

بررسی عددی اثر فاصله سطوح کنترلی از بدن بر مقادیر تعدادی از ضرایب هیدرودینامیکی خطی مانور زیرسطحی معیار سابوف

علیرضا پازن^۱, امین نجفی^۲, علی اصغر مقدس آهنگری^{۳*}

^۱ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک-گرایش مهندسی دریا، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، alirezapazhan@yahoo.com

^۲ عضو هیات علمی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، Najafi.sharif@yahoo.com

^۳ عضو هیات علمی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، Moghaddas@aut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

با توسعه روزافزون زیرسطحی‌های بدون سرنشین، محاسبه دقیق ضرایب هیدرودینامیکی موجود در معادلات حرکت این زیرسطحی‌ها برای پیش‌بینی مانورپذیری، پایداری دینامیکی و طراحی کنترلر زیرسطحی اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از پارامترهای موثر در عدم قطعیت نتایج حاصل از روابط رگرسیونی برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی، فاصله سطوح کنترلی از بدن است. در این مقاله به منظور بررسی اثر فاصله از بدن بر تعدادی از ضرایب هیدرودینامیکی خطی مانور، تحلیل عددی بر روی بدن زیرسطحی معیار سابوف انجام شده و ضرایب میرایی و جرم افزوده با استفاده از آزمون‌های استاتیکی و دینامیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. فاصله عمودی سطوح کنترلی از بدن به عنوان متغیر در نظر گرفته شده و تحلیل در چندین فاصله سطوح کنترلی از بدن انجام شده است. نتایج عددی پس از تطبیق با نتایج آزمایشگاهی، نشان داد که ضرایب هیدرودینامیکی از فاصله بیش از ۰/۰۶ متر، مستقل از فاصله بین بدن و سطوح کنترلی می‌شوند. همچنین در تست دریفت استاتیکی با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدن، ضریب هیدرودینامیکی مربوط به نیروی سوی افزایش و ضریب هیدرودینامیکی مربوط به گشتاور یاو در ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۴

کلمات کلیدی:

ضرایب هیدرودینامیکی خطی

فاصله از بدن

شبیه‌سازی عددی

تست دریفت استاتیکی

تست سوی خالص

Numerical investigation of the effect of clearance between control surfaces and body on some linear maneuvering hydrodynamic coefficients of suboff benchmark model

AliReza Pazhan^۱, Amin Najafi^۲, AliAsghar Moghaddas^{۳*}

^۱ MSc in mechanical engineering, Imam Hossein Comprehensive University; alirezapazhan@yahoo.com

^۲ Academic Sttaf, Imam Hossein Comprehensive University; Najafi.sharif@yahoo.com

^۳ Academic Sttaf, Imam Hossein Comprehensive University; Moghaddas@aut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:

Received 15 Apr 2024

Accepted 29 Jun 2024

Available online 04 Jul 2024

Keywords:

Linear hydrodynamic coefficients

Clearance

Numerical simulation

Static drift test

pure sway test

ABSTRACT

With the development of AUVs, accurate calculation of hydrodynamic coefficients in the equations of motion of these vehicles increased significantly, and accurate calculation of hydrodynamic coefficients for predicting maneuverability, dynamic stability, and controller design is of particular importance. One of the effective parameters in the uncertainty of the results obtained from the regression methods for calculating the hydrodynamic coefficients is the clearance between the control surfaces and the body. In this article, to investigate the effect of the clearance on some linear hydrodynamic coefficients of the maneuver, a numerical analysis has been performed on the Suboff benchmark model, and the damping and added mass coefficients have been studied using static and dynamic tests. The vertical clearance of the control surfaces from the body is considered a variable and the analysis has been done at several clearance from the body. The numerical results, after validating with the model results,

showed that the hydrodynamic coefficients become independent of the distance between the body and the control surfaces from the distance of 0.06 meters. Also, in the static drift test, with the increase in the clearance of the control surfaces from the body, the hydrodynamic coefficient related to the sway force and the hydrodynamic coefficient related to the yaw moment decrease. However, in the pure sway test, with the increase in the clearance, the hydrodynamic coefficient related to the sway force decreases, and the hydrodynamic coefficient related to the yaw moment first decreases and then increases.

(PMM) نیاز است. بسیاری از محققان از تکنیک مش پویا برای شبیه‌سازی تست‌های PMM و تخمین ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی استفاده کردند [3], [13]-[16]. فیلیپس^۴ و همکارانش [17] در سال ۲۰۰۷ روش دینامیک سیالات محاسباتی قوی ای برای شبیه‌سازی‌های آزمایش مکانیزم حرکت صفحه‌ای توسعه داده‌اند. حرکت سوی خالص برای مدل اتوساب شبیه‌سازی شد. ضرایب نیروی یاو و ضرایب گشتاور یاو محاسبه شده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی با داده‌های تجربی مقایسه شدند که خطای ضرایب زیر ۲۶ درصد را نشان دادند. موسوی زادگان و همکاران [18] در سال ۲۰۱۷ به بررسی اثر فرم هندسی دُم بر روی مانور پذیری شناور زیرسطحی هوشمند پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش طول دم، ضرایب هیدرودینامیکی میرایی و جرم افزوده، کاهش و شعاع دایره چرخش و مانور پذیری به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. یازینگ وانگ^۵ و همکاران [19] در سال ۲۰۱۹ در مقاله‌ای یک روش بهینه‌سازی آرایش برای ملحقات یک AUV بر اساس مدل تقریب کریجینگ و الگوریتم ژنتیک چند جزیره ارائه کردند. نتایج بهینه‌سازی شان می‌دهد که تأثیر ملحقات بر عملکرد هیدرودینامیکی به طور مستقیم با لندازه آن متناسب است و یک آرایش توزیع شده برای کاهش درگ سودمند است. همچنین دیگر نتایج این پژوهه این بود که محل اولین زائد باید تاحدامکان دورتر از دماغه بدنه قرار گیرد تا از ایجاد تلاطم جلوگیری گردد و بزرگ‌ترین زائد همیشه باید در ابتدای AUV در نظر گرفته شود.

جريان در منطقه پاشنیه زیردریایی بسیار حائز اهمیت است و در نتیجه قرار گرفتن بالک‌های انتهایی در منطقه مذکور بر پیچیدگی جريان در این منطقه افزوده و باعث کاهش عملکرد و افزایش نویز پروانه می‌شود. همچنین مقدار ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی ممکن است به محل قرارگیری بالک‌های انتهایی بستگی داشته باشد. مكان قرارگیری و اندازه بالک‌های انتهایی بر روی پاشنیه در طرح‌های مختلف زیرسطحی ثابت نبوده و امکان تغییر این پارامترها بر روی بدنه را دارند. با تغییر مكان و اندازه بالک‌های انتهایی بر روی بدنه زیردریایی اندازه لایه مرزی برخورد کننده به

۱ - مقدمه

زیردریایی‌های نظامی هسته‌ای و دیزل الکتریک در عمق‌های مختلف و حتی در مجاورت کف دریا حرکت می‌کنند [1] و [2]. حرکت این زیردریایی‌ها در نزدیک بستر دریا ضرورت طراحی کنترل دقیق برای آن‌ها افزایش می‌دهد. همچنین توسعه روز افزون زیرسطحی‌های هوشمند و کنترل از راه دور نیز ضرورت محاسبه دقیق ضرائب هیدرودینامیکی مانور را جهت طراحی کنترلهای دقیق بیشتر نموده است. برای تعیین ضرائب هیدرودینامیکی مانور، روش‌های مختلفی وجود دارد که عبارتند از: روش آزمایشگاهی، روش عددی و استفاده از روابط تجربی (رگرسیونی).

هرچند روش رگرسیونی نتایج را به دقت روش تجربی یا عددی در اختیار قرار نمی‌دهد اما ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش در مراحل ابتدایی طراحی می‌باشد که اگر بتوان نتایج حاصل از این روش را دقیق‌تر نمود می‌توان هزینه محاسبات ضرایب رگرسیونی را کاهش داد. یکی از عوامل عدم قطعیت استفاده از این ضرایب، محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بدنه با بالک به صورت اصل برهم نهی (جمع جبری) است. بدین معنا که ضرایب بدنه و سطوح کنترلی به صورت مجزا با روابط رگرسیونی مخصوص به خود محاسبه شده و ضریب کل برابر با جمع جبری این دو مقادیر خواهد بود. در این مقاله اثر فاصله بر روی تعدادی از ضرایب هیدرودینامیکی خطی مانور زیرسطحی معیار سابوف مورد بررسی قرار گرفته است.

محققان همواره سعی داشته‌اند جهت دستیابی به مقدار دقیق این ضرایب از روش‌های مختلفی استفاده کنند. روش‌های عددی، آزمایشگاهی و رگرسیونی از جمله این روش‌ها هستند. اهموری^۱ [3]، هوچبوم^۲ [4] و آلساندرینی^۳ [5] از افراد پیش‌گامی هستند که از ابزارهای عددی برای این منظور استفاده کرdenد. شبیه‌سازی‌های عددی تست‌های مانور توسط محققان مختلفی انجام شده است [6]-[12]. برای شبیه‌سازی تست‌های دینامیکی استاندارد، استفاده از تکنیک مش دینامیکی برای چارچوب‌های مرجع ثابت بدنه غیراینرسی، مانند مکانیسم حرکت مسطح

¹ Ohmori

² Hochbaum

³ Alessandrini

۲- تعریف مسئله

امروزه محاسبه دقیق ضرایب هیدرودینامیکی به منظور پیش‌بینی قابلیت مانورپذیری، پایداری و کنترل‌پذیری زیرسطحی اهمیت و ضرورت ویژه‌ای یافته است. جونز و همکاران [25] در سال ۲۰۰۲ در پژوهش خود متوجه شدند که مقدار ضرایب هیدرودینامیکی یک زیرسطحی با مجموع ضرایب هیدرودینامیکی بدن و ملحقات آن برابر نیست؛ بنابراین یکی از چالش‌ها در محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی در روش تحلیلی و رگرسیونی، استخراج آن‌ها با استفاده از اصل برهم‌نهی بدن و ملحقات می‌باشد که یکی از دلایل خطای محاسبات نسبت به روش آزمایشگاهی و عددی است. در پژوهش‌های گذشته اثر فاصله سطوح کنترلی از بدن زیرسطحی بر مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی و میزان تغییرات این ضرایب بر اثر تغییرات فاصله عمودی سطوح کنترلی از بدن بررسی نشده است. بنابراین در پژوهش حاضر به بررسی عددی اثر متقابل بین سطوح کنترلی و بدن یک نمونه زیرسطحی بر مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی خطی مانور پرداخته شده است.

۳- معادلات حاکم

۱-۱-۳- معادلات حاکم بر حرکت شناور زیرسطحی

نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدن جسم، تابع سرعت‌ها و شتاب‌های وارد بر جسم است. رابطه بین هر متغیر حرکتی و نیرو یا گشتاور حاصله را می‌توان با کمک یک مدل ریاضی، شامل یک سری از ضرایب، نمایش داد. سپس، نیروها و گشتاورهای ناشی از هر یک از این موارد با هم جمع می‌شوند تا نیرو یا گشتاور وارد بر زیردریایی با استفاده از بسط تیلور حول نقطه کاری وسیله، به دست آید. انتخاب ضرایب و درنتیجه مدل ریاضی مورداستفاده، به تجربه طراح بستگی دارد [26]. در صورتی که تغییرات نیرو نسبت به متغیر مؤثر بر نیرو به صورت خطی قابل تقریب‌زدن باشد، لازم است که بسط تیلور تنها شامل، جمله اول و دوم باشد و مراتب بالاتر جملات در نظر گرفته نمی‌شوند. بسطهای سری تیلور بارهای هیدرودینامیکی کوتاه شده به شرایط خطی به شرح معادلات (۱) تا (۶) است [14]:

$$\begin{aligned} X &= X_u u + X_v v + X_p p + X_q q + X_r r \\ &+ X_{\dot{u}} \dot{u} + X_{\dot{v}} \dot{v} + X_{\dot{w}} \dot{w} + X_{\dot{p}} \dot{p} + X_{\dot{q}} \dot{q} + X_{\dot{r}} \dot{r} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Y &= Y_u u + Y_v v + Y_p p + Y_q q + Y_r r \\ &+ Y_{\dot{u}} \dot{u} + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{w}} \dot{w} + Y_{\dot{p}} \dot{p} + Y_{\dot{q}} \dot{q} + Y_{\dot{r}} \dot{r} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Z &= Z_u u + Z_v v + Z_p p + Z_q q + Z_r r \\ &+ Z_{\dot{u}} \dot{u} + Z_{\dot{v}} \dot{v} + Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_{\dot{p}} \dot{p} + Z_{\dot{q}} \dot{q} + Z_{\dot{r}} \dot{r} \end{aligned} \quad (3)$$

$$K = K_u u + K_v v + K_p p + K_q q + K_r r \quad (4)$$

آن‌ها تغییر می‌کند، در نتیجه جریان دنباله نیز به دنبال آن تغییر خواهد کرد؛ لذا در پژوهش‌های مختلف به بررسی محل قرارگیری و اندازه بالکهای انتهایی شناور زیرسطحی پرداخته شده است. در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی [20] به بررسی انواع بالکهای مختلف به منظور پیش‌بینی مانورپذیری و محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی میرایی وابسته به سرعت شناور زیرسطحی هوشمند (AUV) پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که ضرایب میرایی وابسته به سرعت عرضی خطی تحت تأثیر حضور این بالکهای قرار می‌گیرند. این اثر تقریباً برای همه نوع سطوح کنترلی یکسان است و ضخامت سطوح کنترلی تأثیر قابل توجهی ندارد. در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۷ موسوی‌زادگان و شریعتی [21] به بررسی اثر ملحقات بر روی مقاومت شناور زیرسطحی سابوف پرداختند. ابتدا زیرسطحی سابوف بدون ملحقات انتخاب شده و پارامترهای هیدرودینامیکی شامل مقاومت اصطکاکی، مقاومت ویسکوز فشاری و مقاومت موج‌سازی ایجاد شده روی سطح آزاد برای اعداد فرود در محدوده ۰/۸۴ تا ۰/۱۲۸ در اعمق مختلف نزدیک به سطح محاسبه شد. سپس با اضافه کردن ملحقات و مقایسه این دو حالت، اثر ملحقات به دست آمد. نتایج محاسبات نشان داد که ملحقات باعث افزایش میانگین حدود ۱۶ درصدی در مقاومت کل می‌شوند. این افزایش به دلیل ویسکوزیته سیال و همچنین برهمکنش بدن اصلی با ملحقات می‌باشد. در پژوهشی در سال ۲۰۲۱ [22] به بررسی اثر محل قرارگیری بالکهای انتهایی بر روی جریان دنباله ورودی به پرونله مدل زیرسطحی پرداخته شد. در این پژوهش بالکهای مذکور در سه موقعیت طولی مختلف در پاشنه زیرسطحی نصب شدند. در پایان این بررسی‌ها موقعیت طولی $L = 0.95/x$ به عنوان مکان بهینه برای قرارگیری بالکهای انتهایی به منظور بهبود جریان دنباله ورودی به پرونله از نظر کاهش مساحت کلی و نیز کمترین میزان اغتشاشات و غیرکنواختی انتخاب شده است. در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۲۱ سیف و حسنوند [23] با استفاده از نرم افزار matlab برنامه‌ای تهیه کردند که با در نظر گرفتن اطلاعات اولیه‌ی کاربر، طراحی مفهومی کاربردی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. یک از خروجی‌های این برنامه محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی و شبیه سازی مانورهای عملیاتی می‌باشد که براساس الگوریتم‌های طراحی شده سعی گردیده در محدوده مناسب و بهینه قرار داشته باشد. ارتشیری و یاری نیز در پژوهشی در سال ۲۰۲۳ [24] آزمایشات مکانیزم حرکت صفحه‌ای (پی‌ام‌ام)، تست کشش مورب و تست بازوی چرخان را شبیه‌سازی کردند و دقیق نتایج آنها را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. با ترکیب روش‌های فوق محاسبه ضرایب میرایی حرکات سوی با خطای زیر ۸/۵ درصد قابل انجام است. همچنین مقادیر جرم افزوده حرکات سوی با خطای کمتر از ۲۰ درصد قابل انجام است.

U_i و P_i بیانگر مقدار میانگین زمانی می باشند و u_i و p نشان دهنده نوسان سرعت و فشار هستند. با اضافه نمودن تجزیه رینولدز در معادلات ناویر - استوکس معادله متوسطگیری شده رینولدز ناویر - استوکس (RANS⁶) حاصل می شود که معادله مذکور مطابق روابط (۸) و (۹) بیان می گردد.

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho\bar{u}_i\bar{u}_j + \rho\bar{u}'_i\bar{u}'_j) = \frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (8)$$

$$+ \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \\ \frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

عبارت $\bar{u}_i\bar{u}_j$ بیانگر تانسور تنش رینولدز می باشد که اثرات آشفتگی را روی تنش میانگین لحاظ می کند.

۴- مشخصات هندسی مدل

شناور زیرسطحی مورد بررسی، زیرسطحی سابوف می باشد که در موسسه دیوید-تیلور طراحی شده است. آزمایش های هیدرودینامیکی در حوضچه کشش این موسسه انجام شده و ضرایب هیدرودینامیکی این شناور به طریق آزمایشگاهی موجود می باشد. به طور کلی وجود اطلاعات هیدرودینامیکی-آزمایشگاهی این شناور، باعث انتخاب آن در کار حاضر شده است [27]. این فرم بدنه به طور گسترده ای برای بسیاری از تحقیقات، شامل اعتبارسنجی شبیه سازی های CFD استفاده می شود. ابعاد این زیردریایی در جدول ۱ و جدول ۲ و شماتیک آن در شکل ۲ آورده شده است.

جدول ۱ - ابعاد هندسی و مشخصات اصلی زیرسطحی سابوف

مقدار	نماد	کمیت
۴/۳۵۶	L	[m]
۰/۵۰۸	D	[m]
۷۰۵/۹	m	[Kg]

جدول ۲ - برخی از مشخصات سطوح کنترلی سابوف

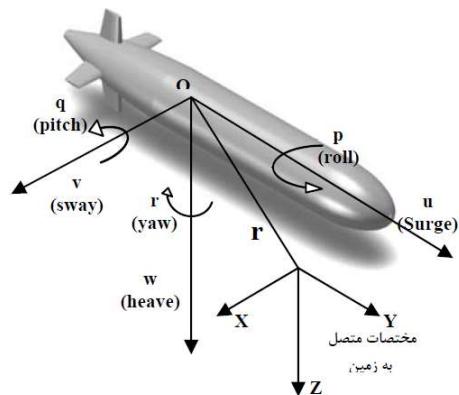
مقدار	کمیت
۰/۱۸۳	طول کوردمتوسط [m]
۰/۱۳۴	طول اسپن [m]
۰/۰۲۴۸	مساحت سطح [m ²]
-۱/۹۰۲	موقعیت طولی از مرکز ثقل [m]

$$+ K_{\dot{u}}\dot{u} + K_{\dot{v}}\dot{v} + K_{\dot{w}}\dot{w} + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{\dot{q}}\dot{q} \\ + K_{\dot{r}}\dot{r}$$

$$M = M_u u + M_v v + M_p p + M_q q + M_r r \\ + M_{\dot{u}}\dot{u} + M_{\dot{v}}\dot{v} + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{p}}\dot{p} + M_{\dot{q}}\dot{q} \\ + M_{\dot{r}}\dot{r} \quad (5)$$

$$N = N_u u + N_v v + N_p p + N_q q + N_r r \\ + N_{\dot{u}}\dot{u} + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{w}}\dot{w} + N_{\dot{p}}\dot{p} + N_{\dot{q}}\dot{q} \\ + N_{\dot{r}}\dot{r} \quad (6)$$

که در آن X , Y و Z به ترتیب نشان دهنده نیروهای سرج، سوی و هیو و M , K , N به ترتیب نشان دهنده گشتاورهای رول، پیچ و یا و هستند. نام حرکت در هر جهت و چارچوب مرجع بدنه ثابت نیز در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱ - دستگاه مختصات متصل به بدنه و متصل به زمین و جهت های آن

۲-۳- معادلات حاکم بر دینامیک سیالات محاسباتی

زمانی که بدنه شناور در داخل سیال آب با سرعت بالا حرکت می کند جریان اطراف بدنه شناور متلاطم می گردد. جریان غیریکنواخت ویسکوز اطراف بدنه یک شناور زیرسطحی توسط معادلات ناویراستوکس مدل می شود. معادلات ناویراستوکس هم برای جریان آرام و هم جریان آشفته کاربرد دارد. برای حل جریان آشفته از معادلات متوسط زمانی ناویراستوکس استفاده می شود. متدائل ترین روش در شبیه سازی جریان های آشفته استفاده از مدل های آشفتگی می باشد در این مدل ها ویژگی های جریان آشفته وابسته به زمان حل نمی گردد. با استفاده از تجزیه رینولدز، سرعت و فشار لحظه ای مطابق روابط (۷) در نظر گرفته می شود.

$$U_i = \bar{U}_i + u_i \quad (7)$$

$$P = \bar{P} + p$$

⁶ Reynolds averaged Navier-Stokes

این آزمایش مدل در یک تانک کشش با زاویه دریفت به اربابه بسته شده و با سرعت پیشروی مدل (عدد فرود شناور و مدل یکسان است) به حرکت در می‌آید. در زوایای دریفت مختلف متناسب با سرعت پیشروی مدل، مدل دارای سرعت در محور z می‌گردد. با توجه به مؤلفه عرضی سرعت، شرایط و معادلات حاکم بر این تست عبارتند از روابط (۱۰) تا (۱۳) :

$$v = V_0 \sin \beta \quad (10)$$

$$X_M = X_0 + X_{vv} \times v^2 + X(u) \quad (11)$$

$$Y_M = Y_0 + Y_v \times v + \begin{cases} Y_{vvv} \times v^3 \\ Y_{v|v|} \times v|v| \end{cases} \quad (12)$$

$$N_M = N_0 + N_v \times v + \begin{cases} N_{vvv} \times v^3 \\ N_{v|v|} \times v|v| \end{cases} \quad (13)$$

مقادیر نیروی Y و گشتاور N که توسط مدل ایجاد شده در هر زاویه β اندازه گرفته می‌شود. مقادیر به صورت یک منحنی و تابعی از v ترسیم می‌گردد. در صورتی که مدل ریاضی مورداستفاده یک مدل خطی باشد، با محاسبه شبیه منحنی‌ها در نقطه $v=0$ ضرایب Y_v و N_v محاسبه می‌گردد.

از آنجایی که در پژوهش حاضر هدف استخراج ضرایب هیدرودینامیکی خطی می‌باشد، ماکریم زاویه دریفت ۶ درجه تنظیم شده است؛ بدین معنی که تست مدل با ۳ زاویه دریفت ۰، ۴ و ۶ درجه انجام می‌گیرد. سناریوهای انجام تست دریفت استاتیکی به شرح جدول ۴ می‌باشد:

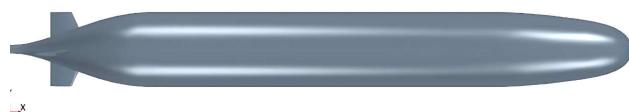
جدول ۴ - سناریوهای انتخاب شده تست دریفت استاتیکی

پارامترهای اندازه‌گیری	سرعت پیشروی	زواياي دريفت	پارامترهای اندازه‌گيری
شونده	(درجه)	(درجه)	(نات)
نیروی عرضی و ممان	۶+	۶	
یاوینگ	۴+	۴/۵	
	۲+		

باتوجه به جدول ۴ و باتوجه به این که در ۴ فاصله سطوح کنترلی از بدنه شبیه سازی صورت می‌گیرد، در مجموع می‌توان گفت که برای تست دریفت استاتیکی ۱۲ شبیه سازی باید انجام بگیرد.

۵-۲- تست دینامیکی (سوی خالص)

در تست سوی خالص، مدل در حالی که با سرعت ثابت در حال حرکت روبه‌جلو می‌باشد، با فرکانس و دامنه مشخص به انجام حرکت سوی می‌پردازد به نحوی که زاویه سر شناور همیشه صفر



شکل ۲ - هندسه زیرسطحی سابوف

در شبیه‌سازی حاضر هندسه این شناور شامل بدنه و چهار سطح کنترلی در پاشنه می‌باشد که شامل دو صفحه افقی^۷ برای کنترل حرکات عمق و دو صفحه عمودی^۸ برای حرکات جانبی می‌باشد.

۵- سناریو تحلیل عددی

از میان تست‌های مختلف انجام شده در منابع مختلف برای بدنه سابوف، تست‌های ذکر شده در جدول ۳ انتخاب گردید. تست‌ها به نحوی انتخاب شدند تا با انجام هر دو نوع تست دینامیکی و استاتیکی، ضرایب هیدرودینامیکی میرایی و جرم افزوده پوشش داده شوند و تعدادی از این ضرایب استخراج شوند.

جدول ۳ - تست‌های انتخاب شده جهت استخراج تعدادی از ضرایب هیدرودینامیکی دمبینگ و جرم افزوده

ردیف	تست	نوع تست	عنوان	ضریب قابل استخراج
			نوع ضریب	ضریب
۱	استاتیکی	دریفت	Y_v	دمپینگ
		استاتیکی	N_v	دمپینگ
۲	سوی خالص	دینامیکی	Y_v	جرم افزوده
		دینامیکی	N_v	جرم افزوده

برای هر دو تست استاتیکی و دینامیکی، بدنه و سطوح کنترلی زیرسطحی سابوف به صورت ترکیبی در چهار فاصله مختلف سطوح کنترلی از بدنه شبیه‌سازی می‌شوند. این فواصل از صفر شروع می‌شوند و مقدار بیشینه این فواصل تا حدی است که سطوح کنترلی و بدنه از یکدیگر مستقل شوند. بدین معنا که دیگر افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدنه، تغییری بر روی نیروها و ممان‌های وارد بر زیرسطحی ایجاد نکند.

۵-۱- تست استاتیکی (دریفت استاتیکی)

در تست دریفت استاتیکی مدل به پی ام ام بسته می‌شود و با زاویه هدینگ ثابت، با سرعت مشخص در راستای X دستگاه مختصات مرجع به حرکت در می‌آید. ضرایب هیدرودینامیکی مثل Y_v و N_v را می‌توان پس از تحلیل خروجی‌های این آزمایش بدست آورد. در

⁷ stern

تست سوی خالص r و \dot{r} صفر می‌باشد، نیرو و ممان به صورت روابط (۱۵) و (۱۶) نوشته می‌شوند:

$$Y_M = -Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_v v \quad (15)$$

$$N_M = -N_{\dot{v}} \dot{v} + N_v v \quad (16)$$

بر اساس پژوهش رودی^۹ و همکاران [۲۸] مقدار فرکانس در تست سوی خالص باید در بازه $0.53/0.5$ هرتز قرار داشته باشد. بر همین اساس مقادیر فرکانس‌های شبیه سازی‌های پژوهش حاضر $0.1/0.2/0.4/0.7$ هرتز در نظر گرفته شده است. مقدار دامنه تست سوی خالص هم براساس گزارشات و استانداردهای آزمایشگاهی در بازه $0.055/0.05$ متر قرار دارد که برای پژوهش حاضر مقدار دامنه $0.25/0.05$ متر در نظر گرفته شده است. سناریوهای انجام تست دینامیکی سوی خالص به شرح جدول ۵ می‌باشد:

جدول ۵ - سناریوهای انتخاب شده تست دینامیکی سوی خالص

پارامترهای اندازه‌گیری شونده	فرکانس سوی خالص (هرتز)	دامنه حرکت سوی خالص (متر)	سرعت حرکت سوی خالص (نات)	پیشروی (نات)
نیروی عرضی، ممان یاوینگ، سرعت و شتاب		0.1		
	0.25	0.2	$6/5$	
		0.3		

باتوجهه به جدول با استدلال مشابه با تست‌های دریفت استاتیکی می‌توان گفت که برای تست‌های سوی خالص هم در مجموع ۱۲ شبیه سازی باید انجام بگیرد.

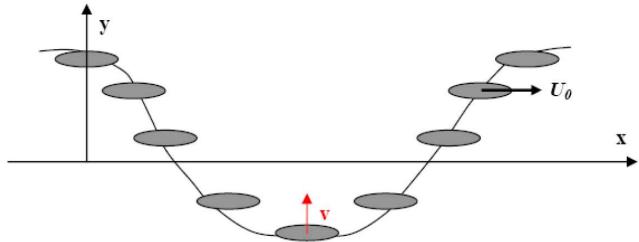
۶- فرایند شبیه سازی عددی

در پژوهش حاضر از نرم‌افزار Star ccm+ که بر پایه روش حجم محدود می‌باشد، برای تحلیل و شبیه‌سازی‌های عددی آزمون‌های آزمایشگاهی بهمنظور محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی استفاده شده است.

۶-۱- ساختار شبکه

شبیه‌سازی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی وابستگی زیادی به شبکه تولید شده دارد. در این تحلیل، از مش تریمر تولید شده توسط نرم‌افزار استار استفاده و به عنوان نمونه برای یکی از تست‌ها در شکل ۵ نمایش داده شده است. در شبیه‌سازی تست دریفت استاتیکی که فیزیک مسئله به صورت پایا تعریف می‌شود، شبکه حرکتی ثابت دارد و حرکت روبه‌جلو مدل توسط جریان ورودی

می‌باشد. شکل ۳ نمایی از وضعیت مدل در این تست را نشان می‌دهد.



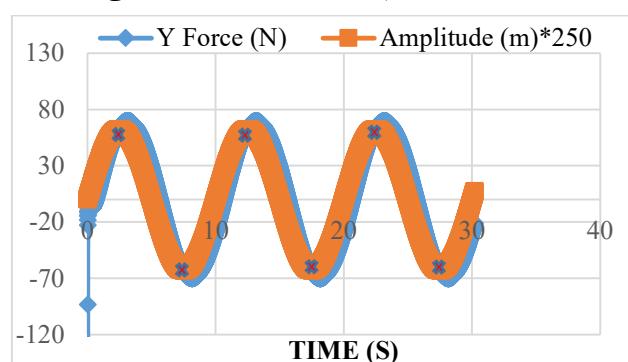
شکل ۳ - وضعیت مانور مدل در تست سوی خالص

در این تست سرعت و شتاب به صورت رابطه (۱۴) نوشته می‌شوند:

$$\begin{aligned} y &= y_0 \sin(\omega t + \varepsilon_y) \\ \dot{y} &= \omega y_0 \cos(\omega t + \varepsilon_y) \\ \ddot{y} &= -\omega^2 y_0 \sin(\omega t + \varepsilon_y) \end{aligned} \quad (14)$$

که در این معادلات y دامنه حرکت سوی، ω فرکانس حرکت و ε_y اختلاف فاز است. در این پژوهش هدف از انجام تست سوی خالص $N_{\dot{v}} = Y_{\dot{v}}$ محاسبه ضرایب وابسته به شتاب در جهت سوی، یعنی \dot{v} و \ddot{v} است که برای این کارکافی است در نقاطی که سرعت صفر است، نیرو و ممان را اندازه گیری کرده و سپس محاسبات را انجام دهیم.

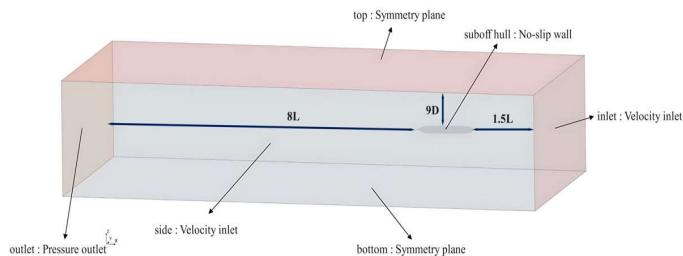
شکل ۴ موقعیت‌هایی که نیرو و ممان باید اندازه گیری شوند را برای بدنه در فرکانس 0.1 هرتز به نمایش گذاشته است. در مکان‌هایی که موقعیت عرضی زیرسطحی بیشینه است سرعت صفر می‌شود و در این زمان‌ها، نیرو و ممان اندازه گیری می‌شوند. به دلیل این که نیرو و ممان هم فاز هستند، در شکل ۴ فقط نمودار نیرو نشان داده شده است و برای ممان هم از همین زمان‌ها استفاده می‌شود.



شکل ۴ - نمایش نقاط سرعت صفر برای استخراج نیرو و ممان در مطالعه عددی حاضر، نیروی محاسبه شده فقط نیروی هیدرودینامیکی است که فرم بدنه عامل ایجاد آن است؛ بنابراین برای به دست آوردن مشتقهای هیدرودینامیکی، فقط به تجزیه کردن نیروی هیدرودینامیکی نیاز است. همچنین باتوجه به این که در

⁹ Roddy

می باشد. ابعاد دامنه محاسباتی و شرایط مرزی حل عددی در شکل ۶ نشان داده شده است.

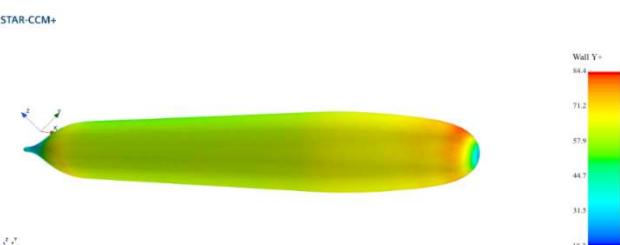


شکل ۶ - شرایط مرزی شبیه سازی و ابعاد دامنه محاسباتی

باتوجه به شرایط مرزی دیواره بدون لغزش برای بدنه زیرسطحی، جریان سیال در نزدیکی بدنه بهشت تأثیر قرار می‌گیرد و موجب ایجاد تغییرات زیادی در سرعت سیال می‌گردد. برای اساس در مطالعه حاضر به منظور شبیه سازی دقیق جریان در نزدیکی دیواره ازتابع دیواره و شبکه بندی لایه ای منشوری استفاده شده است. مقدار مؤلفه های شبکه بندی لایه ای منشوری بر مبنای مقدار y^+ مطابق رابطه (۱۷) تعیین می‌گردد.

$$y^+ = \frac{y \cdot u^*}{v} \quad (17)$$

که در آن y فاصله اولین گره تا دیواره، u^* ویسکوزیته دینامیکی و v سرعت مشخصه جریان آشفته می‌باشد. بر اساس توصیه ITTC مقدار y^+ در جریان های آشفته باید بین ۳۰ تا ۳۰۰ باشد [۳۰]. در شبیه سازی این مطالعه، مقدار y^+ در اکثر نواحی زیر آب مقداری بین ۳۰ تا ۱۰۰ دارد. در شکل ۷ مقدار y^+ در زاویه دریفت ۶ درجه نمایش داده شده است.



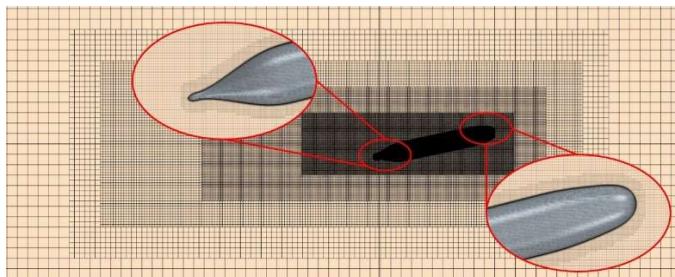
شکل ۷ - اندازه y^+ بر روی سطح بدنه مدل

۶-۳- بررسی استقلال نتایج از گام زمانی

گام زمانی در شبیه سازی حاضر مطابق رابطه ارائه شده توسط ITTC به عنوان تابعی از سرعت و طول خیس شده شناور در نظر گرفته شده است و مطابق رابطه (۱۸) تعیین گردیده است.

$$\Delta t = 0.01 \sim 0.005 \frac{L}{V} \quad (18)$$

شبیه سازی می شود؛ اما در تست سوی خالص باتوجه به حرکت داشتن زیر سطحی، از مش دینامیکی استفاده شده است.



شکل ۵ - شبکه بندی شبیه سازی تست های مانور زیر سطحی سابوف باتوجه به شرایط مرزی دیواره بدون لغزش برای بدنه زیر سطحی، جریان سیال در نزدیکی بدنه بهشت تأثیر قرار می‌گیرد و موجب ایجاد تغییرات زیادی در سرعت سیال می‌گردد. برای اساس در مطالعه حاضر به منظور شبیه سازی دقیق جریان در نزدیکی دیواره ازتابع دیواره و شبکه بندی لایه ای منشوری استفاده شده است. برای شبیه سازی دقیق جریان در نزدیکی سطح مدل، مش لایه مرزی به ضخامت ۲ سانتی متر و به تعداد ۱۱ عدد و نرخ رشد $1/3$ تشکیل شده است.

۶-۴- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

برای حل عددی ابتدا لازم است یک دامنه محاسباتی در اطراف جسم ساخته و جریان سیال و شرایط مرزی در آن تعریف شود. ابعاد دامنه مکعبی قرار گرفته حول جسم به صورتی در نظر گرفته شده است که شرایط آب عمیق برای شبیه سازی به وجود آید. ابعاد تعیین شده به نوع حرکت شبیه سازی شده، انحراف خطوط جریان به واسطه حضور جسم، گردابه های تشکیل شده در پشت جسم و غیره بستگی دارد. از آنجایی که سناریوهای انتخاب شده برای اعتبار سنجی، تست های آزمایشگاه دیوید تیلور می باشد، عرض دامنه محاسباتی برابر با عرض آزمایشگاه دیوید تیلور تنظیم شده است. به طور کلی اندازه دامنه محاسباتی را می توان باتوجه به دستورالعمل های ارائه شده توسط ITTC در سال ۲۰۱۱ [۲۹] تعیین کرد.

همچنین یکی از مهم ترین بخش ها در شبیه سازی عددی تعیین شرایط مرزی مسئله می باشد. مشخص کردن شرایط مرزی به منظور حل فرم گسسته معادلات دیفرانسیل در شبیه سازی های عددی الزامی است. هدف از تعیین شرایط مرزی در شبیه سازی های دینامیکی سیالات محاسباتی، مقید ساختن فرم گسسته معادلات و همچنین تعیین ویژگی های جریان در مرزهای فضای محاسباتی

$$\frac{h_i}{h_{i+1}} > 1.3 \quad (20)$$

همچنین مقدار متوسط ترتیب تغییرات و همچنین خطای نسبی مطابق روابط (۲۱) و (۲۲) تعیین می‌گردد.

$$p_{avg} = \frac{1}{\ln(r_{21})} |\ln|\epsilon_{32}/\epsilon_{21}| + q(p)| \quad (21)$$

در رابطه (۲۱)، P_{avg} بیانگر متوسط تغییرات شبکه‌بندی و همچنین در این رابطه $\phi_2 - \phi_3 = \epsilon_{32}$ و $\phi_1 - \phi_2 = \epsilon_{21}$ متفاوت های کلیدی در حل مسئله می‌باشند که در شبیه‌سازی حاضر نیروی مقاومت، زاویه تریم و بالآمدگی شناور در نظر گرفته شده‌اند.

$$q(p) = \ln\left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s}\right) \quad (22)$$

در رابطه (۲۲)، $q(p)$ بیانگر خطای نسبی می‌باشد همچنین در این رابطه، r_{21} و r_{32} بیانگر نرخ رشد شبکه‌بندی می‌باشند که برابر $1/41$ تعیین شده‌اند. خطای نسبی برونویابی مطابق روابط (۲۳) تا (۲۵) تعیین شده است.

$$\varphi_{txt}^{32} = \frac{(r_{21}^{p_{avg}} \varphi_1 - \varphi_2)}{(r_{21}^p - 1)} \quad (23)$$

$$e_a^{32} = \left| \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{\varphi_2} \right| \quad (24)$$

$$e_{exe}^{32} = \left| \frac{\varphi_{ext}^{23} - \varphi_3}{\varphi_{ext}^{23}} \right| \quad (25)$$

$$GCI_{fine}^{32} = \frac{1.25 e_a^{32}}{r_{32}^{p_{avg}} - 1} \quad (26)$$

در روابط (۲۴)، (۲۵) و (۲۶) پارامترهای e_a^{32} ، e_{exe}^{32} و GCI به ترتیب بیانگر خطای نسبی تخمینی، خطای نسبی برونویابی و شاخص همگرایی شبکه‌بندی هستند. در جدول ۶ پارامترهای به دست آمده از روش مذکور برای هر کدام از متغیرهای مورد بررسی ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل، مقدار عدم قطعیت به دست آمده برای متغیرهای مورد بررسی ناچیز است و شبکه‌بندی انجام شده دقت قابل قبولی دارد.

در رابطه (۱۸)، V بیانگر سرعت شناور بر حسب متر بر ثانیه و L طول خیس شده شناور بر حسب متر می‌باشد. برای اساس گام زمانی ۰.۰۰۵ ثانیه تنظیم شده است.

۶-۴- مدل اختشاشی

در این مطالعه، مدل دو معادله‌ای $k-e$ برای حل عبارت تنش رینولدز انتخاب شده است. مدل استاندارد $k-e$ پیش‌بینی خوبی برای جریان‌های آزاد با گرادیان‌های فشار کوچک ارائه می‌دهد. مدل مذکور بر این فرض استوار است که جریان کاملاً متلاطم است؛ از این‌رو کاربرد آن به جریان‌هایی با عدد رینولدز بالا محدود می‌شود [۳۱]. به طور کلی جریان سیال حول یک زیرسطحی معمولی شامل جدایش قوی، گرادیان فشار نسبتاً زیاد، مولفه‌های چرخش بالا و یا نرخ کرنش بالا نمی‌شود؛ بنابراین به نظر می‌رسد که مدل آشفتگی $k-e$ می‌تواند اثرات آشفتگی را به ویژه آن‌هایی را که برای محاسبه نیروها و ممان‌ها لازم است، به درستی ثبت کند. مدل آشفتگی دو معادله‌ای $k-e$ همراه با توابع دیواره استاندارد برای شبیه‌سازی اثرات آشفتگی که نیاز به تولید مش با توجه به مدل آشفتگی دارد، استفاده شده است. سونگ و همکاران [۳۲] نیز مدل‌سازی آشفتگی جریان در اطراف هندسه زیرسطحی سابوف را مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل $k-e$ می‌تواند نتایج قابل اعتمادتری نسبت به مدل‌های آشفته دیگر تولید کند.

۶-۵- مطالعه استقلال از شبکه

روشی که به عنوان شاخص همگرایی شبکه (GCI) شناخته می‌شود برای بررسی ساختار شبکه استفاده شده که توسط کلیک و همکاران [۳۳] ارائه گردیده است. این روش بر مبنای برونویابی ریچارد داؤسنون [۳۴] عمل می‌کند و خطای گسسته سازی را تخمین می‌زند. تحلیل عدم قطعیت برای سناریو دریفت استاتیکی با زاویه دریفت ۶ درجه انجام شده است. در این شبیه‌سازی عدم قطعیت نتایج عددی با بکارگیری روش مذکور بر مبنای سه شبکه‌بندی مختلف با نرخ رشد یکسان محاسبه شده است. در این راستا در گام اول ابعاد شبکه‌بندی مطابق رابطه (۱۹) تعیین می‌گردد.

$$h_i = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n V_i \right]^{\frac{1}{3}} \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)، h_i بیانگر اندازه شبکه آم و V بیانگر حجم سلول شبکه آم و N نشان‌دهنده تعداد کل شبکه‌بندی می‌باشد. ابعاد شبکه‌بندی در هر مرحله باید در رابطه (۲۰) صدق کند.

ضرایب میرایی بین ۲ تا ۴ درصد و میزان خطای ضرایب جرم افزوده تا ۲۱ درصد می‌باشد.

۷- ارائه و بحث بر نتایج عددی

۷-۱- بررسی فاصله استقلال سطوح کنترلی از بدن

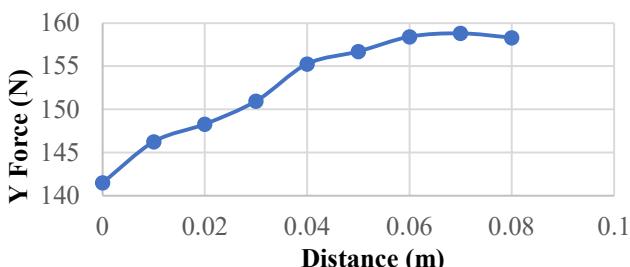
برای به دست آوردن فاصله بیشینه سطوح کنترلی از بدن در تست‌های این پژوهش، ۹ شبیه سازی استاتیکی با زاویه دریفت ۶°+ انجام شده است. بدین صورت که از فاصله صفر (سطح کنترلی چسبیده به بدن) تا ۰/۰۸ متر با افزایش یک سانتی متر در فاصله سطح کنترلی از بدن به صورت عمودی نسبت به شبیه سازی قبلی، این تست‌ها انجام شده اند. در مرحله بعد به محاسبه و استخراج نیروی سوی و گشتاور یا وارد بر زیرسطحی در این ۹ شبیه سازی پرداخته شده است. در جدول ۸ مقادیر نیروی سوی و گشتاور یا وارد شده است.

جدول ۸ - مقادیر نیروی سوی و گشتاور یا وارد فواصل مختلف سطوح

کنترلی از بدن

گشتاور یا وارد [N/m]	نیروی سوی از بدن [N]	فاصله سطح کنترلی از بدن [m]
۴۹۸/۳۸۸	۱۴۱/۵۱۹	.
۴۸۹/۲۴۷۸	۱۴۶/۲۶۴	۰/۰۱
۴۸۴/۸۷۹	۱۴۸/۳۱۱	۰/۰۲
۴۷۸/۹۷۳	۱۵۰/۹۷۷۱	۰/۰۳
۴۷۰/۲۸	۱۵۵/۲۷	۰/۰۴
۴۶۶/۹۴۱۱	۱۵۶/۷۱۸۱	۰/۰۵
۴۶۳/۲۸۴	۱۵۸/۴۲۱	۰/۰۶
۴۶۲/۰۹۸	۱۵۸/۸۱۸۷	۰/۰۷
۴۶۲/۶۷۱۶	۱۵۸/۳۲۰۵	۰/۰۸

پس از استخراج نیروها و گشتاورها برای ۹ فاصله ذکر شده، نمودار نیروی سوی بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدن در شکل ۸ و نمودار گشتاور یا وارد بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدن در شکل ۹ ترسیم شده است.



شکل ۸ - نمودار نیروی سوی بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدن

جدول ۶ - خطای گسسته سازی مولفه‌های هیدرودینامیکی بر مبنای

روش	پارامترها	نیروی سوی	گشتاور یا وار
(دریز) N_1	۶۱۶۱۰۹۰		
(متوسط) N_2	۲۴۵۵۷۱۶		
(درشت) N_3	۹۶۸۹۹۲۸		
ϕ_1	۴۱۰/۴۱۰۰۹۳۸۴	۴۶/۴۲۸۷	- ۹۹/۷۹۱۶۴
ϕ_2	۴۰۸/۷۵۰۴۹	۴۷/۳۵۴۰۴۶	- ۱۰۰/۲۶۳۲۵
ϕ_3	۴۰۶/۶۲۶۲۷	۴۸/۵۲۳۱۴۷	- ۱۰۱/۰۵۴۴۵
P	۴/۷۳۹۷	۳/۵۶۴۲	۲/۴۸۱۶
R	۰/۱۹۶۴	۰/۲۹۴۵	۰/۴۲۸۷
GCI -متوسط	۰/۳۱٪	۰/۷۶٪	۱/۶۹٪
GCI -دریز	۰/۳۱٪	۰/۲۲٪	۰/۷۲٪

۶- اعتبارسنجی حل عددی

نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی زیرسطحی سابوف در جدول ۷ مقایسه شده است [27].

جدول ۷ - مقایسه مقدار ضرایب هیدرودینامیکی به دست آمده توسط شبیه سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی

ضریب	آزمایشگاهی	CFD	مقدار خطأ
Y'_v	۳/۹۳٪	-۵/۹۵	-۵/۷۱۶
N'_v	۱/۹۳۷۵٪	-۱۲/۸	-۱۳/۰۴۸
$Y'_{\dot{v}}$	۱۹/۷٪	-۱۳/۳	-۱۵/۹۲
$N'_{\dot{v}}$	۲۱/۴۲٪	-۰/۴۲	-۰/۳۳

باتوجه به نتایج فوق و خطاهای به دست آمده، می‌توان به این نتیجه رسید که شبیه سازی عددی دارای دقت و اطمینان مناسبی می‌باشد. به طور مثال حکمی فرد و همکاران [35] در پژوهشی به محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی شناور زیرسطحی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و به روش حجم محدود پرداختند. مقادیر عددی با نتایج آزمایشگاهی مرجع پرسترو مقایسه شدند. اختلاف مقادیر عددی ضرایب میرایی نسبت به نتایج آزمایشگاهی در محدوده ۰/۸ تا ۱۲ درصد بود. این اختلاف در ضرایب جرم افزوده در محدوده ۰/۸ تا ۳۷ درصد بود که نشان از تطبیق خوب روش عددی با آزمایشگاهی دارد. در حالی که در پژوهش حاضر محدوده خطای

جدول ۱۱ - مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و ممان برای حالت بدن و سطوح کنترلی در فاصله $0\text{--}0.04$ متر در شبیه سازی عددی

گشتاور یاو [N.m]	زوایای دریفت [N]	سرعت در راستای سوی [m/s]	نیروی سوی (درجه)
۱۶۵/۹۵۲	۴۵/۱۳۱	-۰/۱۱۵۶۹۲	۲+
۳۲۴/۰۹۴	۹۵/۶۳۲	-۰/۲۳۱۲۴۳	۴+
۴۷۰/۲۸	۱۵۵/۲۷	-۰/۳۴۶۵۱۲	۶+

جدول ۱۲ - مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و ممان برای حالت بدن و سطوح کنترلی در فاصله $0\text{--}0.06$ متر در شبیه سازی عددی

گشتاور یاو [N.m]	زوایای دریفت [N]	سرعت در راستای سوی [m/s]	نیروی سوی (درجه)
۱۶۲/۵۱۲	۴۶/۸۱۲	-۰/۱۱۵۶۹۲	۲+
۳۱۹/۰۱۴۲	۹۸/۰۰۱	-۰/۲۳۱۲۴۳	۴+
۴۶۳/۲۸۴	۱۵۸/۴۲۱	-۰/۳۴۶۵۱۲	۶+

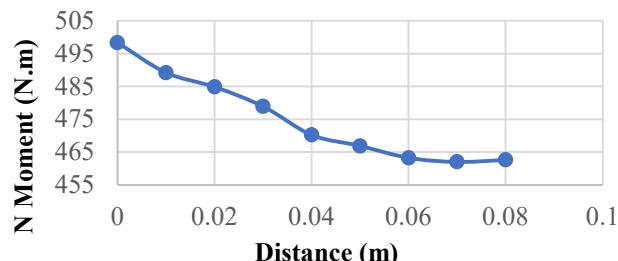
پس از به دست آوردن نیروها و گشتاورها، ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی سایوف در تست دریفت استاتیکی در فاصله مربوطه سطوح کنترلی از بدن استخراج شده و به صورت بعددار و بدون بعد به ترتیب در جدول ۱۳ و جدول ۱۴ آورده شده‌اند.

جدول ۱۳ - مقدار ضرایب هیدرودینامیکی بعددار تست دریفت استاتیکی بر اساس فاصله سطوح کنترلی از بدن زیرسطحی

فاصله سطوح کنترلی از بدنه زیرسطحی [m]	مقدار ضریب N_v [Kg. $\frac{m}{s}$]	مقدار ضریب Y_v [Kg/s]	مقدار ضریب N'_v ($\times 10^{-3}$)	مقدار ضریب Y'_v ($\times 10^{-3}$)
-۱۴۶/۶	-۳۸۸/۶۹	.	-۱۰/۶۵	-۱۲/۲۹
-۱۴۱۵/۵	-۴۱۴/۹۱	۰/۰۲	-۱۰/۲۷	-۱۳/۱۲
-۱۳۷۵/۴	-۴۳۴/۰۶	۰/۰۴	-۹/۹۸	-۱۳/۷۲
-۱۳۵۴	-۴۴۳/۸۷	۰/۰۶	-۹/۸۳	-۱۴/۰۳

جدول ۱۴ - مقدار ضرایب هیدرودینامیکی بدون بعد تست دریفت استاتیکی بر اساس فاصله سطوح کنترلی از بدن زیرسطحی

فاصله سطوح کنترلی از بدنه زیرسطحی [m]	مقدار ضریب N'_v ($\times 10^{-3}$)	مقدار ضریب Y'_v ($\times 10^{-3}$)
-۱۰/۶۵	-۱۲/۲۹	.
-۱۰/۲۷	-۱۳/۱۲	۰/۰۲
-۹/۹۸	-۱۳/۷۲	۰/۰۴
-۹/۸۳	-۱۴/۰۳	۰/۰۶



شکل ۹ - نمودار گشتاور یاو بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدن با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که نیروی سوی و گشتاور یاو وارد بر زیرسطحی از فاصله $0\text{--}0.06$ متر به بعد، تقریباً مستقل از فاصله سطوح کنترلی از بدن شده است. در نتیجه فاصله $0\text{--}0.06$ متر به عنوان بیشینه فاصله سطوح کنترلی از زیرسطحی در نظر گرفته می‌شود و شبیه‌سازی‌های موجود در این پژوهش در فاصله‌های $0\text{--}0.02$ ، $0\text{--}0.04$ و $0\text{--}0.06$ متر سطوح کنترلی از بدن زیرسطحی انجام می‌شود.

۲-۷ - نتایج تست دریفت استاتیکی

تست دریفت استاتیکی سایوف در شبیه‌سازی‌ها، طبق تست‌های انجام شده در آزمایشگاه دیوید تیلور بوده که در تست دریفت استاتیکی آن، مدل با سرعت $6/5$ نات توسط ارابه رو به جلو کشیده می‌شود. در این قسمت شبیه‌سازی برای 4 فاصله بالک از بدن انجام شد که این فواصل شامل $0\text{--}0.02$ ، $0\text{--}0.04$ و $0\text{--}0.06$ متر می‌باشد. مقادیر نیرو و گشتاور برای فاصله‌های مختلف بدن و سطوح کنترلی در جداول ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۹ - مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و ممان برای حالت بدن و سطوح کنترلی در فاصله صفر در شبیه سازی عددی

گشتاور یاو [N.m]	زوایای دریفت [N]	سرعت در راستای سوی [m/s]	نیروی سوی (درجه)
۱۸۱/۴۱	۳۷/۰.۹۷	-۰/۱۱۵۶۹۲	۲+
۳۴۷/۹۳۸	۸۳/۵۸۱	-۰/۲۳۱۲۴۳	۴+
۴۹۸/۳۸۸	۱۴۱/۵۱۹	-۰/۳۴۶۵۱۲	۶+

جدول ۱۰ - مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و ممان برای حالت بدن و سطوح کنترلی در فاصله $0\text{--}0.02$ متر در شبیه سازی عددی

گشتاور یاو [N.m]	زوایای دریفت [N]	سرعت در راستای سوی [m/s]	نیروی سوی (درجه)
۱۷۰/۸۰۹	۴۲/۷۰۲	-۰/۱۱۵۶۹۲	۲+
۳۲۲/۱۹۵	۹۱/۷۹۳	-۰/۲۳۱۲۴۳	۴+
۴۸۴/۸۷۹	۱۴۸/۳۱۱	-۰/۳۴۶۵۱۲	۶+

جدول ۱۸ - مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و ممان برای حالت بدن و سطوح کنترلی در فاصله ۰/۰۶ متر در شبیه سازی عددی

فرکانس [N.m]	گشتاور یاو [N]	شتاب در راستای سوی [m/s ²] (هرتز)	نیروی سوی [N]
-۶/۶۳۵۹۶	-۶۴/۴۷۳۲	۰/۰۹۸۷	۰/۱
-۲۴/۱۴۸۱	-۲۵۹/۳۱۱	۰/۳۹۴۷۸	۰/۲
-۵۵/۰۲۲۲	-۵۷۶/۶۷۶	۰/۸۸۸۲۶	۰/۳

پس از به دست آوردن نیروها و گشتاورها، تمامی ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی سابوف در تست سوی خالص در فاصله مربوطه سطوح کنترلی از بدن استخراج شده و به صورت بعددار در جدول ۱۹ و بدون بعد در جدول ۲۰ آورده شده است.

جدول ۱۹ - مقدار ضرایب هیدرودینامیکی بعددار تست سوی خالص بر اساس فاصله سطوح کنترلی از بدن زیرسطحی

فاصله سطوح کنترلی از بدنه زیرسطحی [Kg.m]	مقدار ضریب Y_{v} [Kg]	مقدار ضریب Y_{v} [m]
۸۰/۳۴	-۷۳۲/۱	.
-۲۵/۰۰۷	-۶۷۲/۸۶	۰/۰۲
-۴۷/۶۶	-۶۵۹/۲	۰/۰۴
-۶۲/۴۱	-۶۵۰/۷	۰/۰۶

جدول ۲۰ - مقدار ضرایب هیدرودینامیکی بدون بعد تست سوی خالص بر اساس فاصله سطوح کنترلی از بدن زیرسطحی

مقدار ضریب N'_{v} ($\times 10^{-۳}$)	مقدار ضریب Y'_{v} ($\times 10^{-۳}$)	فاصله سطوح کنترلی از بدنه زیرسطحی [m]
۰/۴۴۸	-۱۷/۷۷	.
-۰/۱۴	-۱۶/۳۳	۰/۰۲
-۰/۲۶۶	-۱۶	۰/۰۴
-۰/۳۴۷۷	-۱۵/۷۹	۰/۰۶

با استخراج ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به تست سوی خالص مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدن، مقدار ضریب Y_{v} کاهش و مقدار ضریب N_{v} افزایش می‌یابد.

۴-۷- محاسبه تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی

در ادامه به مقایسه مقدار اختلاف محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی به روش جمع ضرایب مربوط به سطوح کنترلی و بدن و روش محاسبه مستقیم حالت ترکیبی بدن و سطوح کنترلی پرداخته خواهد شد.

۴-۷-۱- ضرایب هیدرودینامیکی میرایی

با استفاده از ضرایب به دست آمده میزان تاثیر فاصله سطوح کنترلی با بدن بر روی مقدار ضرایب هیدرودینامیکی بی بعد شده سنجیده

با استخراج ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به تست دریفت استاتیکی مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدن، مقدار ضریب Y_{v} افزایش و مقدار ضریب N_{v} کاهش می‌یابد.

۷-۳- نتایج تست سوی خالص

تست سوی خالص مرجع در فرکانس حرکتی ثابت برابر ۰/۳۵۳ هرتز و در سرعت پیشروی ۴/۵، ۵، ۶ و ۶/۵ نات انجام شده است که در این مطالعه با توجه به استفاده از رگرسیون خطی برای استخراج ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به حرکت سوی، تنها سرعت پیشروی ۶/۵ نات مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این قسمت نیز شبیه‌سازی برای ۴ فاصله بالک از بدن انجام شد که این فواصل شامل ۰، ۰/۰۲، ۰/۰۴ و ۰/۰۶ متر می‌باشد. مقادیر نیروهای سوی و گشتاورهای یاو برای فاصله‌های مختلف بدن و سطوح کنترلی در فرکانس‌های مختلف تست سوی خالص استخراج شده است و در جداول ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸ آرائه شده است.

جدول ۱۵ - مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و ممان برای حالت بدن و سطوح کنترلی در فاصله صفر در شبیه سازی عددی

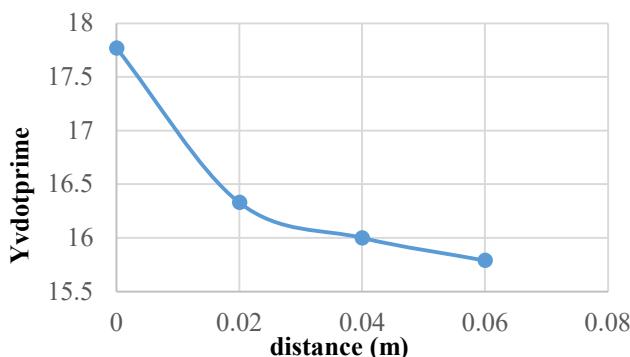
فرکانس [N.m]	گشتاور یاو [N]	شتاب در راستای سوی [m/s ²] (هرتز)	نیروی سوی [N]
۱۵/۵۷۲	-۷۷/۲۵۸	۰/۰۹۸۷	۰/۱
۵۰/۶۹۵	-۳۰۱/۳۰۴	۰/۳۹۴۷۸	۰/۲
۶۲/۱۳۸	-۶۴۳/۹۰۶	۰/۸۸۸۲۶	۰/۳

جدول ۱۶ - مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و ممان برای حالت بدن و سطوح کنترلی در فاصله ۰/۰۲ متر در شبیه سازی عددی

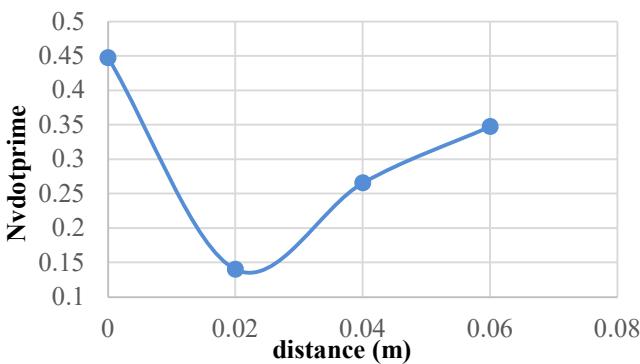
فرکانس [N.m]	گشتاور یاو [N]	شتاب در راستای سوی [m/s ²] (هرتز)	نیروی سوی [N]
-۲/۰۷۱۸۳	-۶۶/۸۳۱۵	۰/۰۹۸۷	۰/۱
-۷/۲۸۴۲۲	-۲۶۹/۰۰۴	۰/۳۹۴۷۸	۰/۲
-۲۳/۰۱۷۶	-۵۹۵/۷۱۶	۰/۸۸۸۲۶	۰/۳

جدول ۱۷ - مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و ممان برای حالت بدن و سطوح کنترلی در فاصله ۰/۰۴ متر در شبیه سازی عددی

فرکانس [N.m]	گشتاور یاو [N]	شتاب در راستای سوی [m/s ²] (هرتز)	نیروی سوی [N]
-۴/۹۵۸۲۲	-۶۵/۴۶۵	۰/۰۹۸۷	۰/۱
-۱۷/۶۲۴۱	-۲۶۲/۸۲۱	۰/۳۹۴۷۸	۰/۲
-۴۲/۶۰۲۱	-۵۸۴/۱۳۷	۰/۸۸۸۲۶	۰/۳



شکل ۱۲ - نمودار ضریب هیدرودینامیکی $Y'v$ بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدن

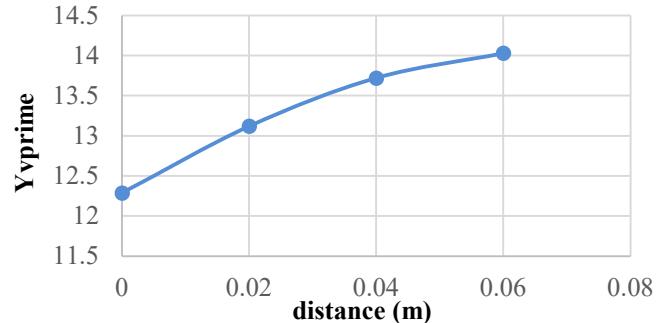


شکل ۱۳ - نمودار ضریب هیدرودینامیکی $N'vdotprime$ بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدن

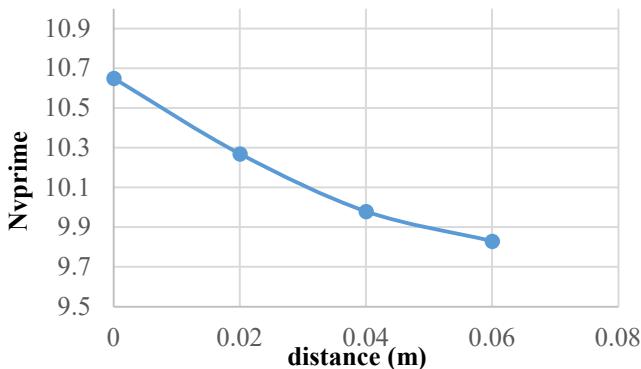
باتوجه به نمودارهای شکل ۱۲ و شکل ۱۳ نیز می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدن، مقدار قدرمطلق ضریب هیدرودینامیکی $Y'v$ کاهش یافته و نمودار به صورت نزولی می‌باشد. اما مقادیر ضریب هیدرودینامیکی $N'vdotprime$ در ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش یافته و به صورت صعودی می‌باشد. افزایش یا کاهش ضرایب هیدرودینامیکی نسبت به تغییرات فاصله بدن از سطوح کنترلی صرفاً به معنای افزایش یا کاهش نیرو یا گشتاور نیست بلکه ممکن است به معنای نرخ تغییرات نیرو یا گشتاور در سرعت‌های عرضی مختلف باشد.

جابه‌جایی مرکز فشار نیز در تغییرات گشتاورها و ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به گشتاور یا و ممکن است مؤثر باشد. معمولاً به علت هندسه زیردریایی، مرکز فشار به سمت جلو متمايل می‌باشد. هنگامی که سطوح کنترلی به زیردریایی افزوده می‌شوند و به صورت چسبیده به بدن قرار می‌گيرند، تمرکز فشارقوی ایجاد می‌شود که باعث می‌شود مرکز فشار به سمت پاشنه زیردریایی بیاید. اما با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدن تمرکز فشار کمتر می‌شود و مرکز فشار دوباره به سمت جلو می‌رود. به همین دليل می‌توان گفت که تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی گشتاورهای یا و صرفاً به

شده است. نمودار ضرایب هیدرودینامیکی $Y'v$ و $N'vdotprime$ بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدن به ترتیب در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ آورده شده است. به علت بررسی دقیق روند نمودارها، قدرمطلق مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی قرارداده شده است.



شکل ۱۰ - نمودار ضریب هیدرودینامیکی $Y'v$ بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدن



شکل ۱۱ - نمودار ضریب هیدرودینامیکی $N'vdotprime$ بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدن

باتوجه به نمودارهای شکل ۱۰ و شکل ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدن، مقدار قدرمطلق ضریب هیدرودینامیکی $Y'v$ افزایش یافته و نمودار به صورت صعودی می‌باشد. اما مقادیر ضریب هیدرودینامیکی $N'vdotprime$ کاهش یافته و نمودار به صورت نزولی می‌باشد.

۷-۴-۱- ضرایب هیدرودینامیکی جرم افزوده

نمودار ضرایب هیدرودینامیکی $Y'v$ و $N'vdotprime$ بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدن به ترتیب در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ آورده شده است. در این قسمت نیز به علت بررسی دقیق روند نمودارها، قدرمطلق مقادیر نیروها و گشتاورها قرارداده شده است.

- about a ship in maneuvering motion,” *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 82–93, 1998, doi: 10.1007/BF02492563.
- [4] A. Cura Hochbaum, “Computation of the Turbulent Flow around a Ship Model in Steady Turn and in Steady Oblique Motion,” in *22nd ONR Symposium on Naval Hydrodynamics*, 1998.
- [5] B. Alessandrini and G. Delhommeau, “Viscous free surface flow past a ship in drift and in rotating motion,” in *22th Symposium on Naval Hydrodynamics*, 1998.
- [6] C. Delen and O. K. Kinaci, “Direct CFD simulations of standard maneuvering tests for DARPA Suboff,” *Ocean Eng.*, vol. 276, p. 114202, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114202.
- [7] Y. J. Cho, W. Seok, K. H. Cheon, and S. H. Rhee, “Maneuvering simulation of an X-plane submarine using computational fluid dynamics,” *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 12, pp. 843–855, 2020, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2020.10.001.
- [8] R. Doyle, T. L. Jeans, A. G. L. Holloway, and D. Fieger, “URANS simulations of an axisymmetric submarine hull undergoing dynamic sway,” *Ocean Eng.*, vol. 172, pp. 155–169, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.11.019.
- [9] A. Cura-Hochbaum and S. Uharek, “Prediction of ship manoeuvrability in waves based on RANS simulations,” in *31st Symposium on Naval Hydrodynamics*, 2016, pp. 11–16.
- [10] A. Cura Hochbaum and S. Uharek, “Prediction of the Manoeuvring Behaviour of the Kcs,” in *Simmam*, 2014.
- [11] A. Cura Hochbaum, “Virtual PMM Tests for Manoeuvring Prediction,” in *26th Symposium on Naval Hydrodynamics*, 2006, pp. 17–22.
- [12] B. Racine and E. Paterson, “CFD-based method for simulation of marine-vehicle maneuvering,” in *35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, 2005, p. 4904.
- [13] Y. Pan, H. Zhang, and Q. Zhou, “Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation,” *J. Hydron.*, vol. 24, no. 6, pp. 840–847, 2012, doi: 10.1016/S1001-6058(11)60311-9.
- [14] S. He, P. Kellett, Z. Yuan, A. Incevik, O. Turan, and E. Boulougouris, “Manoeuvring prediction based on CFD generated derivatives,” *J. Hydron.*, vol. 28, no. 2, pp. 284–292, 2016, doi: 10.1016/S1001-6058(16)60630-3.
- [15] H. Islam and C. G. Soares, “Estimation of hydrodynamic derivatives of a container ship using PMM simulation in OpenFOAM,” *Ocean Eng.*, vol. 164, pp. 414–425, 2018, doi:

معنای تغییر مقدار گشتاور نیست، بلکه تغییر محل اثر نیرو به دلیل افزودن سطوح کنترلی و تغییر در هندسه می‌تواند از دلایل تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی گشتاور یا باشد.

۸- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، به منظور مطالعه اثر فاصله بین سطوح کنترلی از بدنه بر تعدادی از ضرایب هیدرودینامیکی خطی مانور زیرسطحی معیار سابوف، ضرائب خطی حاصل از تست‌های دریفت استاتیکی و سوی خالص، در ۴ فاصله مختلف بدنه از سطوح کنترلی به روش عددی محاسبه شده است. در روش عددی از نرم‌افزار Star ccm+ استفاده گردیده است. در این مطالعه، مدل $k - k$ برای حل عبارت تنش رینولدز انتخاب شده و از مش تریمر تولید شده توسط نرم‌افزار استار استفاده شده است.

نتایج نشان داد استقلال ضرایب هیدرودینامیکی مانور بدنه و بالک از فاصله بین این دو در ۰/۰۶ متر اتفاق می‌افتد. تا قبل از این فاصله، در تست دریفت استاتیکی با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدنه، مقدار ضریب γ_v افزایش و مقدار ضریب N_v کاهش می‌باید. در حالیکه در تست سوی خالص نیز با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدنه، مقدار ضریب γ_v کاهش و مقدار ضریب N_v افزایش می‌باید.

بطور کلی می‌توان گفت استفاده از روش‌های رگرسیونی برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بدنه به همراه بالک در صورتی نتایج دقیقی خواهد داد که فاصله بین بدنه و سکان بیش از فاصله استقلال باشد که این فاصله وابسته به پروفیل بدنه، پروفیل سطوح کنترلی و سرعت حرکتی می‌باشد.

در ادامه این پژوهش میزان اثر فاصله سطوح کنترلی از بدنه، بر مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی نسبت به حالتی که بدنه و بالک کاملاً مجزا هستند نیز بررسی شده است که نتایج حاصل از آن می‌تواند درصد خطای حاکم بر روش‌های رگرسیونی را تعیین نماید که این نتایج پس از تحلیل در مقالات بعد منتشر خواهد شد.

۹- مراجع

- [1] M. Moonesun, Y. M. Korol, N. Valeri, A. Brazhko, and A. Ursolov, “Bottom effect on the submarine moving close to the sea bottom,” *J. Sci. Eng. Res.*, vol. 6, no. 1, pp. 106–113, 2016.
- [2] M. Moonesun and Y. M. Korol, “Minimum Immersion Depth for Eliminating Free Surface Effect on Submerged Submarine Resistance,” *Turkish J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 36–46, 2015.
- [3] T. Ohmori, “Finite-volume simulation of flows

- experiments," *David Taylor Res. Center, Sh. Hydromechanics Dep. DTRC/SHD-1298-08*, 1990.
- [28] R. Roddy, J. Feldman, and J. Bedel, *Conceptual design of a new planar motion mechanism for investigating the stability and control characteristics of submarines*. Naval Surface Warfare Center, Carderock Division, 1995.
- [29] I. Recommendations, "ITTC-Recommended procedures and guidelines, practical guidelines for ship CFD applications," Technical report, 7.5-03-02, 2011. 3.3. 3, 2011.
- [30] I. T. T. Conference, "ITTC Recommended Procedures and Guidelines, Practical Guidelines for Ship-Propulsion CFD, 7.5-03-03-01," The International Towing Tank Conference Bournemouth, UK, 2014.
- [31] D. C. Wilcox, "Turbulence modeling for CFD. La Canada, CA: DCW Industries," Inc, Novemb., 2006.
- [32] C. H. Sung, M. Y. Jiang, B. Rhee, S. Percival, P. Atsavapranee, and I. Y. Koh, "Validation of the flow around a turning submarine," in *The Twenty-Fourth Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan*, 2002.
- [33] I. B. Celik, U. Ghia, P. J. Roache, C. J. Freitas, H. Coleman, and P. E. Raad, "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications," *J. Fluids Eng.*, vol. 130, no. 7, pp. 078001–078004, 2008, doi: 10.1115/1.2960953.
- [34] L. F. Richardson, "IX. The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam," *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A, Contain. Pap. a Math. or Phys. Character*, vol. 210, no. 459–470, pp. 307–357, 1911, doi: 10.1098/rsta.1911.0009.
- [35] M. Hakamifard and V. F. M. Rostami, "Numerical and Analytical Calculation of Munk Moment in Real Flow for an Autonomous Submarine in Pure Sway Motion in PMM Test," 2019, doi: 10.22044/JSF.M.2019.8095.2841.
- [16] 10.1016/j.oceaneng.2018.06.063.
J. Amini Foroushani and M. Gandomkar, "Extraction of hydrodynamic coefficients applying planning mechanism motion maneuver using computational fluid dynamics," *J. Solid Fluid Mech.*, vol. 8, no. 1, pp. 215–228, 2018, doi: 10.22044/JSF.M.2018.4527.2168.
- [17] A. B. Phillips, M. Furlong, and S. R. Turnock, "Virtual planar motion mechanism tests of the autonomous underwater vehicle autosub," 2007.
- [18] S. H. Mousavizadegan, "Investigation on the Effect of Tail Form on Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Maneuverability," *J. Mar. Eng.*, vol. 12, no. 24, pp. 89–101, 2017.
- [19] Y. Wang, T. Gao, Y. Pang, and Y. Tang, "Investigation and optimization of appendage influence on the hydrodynamic performance of AUVs," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 24, pp. 297–305, 2019, doi: 10.1007/s00773-018-0558-y.
- [20] A. Hajivand, S. H. Mousavizadegan, M. Sadeghian, and M. Fadavi, "Effect of hydroplane profile on hydrodynamic coefficients of an autonomous underwater vehicle," *Brodrogr. Teor. i praksa Brodrogr. i Pomor. Teh.*, vol. 67, no. 1, pp. 19–41, 2016.
- [21] S. K. Shariati and S. H. Mousavizadegan, "The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near the free surface," *Appl. Ocean Res.*, vol. 67, pp. 31–43, 2017, doi: 10.1016/j.apor.2017.07.001.
- [22] S. Mohammad Beigi, A. Shateri, and M. Dehghan Manshadi, "Experimental investigation of the effect of displacement of stern planes on reducing non-uniformity and fluctuations of a submarine's wake flow," *Modares Mech. Eng.*, vol. 21, no. 4, pp. 209–224, 2021.
- [23] M. S. Seif and A. Hasavand, "Investigating the geometry and control surface of AUV robots on hydrodynamics performance," *J. Mar. Eng.*, vol. 17, no. 33, pp. 53–64, 2021.
- [24] E. Yari, "Calculation Submarine Hydrodynamic Coefficient by Hybrid Method," *J. Mar. Eng.*, vol. 19, no. 38, pp. 38–50, 2023, doi: 10.61186/marineeng.19.38.38.
- [25] D. A. Jones, D. B. Clarke, I. B. Brayshaw, J. L. Barillon, and B. Anderson, "The calculation of hydrodynamic coefficients for underwater vehicles," Citeseer, 2002.
- [26] M. Renilson, *Submarine Hydrodynamics*. Springer, 2018.
- [27] R. F. Roddy, "Investigation of the stability and control characteristics of several configurations of the DARPA SUBOFF model (DTRC Model 5470) from captive-model