی بر نتایج جرم افزوده، بدنه با شرط مرزی دیواره لغزنده (Slip Wall) شبیه سازی شده است. فرکانس نوسان در محاسبات، 0.2 هرتز در نظر گرفته شده است. ابتدا از دامنه های کوچک محاسبات شروع شد که به علت کوچک بودن بیش از اندازه سرعت و نیروها مقدار خطا زیاد و در دامنه های زیر $0.2L$ عملاً غیرقابل قبول بود. نتایج از دامنه $0.5L$ در محدوده قابل قبول قرار می گرفت که در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان دهنده آن است که با در نظر گرفتن دامنه بین ۱ تا $2L$ می توان ضرایب جرم افزوده و دمپینگ را با دقت قابل قبول محاسبه نمود. با استفاده از شرط مرزی دیوار لغزنده، محاسبه جرم افزوده حرکت سرج از دقت بیشتری برخوردار است. جهت ارزیابی نتایج از ضریب درگ بیضی گون

۲-۶- تولید مش

مش ساختاریافته تریمر (Trimmer) برای حجم بندی دامنه محاسباتی استفاده شده است. این روش، روشی بهینه و قدرتمند برای تولید شبکه های ساختاریافته با حداقل تقارن است. شکل ۷ مش تولید شده در اطراف جسم و مقدار Y^+ روی جسم، برای شبیه سازی آزمایش یاو خالص را نشان می دهد.



شکل (۷) مش تریمر در دامنه حل جریان آزمایش یاو خالص و مقدار Y^+ بر جسم

تعداد 2059791 المان در سرعت 1 m/s بر ثانیه و تعداد 2968374 المان در سرعت 4 m/s بر ثانیه در دامنه محاسباتی شبیه سازی آزمایش سووی خالص، همچنین در شبیه سازی آزمایش یاو خالص تعداد 3185377 المان در سرعت 1 m/s بر ثانیه و تعداد 43053268 المان در سرعت 4 m/s بر ثانیه در دامنه محاسباتی تولید شده است. عمده دلیل در بحث افزایش تعداد المان از سرعت 1 به 4 m/s بر ثانیه، دستیابی به $Y^+ = 30$ در انجام شبیه سازی ها بوده است که جهت افزایش تراکم المان ها در اطراف جسم مغروق، تعداد المان ها افزایش یافته است. در تولید المان های مش، حداقل تعداد المان هایی که شرط دستیابی به باقی مانده کمتر از 10° و $Y^+ = 30$ و الزامات مش اورست از نظر عدم به وجود آمدن خطای حجم محدود منفی را ارضا می کردند، مد نظر قرار گرفت. همچنین روش روچ^[21] با معیار جی سی آی (Grid Convergence Index; GCI) جهت استقلال نتایج از شبکه مورد استفاده قرار گرفت. در هر شبیه سازی سه پارامتر کلیدی (f) نیروی در راستای محور X یعنی X ، نیروی در راستای محور Y یا Z (در صفحه افقی یا Z در صفحه عمودی) و ممان حول مبدأ مختصات محلی (N در صفحه افقی یا M در صفحه عمودی) در زاویه 4 درجه جهت آنالیز حساسیت نتایج نسبت به شبکه بندی در شبیه سازی ها مورد بررسی قرار گرفت. نمونه نتایج به دست آمده برای شبیه سازی آزمایش یاو در سرعت 1 m/s بر ثانیه بیضی گون در جدول ۲ ارائه شده است.

روابط زیر، مراحل محاسبه جی سی آی برای هر پارامتر را ارائه می کنند.

$$r_{i-1,i} = (n_{i-1,i}/n_i)^{1/D} \quad (41)$$

$$\varepsilon_{i-1,i} = (f_{i-1,i} - f_i)/f_i \quad (42)$$

$$GCI_{i-1,i}^{fine} = (F_s |\varepsilon_{i-1,i}|) / (r_{i-1,i}^p - 1) \quad (43)$$

$$\alpha = r_{12} GCI_{12}^{fine} / GCI_{23}^{fine} \quad (44)$$

سه بعدی محاسبه شده از تست های آزمایشگاهی [24] برای ضریب دمپینگ $(X_u' (EXP) = -0.001963472)$ و نتایج جرم افزوده تئوری $(X_u' (theory) = -0.0031)$ برای ضریب جرم افزوده استفاده شده است. روش محاسبه خطا (E) به صورت روابط زیر است.

$$E(\%) = \left| \frac{X_u'(CFD) - X_u'(Theory)}{X_u'(Theory)} \times 100 \right| \quad (46)$$

$$E(\%) = \left| \frac{X_u'(CFD) - X_u'(Exp)}{X_u'(Exp)} \times 100 \right| \quad (47)$$

جدول ۳) نتایج حاصل از شبیه سازی تست سرچ شتاب دار

E (%)	X_u' (CFD)	E (%)	X_u' (CFD)	A (m)	B.C
۲۵/۴۷۸	-۰/۰۰۲۴۶۳۷۲	۱۳/۴۲۳	-۰/۰۰۱۴۸۵۸۳۶	۰/۵L	No-slip
۳/۳۲۳	-۰/۰۰۲۰۲۸۷۱۸	۱۴/۰۲۳	-۰/۰۰۱۴۹۳۷۰۳	۱L	
۱۷/۸۰۲	-۰/۰۰۱۶۱۳۹۴۲	۱۷/۶۳۷	-۰/۰۰۱۵۴۱۰۵۳	۲L	
—	—	۳/۷۲۹	-۰/۰۰۱۲۶۱۱۴۳	۰/۵L	Slip
—	—	۳/۷	-۰/۰۰۱۲۶۱۵۲۱	۱L	
—	—	۵/۳۹۷	-۰/۰۰۱۲۳۹۲۹۳	۲L	

۸- اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه سازی آزمایش سووی خالص

در این بخش نتایج حاصل شده از تأثیر دامنه حرکت و سرعت وسیله روی نتیجه محاسبات در آزمایش سووی خالص ارائه شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

۸-۱- بررسی تأثیر دامنه حرکت در استخراج ضرایب آزمایش سووی خالص

جهت بررسی تأثیر دامنه، حرکت جسم با چهار دامنه مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. برای دامنه ها مقدار 0.1 ، 0.2 ، 0.3 و $0.4L$ در نظر گرفته شد. جدول ۴ مقادیر به دست آمده حاصل از شبیه سازی برای دامنه های مختلف در سرعت 1 متر بر ثانیه و در فرکانس حرکتی 0.2 هرتز را ارائه می دهد. جدول ۵ خطای شبیه سازی ها برای دامنه های حرکتی مختلف در آزمایش سووی خالص را نشان می دهد. مقدار تئوری جرم افزوده $Y_p'(Theory) = -0.02668$ است. برای محاسبه مقدار خطا از رابطه (۴۲) استفاده شده است.

$$E(\%) = \left| \frac{Y_p'(CFD) - Y_p'(Theory)}{Y_p'(Theory)} \times 100 \right| \quad (48)$$

جدول ۴) نتایج حاصل از شبیه سازی ها برای دامنه های حرکتی مختلف آزمایش سووی

دامنه حرکت (m)	Y_p' (CFD)	Y_p' (CFD)	N_b' (CFD)	N_b' (CFD)
۰/۱L	-۰/۰۲۶۵۳۷۰۰۵	-۰/۰۱۲۴۹۴۰۱۰	-۰/۰۰۰۲۸۷۵۰۱	-۰/۰۲۲۰۲۹۴۳۱
۰/۲L	-۰/۰۲۷۸۸۶۲۹۸	-۰/۰۱۲۱۶۵۴۱۵	-۰/۰۰۰۳۵۶۸۰۱	-۰/۰۲۲۱۷۵۵۷۶
۰/۳L	-۰/۰۲۸۹۴۷۰۷۶	-۰/۰۱۲۳۱۹۲۵۲	-۰/۰۰۰۳۴۸۱۱۵	-۰/۰۲۲۱۳۱۹۸۹
۰/۴L	-۰/۰۴۲۳۱۶۷۹۸	-۰/۰۰۶۴۵۱۹۱۶	-۰/۰۰۰۳۷۰۷۷۳	-۰/۰۲۲۰۲۹۴۳۱
تئوری	-۰/۰۲۶۶۸	—	—	—

جدول ۵) خطای شبیه سازی برای دامنه های حرکتی مختلف در آزمایش سووی خالص

دامنه حرکت (m)	Y_p' (CFD)	E (%)
۰/۱L	-۰/۰۲۶۵۳۷۰۰۵	۰/۵۳۵۹۶
۰/۲L	-۰/۰۲۷۸۸۶۲۹۸	۰/۵۲۱۳۶
۰/۳L	-۰/۰۲۸۹۴۷۰۷۶	۸/۴۹۷۲۸
۰/۴L	-۰/۰۴۲۳۱۶۷۹۸	۵۹/۱۰۰۰۷

نتایج به دست آمده نشان می دهد که بهترین نتیجه با در نظر گرفتن دامنه برابر با $0.1L$ به دست می آید. همچنین با افزایش دامنه از 0.1 تا $0.4L$ خطای محاسباتی به طور چشمگیری افزایش می یابد و به مقدار 59.1% می رسد. جهت بررسی علت خطای به وجود آمده، شرایط مرزی به این صورت تغییر داده شد که بدنه دیواره با لغزش در نظر گرفته شد، بنابراین اثر ویسکوزیته و جدایش روی دیواره حذف شد. نتایج برای دو دامنه حداقل و حداکثر در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶) خطای شبیه سازی برای دامنه های حرکتی مختلف در آزمایش سووی خالص با شرط مرزی دیواره لغزان

دامنه حرکت (m)	Y_p' (CFD)	E (%)
۰/۱L	-۰/۰۲۶۵۵۷۳۴۹	۰/۴۵۹۷۱۰۷۳۷
۰/۴L	-۰/۰۲۵۴۱۹۱۷۷	۴/۷۲۵۷۲۳۱۳۴

با توجه به رابطه (۵) و نتایج ارائه شده در جدول ۶ می توان نتیجه گرفت که با افزایش دامنه حرکت، سرعت عرضی به صورت مستقیم افزایش پیدا می کند و با افزایش 10 برابری دامنه، سرعت عرضی 10 برابر افزایش می یابد. با توجه به اینکه عدد رینولدز با سرعت رابطه مستقیم دارد، عدد رینولدز نیز 10 برابر خواهد شد. سطح مقابل جریان مقطع طولی است که با افزایش 10 برابری رینولدز جدایش جریان با شدت بیشتری صورت خواهد گرفت. بنابراین، نتایج نشان می دهد که تأثیرات جدایش جریان در سرعت های یکسان با حالت دیواره لغزشی در دامنه های مختلف بر محاسبه ضریب جرم افزوده شدید بوده و با حذف اثرات فوق، محاسبه ضرایب جرم افزوده عرضی با دقت بالایی امکان پذیر است.

۸-۲- بررسی تأثیر تغییرات سرعت حرکت در استخراج ضریب آزمایش سووی خالص

ضرایب هیدرو دینامیکی برای سرعت 1 تا 4 متر بر ثانیه استخراج شده است. در جدول ۷، نتایج حاصل از شبیه سازی ها برای سرعت های مختلف آزمایش سووی ارائه شده است. در نمودار ۱ نتایج جرم افزوده نیرویی آزمایش سووی خالص و خطای مقادیر حاصل نسبت به روش تئوری نشان داده شده است.

دامنه حرکت با توجه به نتایج مرحله قبل $0.1L$ و فرکانس 0.2 هرتز در نظر گرفته شده است. مشاهده می شود که مقدار خطای حاصل با افزایش سرعت از 1 به 4 متر بر ثانیه افزایش یافته است. با توجه به نتایج بخش قبل، دلایل آن را می توان تأثیر بیشتر لایه مرزی و پدیده جدایش جریان دانست که با افزایش سرعت، سهم آنها در محاسبات بیشتر شده و در نتیجه احتمال انحراف از مقدار تئوری بیشتر می شود. با بررسی منحنی خطا مشاهده می شود که شیب منحنی با افزایش سرعت رو به کاهش است و می توان نتیجه گرفت، اگرچه مقدار خطا با افزایش سرعت افزایش یافته است اما مقدار اختلاف خطا در هر مرحله نسبت به مرحله قبل روند کاهش را نشان می دهد. به عبارت دیگر به اختصار $\Delta E_{V_1-2} < \Delta E_{V_2-3} < \Delta E_{V_3-4}$ است و می توان انتظار داشت این روند نزولی در سرعت های بالاتر نیز وجود داشته باشد.

۹- شبیه‌سازی آزمایش یاو خالص

در این بخش تاثیر دامنه حرکت و سرعت حرکت روی نتیجه محاسبات ممان جرم‌افزوده آزمایش یاو مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور جسم مغروق با چهار دامنه مختلف و در چهار سرعت ۱ تا ۴ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۹ بررسی تاثیر دامنه حرکت در استخراج ضرایب آزمایش یاو

خالص

تاثیر ابعاد دامنه حرکت در شبیه‌سازی آزمایش یاو، در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۸ نتایج حاصل از شبیه‌سازی آزمایش پیور یاو در دامنه‌های حرکتی مختلف در سرعت ۱ متر بر ثانیه و فرکانس ۰/۲ هرتز و در جدول ۹ خطای شبیه‌سازی‌ها برای دامنه‌های حرکتی مختلف در آزمایش یاو خالص، ارائه شده است. مقدار $N'_r(\text{Theory}) = -0/011$ است. خطا با استفاده از رابطه (۵۱) محاسبه می‌شود.

$$E(\%) = \left| \frac{[N'_r(\text{CFD}) - N'_r(\text{Theory})]}{N'_r(\text{Theory})} \right| \times 100 \quad (51)$$

جدول ۸ نتایج شبیه‌سازی‌ها برای دامنه‌های حرکتی مختلف در آزمایش یاو خالص

دامنه حرکت (m)	Y'_r (CFD)	Y'_r (CFD)	N'_r (CFD)	N'_r (CFD)
۰/۱L	۰/۰۰۰۶۲۵۷۴۵	-۰/۰۰۰۴۰۶۳۰۲	-۰/۰۰۱۱۹۳۲۹۸	-۰/۰۰۱۵۴۳۷۳۲
۰/۲L	۰/۰۰۰۴۶۷۲۳۵	-۰/۰۰۰۷۸۰۲۱۶	-۰/۰۰۱۲۱۴۶۰۹	-۰/۰۰۱۳۶۶۱۷۹
۰/۳L	۰/۰۰۰۶۵۰۸۱۸	-۰/۰۰۰۲۳۱۲۴۷	-۰/۰۰۱۲۶۹۲۹۴	-۰/۰۰۱۱۷۵۴۸۳
۰/۴L	۰/۰۰۱۰۱۲۶۲۳	-۰/۰۰۰۱۹۰۸۰۷	-۰/۰۰۱۴۹۴۹۲۴	-۰/۰۰۱۳۱۱۵۷۳
تئوری	-	-	-۰/۰۰۱۱	-

جدول ۹ خطای شبیه‌سازی‌ها برای دامنه‌های حرکتی مختلف در آزمایش یاو خالص

دامنه حرکت (m)	ψ_0 (rad)	N'_r (CFD)	E (%)
۰/۱L	۰/۰۱۵۰۷۲	-۰/۰۰۱۱۹۳۲۹۸	۸/۴۸۱۶۲۰۰۷
۰/۲L	۰/۰۳۰۱۴۴	-۰/۰۰۱۲۱۴۶۰۹	۱۰/۴۱۹۰۰۴۷۱
۰/۳L	۰/۰۴۵۲۱۶	-۰/۰۰۱۲۶۹۲۹۴	۱۵/۳۹۰۳۶۸۶۹
۰/۴L	۰/۱۵۲۳۰	-۰/۰۰۱۴۹۴۹۲۴	۳۵/۹۰۲۱۴۷۰۹

مشاهده می‌شود که همچون آزمایش سووی خالص، در آزمایش یاو خالص نیز با افزایش دامنه حرکت و افزایش دامنه نوسانات زاویه‌ای $\psi_0 = \frac{a_0 \omega}{U_0}$ بر اثر افزایش دامنه حرکت، میزان خطای نتایج افزایش یافته است.

برای بررسی تاثیر ویسکوزیته و جدایش جریان، شرط مرزی دیواره لغزان روی دیواره شناور در شبیه‌سازی به‌کار گرفته شد. نتایج برای دو حالت کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین دامنه حرکت بررسی شد که در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰ خطای شبیه‌سازی برای دامنه‌های حرکتی مختلف در آزمایش سووی خالص با شرط مرزی دیواره لغزان

دامنه حرکت (m)	ψ_0 (rad)	N'_r (CFD)	E (%)
۰/۱L	۰/۰۱۵۰۷۲	-۰/۰۰۱۱۹۳۲۹۸	۸/۲۱۷۳۲۲۷۵۳
۰/۴L	۰/۱۵۲۳۰	-۰/۰۰۱۴۹۴۹۲۴	۳۳/۹۰۰۰۶۶۷۱۵

همچنین مقدار قدر مطلق نیروی جرم‌افزوده سووی (Y'_v) با افزایش سرعت افزایش یافته است. روابط (۴۹) و (۵۰) به‌ترتیب روابط بین مقدار خطا و تغییر خطا (ΔE) را با تغییرات سرعت نشان می‌دهند.

$$E = -0.0909U^3 + 0.1898U^2 + 3.1295U - 2.6924 \quad (49)$$

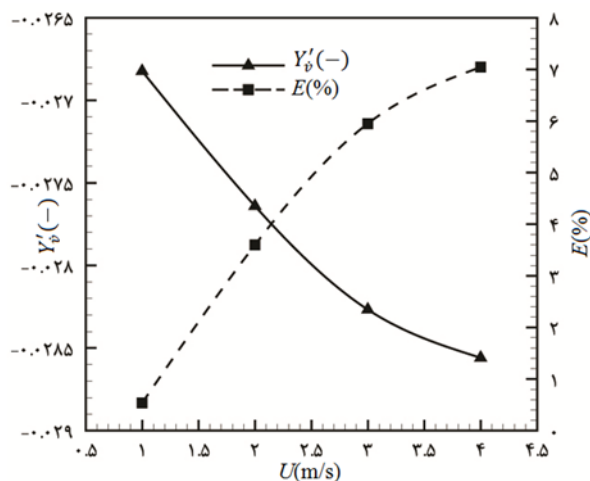
$$\Delta E = -0.2727U^2 + 0.6523U + 2.8488 \quad (50)$$

با توجه به روابط فوق مشخص می‌شود که تابع E در سرعت $U = 7/1103$ دارای نقطه اکستریم است. همچنین مقدار تابع ΔE در سرعت $U = 4/6231$ به مقدار صفر می‌رسد. بنابراین با افزایش سرعت، تغییرات کوچک بوده و می‌توان انتظار داشت با افزایش سرعت تغییر قابل توجهی در نتایج مشاهده نشود.

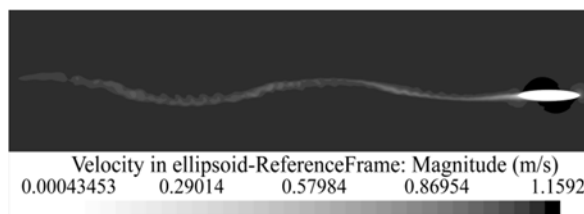
دستیابی به مقدار باقی‌مانده تعریف‌شده (کمتر از 10°) در سیکل‌های زمانی حل جریان، با سرعت بیشتر وسیله در مدت زمان بیشتر حاصل شد، که بالتبع آن مدت زمان حل نیز افزایش یافت. در شکل ۸ تغییرات الگوی میدان سرعت اطراف جسم با گذشت زمان در شبیه‌سازی آزمایش سووی، نشان داده شده است.

جدول ۷ نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها برای سرعت‌های مختلف آزمایش سووی

سرعت (m/s)	Y'_v (CFD)	Y'_v (CFD)	N'_v (CFD)	N'_v (CFD)
۱	-۰/۰۲۶۵۳۷۰۰۵	-۰/۰۱۲۴۹۴۰۱۰	-۰/۰۰۰۲۸۷۵۰۱	۰/۰۲۲۰۲۹۴۳۱
۲	-۰/۰۲۷۶۴۰۰۳۲	-۰/۰۱۰۵۱۳۲۰۸	-۰/۰۰۰۲۷۵۴۶۶	۰/۰۲۱۵۴۴۸۴۵
۳	-۰/۰۲۸۲۶۷۱۹۸	-۰/۰۰۷۰۰۸۸۰۵	-۰/۰۰۱۷۲۲۵۵۶	۰/۰۲۱۶۵۵۰۹۵
۴	-۰/۰۲۸۵۵۸۹۱۰	-۰/۰۰۹۷۹۳۲۵۱	-۰/۰۰۰۱۴۱۱۵	۰/۰۲۱۶۷۵۶۰۷
تئوری	-۰/۰۲۶۶۸	-	-	-



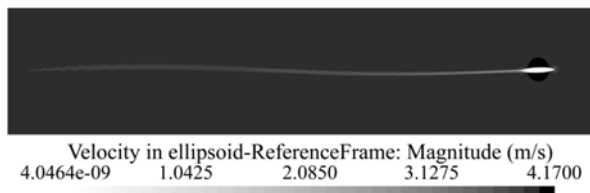
نمودار ۱ نتایج نیروی جرم‌افزوده آزمایش سووی خالص و مقدار اختلاف آن با روش تئوری در سرعت‌های مختلف



شکل ۸ میدان سرعت اطراف بیضی‌گون در آزمایش سووی خالص

با توجه به روابط فوق مشخص می‌شود که تابع E همچنین مقدار تابع ΔE با افزایش سرعت افزایش یافته و بنابراین نمی‌توان انتظار داشت که با افزایش سرعت در یک فرکانس و دامنه ثابت احتمال همگرایی در نتایج وجود داشته باشد.

استخراج مقدار ممان جرم افزوده به مقدار دامنه نوسانات زاویه‌ای $\psi_0 = \frac{a_0 \omega}{U_0}$ وابسته است. با افزایش سرعت، مقدار دامنه نوسانات زاویه‌ای کاهش می‌یابد. اما برخلاف نتایج بخش قبل که با کاهش دامنه و کاهش دامنه نوسانات زاویه‌ای، مقدار نتایج به مقدار تئوری نزدیک می‌شد، در این مرحله با کاهش دامنه نوسانات زاویه‌ای بر اثر افزایش سرعت روند معکوس را شاهد هستیم. بنابراین، علاوه بر اینکه این موضوع نشان‌دهنده اهمیت بررسی مجزای پارامترهای دخیل در شبیه‌سازی‌های استخراج ضرایب است، نشان‌دهنده پیچیدگی ارتباط بین پارامترها با افزایش سرعت در شبیه‌سازی آزمایش یاو نیز است. در شکل ۹ تغییرات الگوی میدان سرعت اطراف جسم با زمان در شبیه‌سازی آزمایش یاو در سرعت ۴ متر بر ثانیه، نشان داده شده است.



شکل ۹) میدان سرعت اطراف بیضی‌گون در آزمایش یاو خالص

۱۰- بحث و نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی عددی آزمایشات پی‌ام‌ام و محاسبه ضرایب یک بیضی‌گون با محوریت دامنه حرکت و سرعت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده آن است که:

۱- روش ابداعی به‌کارگرفته‌شده برای محاسبه هم‌زمان ضرایب جرم‌افزوده و دمپینگ در مقایسه با نتایج تئوری و آزمایشگاهی دقت مناسبی را نشان می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان ابزاری جهت محاسبه این ضرایب با صرف زمان و هزینه محاسباتی کمتر مورد استفاده قرار گیرد.

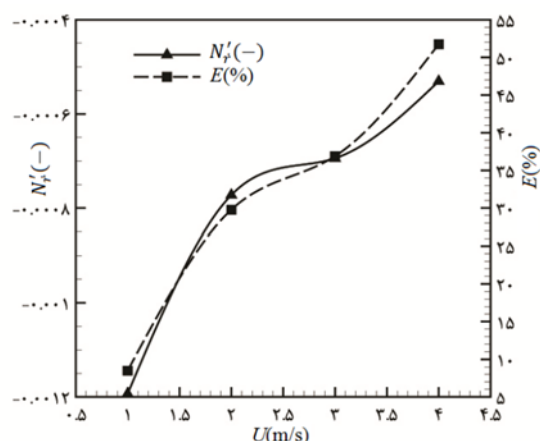
۲- در هر دو آزمایش یاو خالص و سووی خالص (در دامنه حرکتی کوچک‌تر یعنی $0.1L$)، نتایج دقت بهتری را در نشان می‌دهد و با افزایش دامنه به مقدار $0.1L$ خطای نتایج به‌طور چشمگیری افزایش پیدا می‌کند.

۳- جهت بررسی تاثیر ویسکوزیته و جدایش جریان بر ضرایب جرم‌افزوده آزمایشات سرچ، سووی و یاو خالص بدنه با شرط مرزی دیواره لغزان در نظر گرفته شد که نتایج نشان‌دهنده آن است که برای حرکات خطی (سرچ و سووی) ویسکوزیته و جدایش تاثیر قابل توجهی دارد که با در نظر گرفتن شرط مرزی فوق، مقدار جرم‌افزوده با دقت بالایی قابل محاسبه است. اما در مورد حرکات زاویه‌ای (یاو) تاثیر چشمگیری حاصل نشد و باید سایر پارامترهای دخیل در

با توجه به نتایج مشخص می‌شود که وابستگی نتایج جرم‌افزوده حرکت یاو به ویسکوزیته و جدایش جریان کوچک است و باید جهت بهبود نتایج، وابستگی نتایج به ارتباط بین دامنه، فرکانس، سرعت و دامنه نوسانات زاویه‌ای بررسی شود. در بخش بعدی با ثابت‌گرفته‌شدن سایر پارامترها تاثیر سرعت بر نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۹- بررسی سرعت در استخراج ضرایب آزمایش یاو خالص

در نمودار ۲ نتایج به‌دست‌آمده از سرعت ۱ تا ۴ متر بر ثانیه ارائه شده و در جدول ۱۱ نتایج کامل شبیه‌سازی آزمایش یاو در سرعت‌های مختلف ارائه شده است.



نمودار ۲) نتایج ممان جرم‌افزوده آزمایش یاو خالص و مقدار خطای آن‌ها با روش تئوری در سرعت‌های مختلف

جدول ۱۱) نتایج شبیه‌سازی‌ها برای سرعت‌های مختلف در آزمایش یاو خالص

سرعت (m/s)	N'_r (CFD)	N'_r (CFD)	Y'_r (CFD)	Y'_r (CFD)
۱	-۰/۰۰۱۵۴۳۷۳۲	-۰/۰۰۱۱۹۳۲۹۸	-۰/۰۰۰۴۰۶۳۰۲	۰/۰۰۰۶۲۵۷۴۵
۲	-۰/۰۰۰۷۳۶۳۱۸	-۰/۰۰۰۷۷۲۳۷۲	-۰/۰۰۱۸۷۹۱۳۷	۰/۰۰۱۲۲۶۲۷۹
۳	-۰/۰۰۰۵۰۸۲۹۸	-۰/۰۰۰۶۹۴۲۳۴	-۰/۰۰۲۸۶۰۹۵۵	۰/۰۰۱۷۱۹۸۶۴
۴	-۰/۰۰۰۳۵۷۳۴۰	-۰/۰۰۰۵۳۰۶۹۵	-۰/۰۰۳۶۳۵۶۹۵	۰/۰۰۲۷۵۸۶۷۹
تئوری	-	-۰/۰۰۱۱	-	-

مشاهده می‌شود که همچون آزمایش سووی خالص در آزمایش یاو نیز با افزایش سرعت، خطا افزایش یافته است. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت، مقدار شیب منحنی خطا افزایش می‌یابد و برخلاف نتایج شبیه‌سازی در آزمایش سووی که میزان خطا در محدوده قابل قبول قرار داشت، در شبیه‌سازی آزمایش یاو با افزایش سرعت به بیش از ۲/۱ متر بر ثانیه میزان خطا بیش از ۱۰ درصد و در سرعت ۴ نات به بیش از ۵۰ درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین مقدار قدر مطلق ممان جرم‌افزوده یاو (N'_r) با افزایش سرعت کاهش یافته است. روابط (۵۲) و (۵۳) به‌ترتیب روابط بین مقدار خطا و تغییر خطا را با تغییرات سرعت نشان می‌دهند.

$$E = 3.6605U^3 - 29.063U^2 + 82.867U - 48.983 \quad (52)$$

$$\Delta E = 10.982U^2 - 69.107U + 115.59 \quad (53)$$

تعارض منافع: در این مقاله تعارض منافع با هیچ شخصیت حقوقی و حقیقی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: سجاد اردشیری (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۷۰٪)؛ سیدحسین موسوی‌زادگان (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۱۵٪)؛ سعید خردمند (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۱۵٪)

منابع مالی: موردی ذکر نشده است.

منابع

- 1- Abkowitz MA. Stability and motion control of ocean vessels. Cambridge: MIT Press; 1969.
- 2- Zhang H, Xu YR, Cai HP. Using CFD software to calculate hydrodynamic coefficients. Journal of Marine Science and Application. 2010;9(2):149-155.
- 3- Nazir Z, Su YM, Wang ZL. A CFD based investigation of the unsteady hydrodynamic coefficients of 3-D fins in viscous flow. Journal of Marine Science and Application. 2010;9(3):250-255.
- 4- Pan YC, Zhang HX, Zhou QD. Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation. Journal of Hydrodynamics, Ser. B. 2012;24(6):840-847.
- 5- Xu F, Zou ZJ, Yin JC, Cao J. Parametric identification and sensitivity analysis for autonomous underwater vehicles in diving plane. Journal of Hydrodynamics. 2012;24(5):744-751.
- 6- Mansoorzadeh Sh, Pishavar AR, Javanmard E. Numerical investigation of dynamic stability of an AUV. Fluid Mechanic and Aerodynamic. 2013;2(1):69-81. [Persian]
- 7- Pan YC, Zhou QD, Zhang HX. Numerical simulation of rotating arm test for prediction of submarine rotary derivatives. Journal of Hydrodynamics. 2015;27(1):68-75.
- 8- Javanmard E, Mansoorzadeh Sh, Pishavar AR. A numerical and experimental investigation of effect of control surface angle on an autonomous underwater vehicle drag. Modares Mechanical Engineering. 2015;14(16):358-366. [Persian]
- 9- Nouri NM, Mostafapour K, Habibi Sooha Y, Hassanpour SH. Investigation of hydrodynamic derivatives of an AUV based on the water tunnel testing maneuvers. Journal of Marine Engineering. 2017;13(25):67-75. [Persian]
- 10- Hajivand A, Hasani M, Babaie M, Sadeghian M. Calculation of AUV hydrodynamic coefficients using computational fluid dynamic. Journal of Marine Technology. 2016;3(1):36-46. [Persian]
- 11- Shojaeefard MH, Khorampanahi A, Mirzaei M. Numerical investigation of oscillation frequency and amplitude effects on the hydrodynamic coefficients of a body with NACA0012 hydrofoil section. Journal of Mechanical Science and Technology. 2017;31(5):2251-2260.
- 12- Constantinescu GS, Pasinato H, Wang YQ, Forsythe JR, Squires KD. Numerical investigation of flow past a prolate spheroid. Journal of Fluids Engineering. 2002;124(4):904-910.
- 13- Fossen TI, Sagatun SI. Adaptive control of nonlinear systems: A case study of underwater robotic systems. Journal of Robotic Systems. 1991;8(3):393-412.

شبیه‌سازی (دامنه، فرکانس، سرعت و دامنه نوسانات زاویه‌ای) مورد بررسی قرار گیرند.

۴- نتایج نشان‌دهنده آن است که با در نظر گرفتن دامنه بین ۱ تا ۲L می‌توان ضرایب جرم افزوده و دمپینگ حرکت سرج را با دقت قابل قبول و به‌طور هم‌زمان محاسبه نمود. با استفاده از شرط مرزی دیوار لغزنده، محاسبه جرم‌افزوده حرکت سرج از دقت بیشتری برخوردار است.

۵- با توجه به اینکه سطح مقطع مقابل جریان در حرکت سرج کوچک‌تر از حرکت سووی است محاسبات نشان می‌دهد تاثیر جدایش و در نتیجه خطا در شبیه‌سازی حرکت سرج، کمتر از حرکت سووی است.

۶- در مورد تاثیر سرعت نیز با توجه به اینکه عموماً محدوده طراحی ای‌یووی‌ها در محدوده ۱ تا ۴ متر بر ثانیه قرار دارد، شبیه‌سازی‌ها در سرعت ۱ تا ۴ متر بر ثانیه برای آزمایشات سووی خالص و یاو خالص انجام شد و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده آن است که با افزایش سرعت در شبیه‌سازی‌ها، نیاز به تعداد مش بیشتر وجود دارد که در نتیجه افزایش زمان محاسبات را در پی خواهد داشت. ضمن اینکه خطای نتایج عددی نسبت به مقادیر تحلیلی افزایش پیدا می‌کند.

۷- با بررسی پارامتر دامنه نوسانات زاویه‌ای ψ_0 در شبیه‌سازی آزمایش یاو، مشخص شد که با کاهش دامنه حرکت و کاهش مقدار دامنه نوسانات زاویه‌ای بر اثر آن، مقادیر عددی به مقدار تئوری نزدیک می‌شود؛ اما با افزایش سرعت و کاهش مقدار دامنه نوسانات زاویه‌ای، مقادیر عددی محاسبه‌شده دارای خطای بیشتری نسبت به مقدار تئوری هستند. این موضوع علاوه بر اینکه نشان می‌دهد بررسی مجزای پارامترهای دخیل در شبیه‌سازی‌های استخراج ضرایب حائز اهمیت است، نشان‌دهنده آن است که با افزایش سرعت حرکت جسم تعیین پارامترهای دخیل در استخراج ضرایب جرم‌افزوده از پیچیدگی زیادی برخوردار است.

۸- مقدار قدر مطلق نیروی جرم‌افزوده سووی (Y_p') با افزایش سرعت افزایش یافته، درحالی که مقدار قدر مطلق ممان جرم‌افزوده یاو (N_p') با افزایش سرعت کاهش یافته است.

۹- می‌توان نتیجه گرفت در سرعت‌های کمتر و دامنه‌های حرکت کوچک‌تر با صرف مدت زمان کمتر و هزینه محاسباتی کمتر، نتایج دقیق‌تری (در مقایسه با مقادیر تئوری) از روش دینامیک سیالات محاسباتی برای جرم‌افزوده شناورهای زیرسطحی محاسبه کرد. همچنین استفاده از شرط دیواره لغزان و حذف اثر جدایش برای حرکات خطی دقت نتایج جرم‌افزوده را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

تشکر و قدردانی: موردی ذکر نشده است.

تاییدیه اخلاقی: این نتایج حاصل پژوهش نویسندگان بوده و تا کنون در نشریه یا مجموعه مقالات کنفرانس دیگری چاپ نشده و در دست بررسی نیز نیست.

- 19- Shih TH, Liou WW, Shabbir A, Yang Z, Zhu J. A new k-epsilon eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows: Model development and validation. *Computers & Fluids*. 1995;24(3):227-238.
- 20- Launder BE, Spalding DB. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1974;3(2):269-289.
- 21- Roache PJ. Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies. *Journal of Fluids Engineering*. 1994;116(3):405-413.
- 22- Roache PJ. Verification of codes and calculations. *AIAA Journal*. 1998;36(5):696-702.
- 23- Roache PJ. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1997;29(1):123-160.
- 24- Andersson HI, Jiang F. Forces and torques on a prolate spheroid: Low-Reynolds-number and attack angle effects. *Acta Mechanica*. 2019;230(2):431-447.
- 14- Fossen TI, Fjellstad O. Nonlinear modelling of marine vehicles in 6 degrees of freedom. *International Journal of Mathematical Modeling of Systems*. 1995;1(1):17-27.
- 15- Goodman A. Experimental techniques and methods of analysis used in submerged body research. The 3rd Symposium on Naval Hydrodynamics, 1960 September 17-24, Scheveningen. Washington: National Academy Press; 1960. pp. 379-449.
- 16- Gertler M. The DTMB planar- motion-mechanism system (PMM). Zagreb: Defense Technical Information Center; 1967.
- 17- Sen DT, Vinh TC. Determination of added mass and inertia moment of marine ships moving in 6 degrees of freedom. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*. 2016;2(1):8-14.
- 18- Lamb H. *Hydrodynamics*. 6th Edition. New York: Dover Publications; 1945.