

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

## علیرضا پاژن<sup>۱</sup>، علی اصغر مقدس آهنگری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی مکانیک-گرایش مهندسی دریا، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، [alirezapazhan@yahoo.com](mailto:alirezapazhan@yahoo.com)  
<sup>۲</sup> عضو هیات علمی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، [Moghaddas@aut.ac.ir](mailto:Moghaddas@aut.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>ناریخچه مقاله:            تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷            تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹            تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۴</p> <p>کلمات کلیدی:            ضرایب هیدرودینامیکی خطی            فاصله از بدنه            شبیه‌سازی عددی            تست دریافت استاتیکی            تست سوی خالص</p>	<p>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 رگرسیون برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی، فاصله سطوح کنترلی از بدنه است. در این مقاله به منظور بررسی اثر فاصله از بدنه بر تعدادی از ضرایب هیدرودینامیکی خطی مانور، تحلیل عددی بر روی بدنه 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 بدنه به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده و تحلیل در چندین فاصله سطوح کنترلی از بدنه انجام شده است. نتایج عددی پس از تطابق با نتایج آزمایشگاهی، نشان داد که ضرایب هیدرودینامیکی از فاصله بیش از ۰/۰۶ متر، مستقل از فاصله بین بدنه و سطوح کنترلی می‌شوند. همچنین در تست دریافت استاتیکی با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدنه، ضریب هیدرودینامیکی مربوط به نیروی سوی افزایش و ضریب هیدرودینامیکی مربوط به گشتاور یاو کاهش می‌یابد. اما در تست سوی خالص با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدنه ضریب هیدرودینامیکی مربوط به نیروی سوی کاهش و ضریب هیدرودینامیکی مربوط به گشتاور یاو در ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.</p>

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

AliReza Pazhan<sup>1</sup>, AliAsghar Moghaddas<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> MSc in mechanical engineering, Imam Hossein Comprehensive University; [alirezapazhan@yahoo.com](mailto:alirezapazhan@yahoo.com)

<sup>2</sup> Academic Staff, Imam Hossein Comprehensive University; [Moghaddas@aut.ac.ir](mailto: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.

## 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 کنترلر دقیق برای آن‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین توسعه روز افزون زیرسطحی‌های هوشمند و کنترل از راه دور نیز ضرورت محاسبه دقیق ضرایب هیدرودینامیکی مانور را جهت طراحی کنترلرهای دقیق بیشتر نموده است. برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی مانور، روش‌های مختلفی وجود دارد که عبارتند از: روش آزمایشگاهی، روش عددی و استفاده از روابط تجربی (رگراسیونی).

هرچند روش رگراسیونی نتایج را به‌دقت 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 رگراسیونی را کاهش داد. یکی از عوامل عدم قطعیت استفاده از این ضرایب، محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بدنه با بالک به‌صورت اصل برهم نهی (جمع جبری) است. بدین معنا که ضرایب بدنه و سطوح کنترلی به‌صورت مجزا با روابط رگراسیونی 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 رگراسیونی از جمله این روش‌ها هستند. اهموری<sup>۱</sup> [3]، هوجبوم<sup>۲</sup> [4] و آلساندروینی<sup>۳</sup> [5] از افراد پیش‌گامی هستند که از ابزارهای عددی برای این منظور استفاده کردند. 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 غیرایزوستاتی، مانند مکانیسم حرکت سطح

(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<sup>۴</sup> و همکارانش [17] در سال ۲۰۰۷ روش دینامیک سیالات محاسباتی قوی‌ای 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 دم بر روی مانورپذیری شناور زیرسطحی هوشمند پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش طول دم، ضرایب هیدرودینامیکی میرایی و جرم افزوده، کاهش و شعاع دایره چرخش و مانورپذیری به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. یازینگ وانگ<sup>۵</sup> 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 نشان می‌دهد که تأثیر ملحقات بر عملکرد هیدرودینامیکی به‌طور مستقیم با اندازه آن متناسب است و یک آرایش توزیع‌شده برای کاهش درگ سودمند است. همچنین دیگر نتایج این پروژه این بود که محل اولین زائده باید تا حد امکان دورتر از دماغه بدنه قرار گیرد تا از ایجاد تلاطم جلوگیری گردد و بزرگ‌ترین زائده همیشه باید در ابتدای AUV در نظر گرفته شود.

جریان در منطقه پاشنه زیردریایی بسیار حائز اهمیت است و در نتیجه قرارگرفتن بالک‌های انتهایی در منطقه مذکور بر پیچیدگی جریان 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. مکان قرارگیری و اندازه بالک‌های انتهایی بر روی پاشنه در طرح‌های مختلف زیرسطحی ثابت نبوده و امکان تغییر این پارامترها بر روی بدنه را دارند. با تغییر مکان و اندازه بالک‌های انتهایی بر روی بدنه زیردریایی اندازه لایه‌مرزی برخوردکننده به

<sup>4</sup> Philips

<sup>5</sup> Yaxing Wang

<sup>1</sup> Ohmori

<sup>2</sup> Hochbaum

<sup>3</sup> 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 بدنه و ملحقات آن برابر نیست؛ بنابراین یکی از چالش‌ها در محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی در روش تحلیلی و رگراسیونی، استخراج آن‌ها با استفاده از اصل برهم‌نهی بدنه و ملحقات می‌باشد که یکی از دلایل خطای محاسبات نسبت به روش آزمایشگاهی و عددی است. در پژوهش‌های گذشته اثر فاصله سطوح کنترلی از بدنه زیرسطحی بر مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی و میزان تغییرات این ضرایب بر اثر تغییرات فاصله عمودی سطوح کنترلی از بدنه بررسی نشده است. بنابراین در پژوهش حاضر به بررسی عددی اثر متقابل بین سطوح کنترلی و بدنه یک نمونه زیرسطحی بر مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی خطی مانور پرداخته شده است.

## ۳- معادلات حاکم

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

نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه 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 وارده بر زیردریایی با استفاده از بسط تیلور حول نقطه کاری وسیله، به دست آید. انتخاب ضرایب و در نتیجه مدل ریاضی مورد استفاده، 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]:

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

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

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

$$K = K_{uu} + K_{vv} + K_{pp} + K_{qq} + K_{rr} \quad (4)$$

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 تحت‌تأثیر حضور این بالک‌ها 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 اعماق 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 بدنه اصلی با ملحقات می‌باشد. در پژوهشی در سال ۲۰۲۱ [22] به بررسی اثر محل قرارگیری بالک‌های انتهایی بر روی جریان دنباله ورودی به پروانه 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  $X/L = 0/95$  به عنوان مکان بهینه برای قرارگیری بالک‌های انتهایی به منظور بهبود جریان دنباله ورودی به پروانه از نظر کاهش مساحت کلی و نیز کمترین میزان اغتشاشات و غیریکنواختی انتخاب شده است. در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۲۱ سیف و حسونند [23] با استفاده از نرم افزار matlab برنامه‌ای تهیه کردند که با در نظر گرفتن اطلاعات اولیه ی کاربر، طراحی مفهومی کاربردی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. یک از خروجی‌های این برنامه محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی و شبیه‌سازی مانورهای عملیاتی می‌باشد که براساس الگوریتم‌های طراحی شده سعی گردیده در محدوده‌ی مناسب و بهینه قرار داشته باشند. اردشیری 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 دقت 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 می‌باشند و  $u_i$  و  $p$  نشان‌دهنده نوسان سرعت و فشار هستند. با اضافه نمودن تجزیه رینولدز در معادلات ناویر - استوکس معادله متوسط‌گیری شده رینولدز ناویر - استوکس (RANS<sup>6</sup>) حاصل می‌شود که معادله مذکور مطابق روابط (۸) و (۹) بیان می‌گردد.

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

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

عبارت  $\overline{u_i u_j}$  بیانگر تانسور تنش رینولدز می‌باشد که اثرات آشفتگی را روی تنش میانگین لحاظ می‌کند.

#### ۴- مشخصات هندسی مدل

شناور زیرسطحی مورد بررسی، زیرسطحی سابوف می‌باشد که در موسسه دیوید-تیلور طراحی شده است. آزمایش‌های هیدرودینامیکی در حوضچه کشش این موسسه انجام شده و ضرایب هیدرودینامیکی این شناور به طریق آزمایشگاهی موجود می‌باشد. 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	طول [m]
۰/۵۰۸	D	قطر [m]
۷۰۵/۹	m	جرم [Kg]

جدول ۲ - برخی از مشخصات سطوح کنترلی سابوف

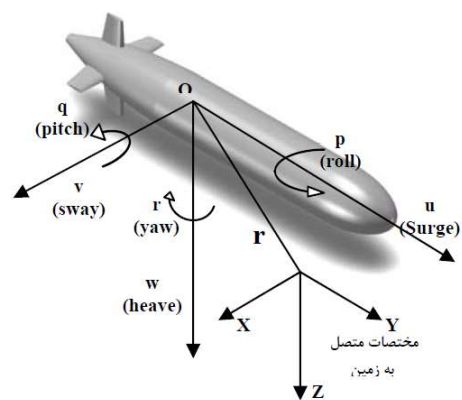
مقدار	کمیت
۰/۱۸۳	طول کورد متوسط [m]
۰/۱۳۴	طول اسپن [m]
۰/۰۲۴۸	مساحت سطح [m <sup>2</sup> ]
-۱/۹۰۲	موقعیت طولی از مرکز ثقل [m]

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

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

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

که در آن X, Y و Z به ترتیب نشان‌دهنده نیروهای سرج، سوی و هیو و M, K, N به ترتیب نشان‌دهنده گشتاورهای رول، پیچ و یاو 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 جهت‌های آن

#### ۳-۲- معادلات حاکم بر دینامیک سیالات محاسباتی

زمانی که بدنه شناور در داخل سیال آب با سرعت بالا حرکت می‌کند جریان اطراف بدنه شناور متلاطم می‌گردد. جریان غیریکنواخت ویسکوز اطراف بدنه یک شناور زیرسطحی توسط معادلات ناویراستوکس مدل می‌شود. معادلات ناویراستوکس هم برای جریان آرام و هم جریان آشفته کاربرد دارد. برای حل جریان آشفته از معادلات متوسط زمانی ناویراستوکس استفاده می‌شود. متداول‌ترین روش در شبیه‌سازی جریان‌های آشفته استفاده از مدل‌های آشفتگی می‌باشد در این مدل‌ها ویژگی‌های جریان آشفته وابسته به زمان حل نمی‌گردد. با استفاده از تجزیه رینولدز، سرعت و فشار لحظه‌ای مطابق روابط (۷) در نظر گرفته می‌شود.

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

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

<sup>6</sup> Reynolds averaged Navier-Stokes



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

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

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

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

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

مقادیر نیروی  $Y$  و گشتاور  $N$  که توسط مدل ایجاد شده در هر زاویه  $\beta$  اندازه گرفته می‌شود. مقادیر به صورت یک منحنی و تابعی از  $v$  ترسیم می‌گردد. در صورتی که مدل ریاضی مورد استفاده یک مدل خطی باشد، با محاسبه شیب 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، ماکزیمم زاویه دریافت ۶ درجه تنظیم شده است؛ بدین معنی که تست مدل با ۳ زاویه دریافت ۰، ۴ و ۶ درجه انجام می‌گیرد. سناریوهای انجام تست دریافت استاتیکی به شرح جدول ۴ می‌باشد:

جدول ۴ - سناریوهای انتخاب شده تست دریافت استاتیکی

سرعت پیشروی (نات)	زوایای دریافت (درجه)	پارامترهای اندازه‌گیری شونده
	۶+	
۶/۵	۴+	نیروی عرضی و ممان یاوینگ
	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 دریافت 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 روبه جلو 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<sup>۷</sup> برای کنترل حرکات عمق و دو صفحه عمودی<sup>۸</sup> 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 دمپینگ و جرم افزوده

ردیف	تست	نوع تست	ضریب قابل استخراج	
			عنوان ضریب	نوع ضریب
۱	دریافت	استاتیکی	$Y_v$	دمپینگ
	استاتیکی		$N_v$	دمپینگ
۲	سوی خالص	دینامیکی	$Y_{\dot{v}}$	جرم افزوده
			$N_{\dot{v}}$	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 (دریافت استاتیکی)

در تست دریافت 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

تست سوی خالص  $\dot{r}$  و  $r$  صفر می‌باشند، 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<sup>۹</sup> و همکاران [28] مقدار فرکانس در تست سوی خالص باید در بازه ۰ تا ۰/۵۳ هرتز قرار داشته باشد. بر همین اساس مقادیر فرکانس‌های شبیه‌سازی‌های پژوهش حاضر ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ هرتز در نظر گرفته شده است. مقدار دامنه تست سوی خالص هم براساس گزارشات و استانداردهای آزمایشگاهی در بازه ۰/۱۵ تا ۰/۵۵ متر قرار دارد که برای پژوهش حاضر مقدار دامنه ۰/۲۵ 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	دامنه حرکت	فرکانس	سرعت
اندازه‌گیری	سوی خالص	حرکت سوی	پیشروی (نات)
شونده	(متر)	خالص (هرتز)	
نیروی عرضی،		۰/۱	
ممان یاوینگ،	۰/۲۵	۰/۲	۶/۵
سرعت و شتاب		۰/۳	

باتوجه به جدول با استدلال مشابه با تست‌های دریافت استاتیکی می‌توان گفت که برای تست‌های سوی خالص هم در مجموع ۱۲ شبیه‌سازی باید انجام بگیرد.

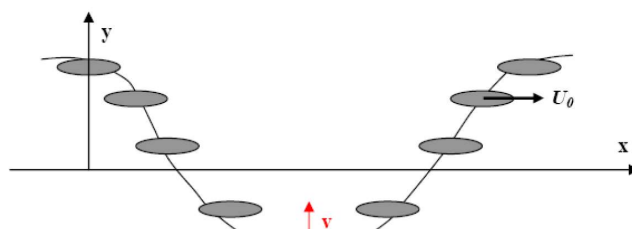
## ۶- فرایند شبیه‌سازی عددی

در پژوهش حاضر از نرم‌افزار Star ccm+ که بر پایه روش حجم محدود می‌باشد، برای تحلیل و شبیه‌سازی‌های عددی آزمون‌های آزمایشگاهی به منظور 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 به‌عنوان نمونه برای یکی از تست‌ها در شکل ۵ نمایش داده شده است. در شبیه‌سازی تست دریافت استاتیکی که فیزیک مسئله به‌صورت 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

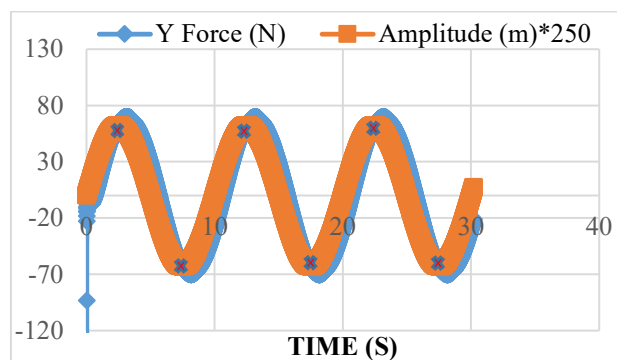
در این تست سرعت و شتاب به‌صورت رابطه (۱۴) نوشته می‌شوند:

$$y = y_0 \sin(\omega t + \varepsilon_y)$$

$$\dot{y} = \omega y_0 \cos(\omega t + \varepsilon_y) \quad (14)$$

$$\ddot{y} = -\omega^2 y_0 \sin(\omega t + \varepsilon_y)$$

که در این معادلات  $y$  دامنه حرکت سوی،  $\omega$  فرکانس حرکت و  $\varepsilon_y$  اختلاف فاز است. در این پژوهش هدف از انجام تست سوی خالص محاسبه ضرایب وابسته به شتاب در جهت سوی، یعنی  $Y_{\dot{v}}$  و  $N_{\dot{v}}$  است که برای این کار کافی است در نقاطی که سرعت صفر است، نیرو و ممان را اندازه‌گیری کرده و سپس محاسبات را انجام دهیم. شکل ۴ موقعیت‌هایی که نیرو و ممان باید اندازه‌گیری شوند را برای بدنه در فرکانس ۰/۱ هرتز به نمایش گذاشته است. در مکان‌هایی که موقعیت عرضی زیرسطحی بیشینه است سرعت صفر می‌شود و در این زمان‌ها، نیرو و ممان اندازه‌گیری 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.

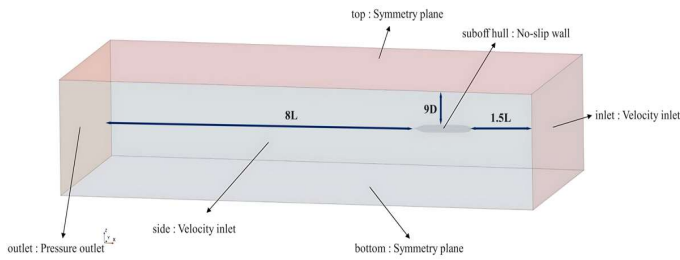


شکل ۴ - نمایش نقاط سرعت صفر برای استخراج نیرو و ممان

در مطالعه عددی حاضر، نیروی محاسبه شده فقط نیروی هیدرودینامیکی است که فرم بدنه عامل ایجاد آن است؛ بنابراین برای به‌دست‌آوردن مشتقات هیدرودینامیکی، فقط به تجزیه‌کردن نیروی هیدرودینامیکی نیاز است. همچنین باتوجه به این که در

<sup>9</sup> Roddy

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



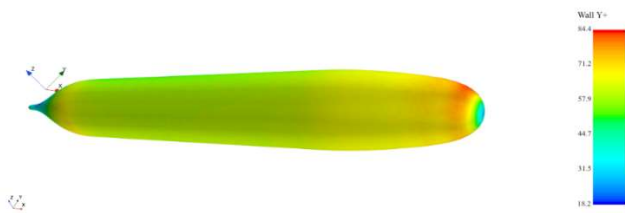
شکل ۶ - شرایط مرزی شبیه سازی و ابعاد دامنه محاسباتی

باتوجه به شرایط مرزی دیواره بدون لغزش برای بدنه زیرسطحی، جریان سیال در نزدیکی بدنه به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد و موجب ایجاد تغییرات زیادی در سرعت سیال می‌گردد. براین اساس در مطالعه حاضر به منظور شبیه‌سازی دقیق جریان در نزدیکی دیواره از تابع دیواره و شبکه‌بندی لایه‌ای منشوری استفاده شده است. مقدار مؤلفه‌های شبکه‌بندی لایه‌ای منشوری بر مبنای مقدار  $y^+$  مطابق رابطه (۱۷) تعیین می‌گردد.

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

که در آن  $y$  فاصله اولین گره تا دیواره،  $\nu$  ویسکوزیته دینامیکی و  $u^*$  سرعت مشخصه جریان آشفته می‌باشد. بر اساس توصیه ITTC مقدار  $y^+$  در جریان‌های آشفته باید بین ۳۰ تا ۳۰۰ باشد [30]. در شبیه‌سازی این مطالعه، مقدار  $y^+$  در اکثر نواحی زیر آب مقداری بین ۳۰ تا ۱۰۰ دارد. در شکل ۷ مقدار  $y^+$  در زاویه دریافت ۶ درجه نمایش داده شده است.

Simcenter STAR-CCM+



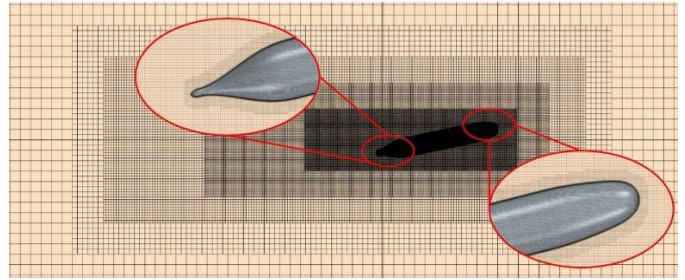
شکل ۷ - اندازه  $y^+$  بر روی سطح بدنه مدل

### ۳-۶- بررسی استقلال نتایج از گام زمانی

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

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

شبیه‌سازی می‌شود؛ اما در تست سوی خالص باتوجه به حرکت داشتن زیرسطحی، از مش دینامیکی استفاده شده است.



شکل ۵ - شبکه بندی شبیه سازی تست‌های مانور زیرسطحی سابوف باتوجه به شرایط مرزی دیواره بدون لغزش برای بدنه زیرسطحی، جریان سیال در نزدیکی بدنه به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد و موجب ایجاد تغییرات زیادی در سرعت سیال می‌گردد. براین اساس در مطالعه حاضر به منظور شبیه‌سازی دقیق جریان در نزدیکی دیواره از تابع دیواره و شبکه‌بندی لایه‌ای منشوری استفاده شده است. برای شبیه‌سازی دقیق جریان در نزدیکی سطح مدل، مش لایه‌مرزی به ضخامت ۲ سانتی‌متر و به تعداد ۱۱ عدد و نرخ رشد  $1/3$  تشکیل شده است.

### ۲-۶- 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 شبیه‌سازی به وجود آید. ابعاد تعیین شده به نوع حرکت شبیه‌سازی شده، انحراف خطوط جریان به واسطه حضور جسم، گردابه‌های تشکیل شده در پشت جسم و غیره بستگی دارد. از آنجایی که سناریوهای انتخاب شده برای اعتبارسنجی، تست‌های آزمایشگاه دیوید تیلور می‌باشد، عرض دامنه محاسباتی برابر با عرض آزمایشگاه دیوید تیلور تنظیم شده است. به‌طور کلی اندازه دامنه محاسباتی را می‌توان باتوجه به دستورالعمل‌های ارائه شده توسط ITTC در سال ۲۰۱۱ [29] تعیین کرد.

همچنین یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در شبیه‌سازی عددی تعیین شرایط مرزی مسئله می‌باشد. مشخص کردن شرایط مرزی به‌منظور حل فرم گسسته معادلات دیفرانسیل در شبیه‌سازی‌های عددی الزامی است. هدف از تعیین شرایط مرزی در شبیه‌سازی‌های دینامیکی سیالات محاسباتی، مقید ساختن فرم گسسته معادلات و همچنین تعیین ویژگی‌های 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  $\epsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1$  و  $\epsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2$  متغیرهای 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 برون‌یابی مطابق روابط (۲۳) تا (۲۵) تعیین شده است.

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

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

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

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

در روابط (۲۴)، (۲۵) و (۲۶) پارامترهای  $e_a^{32}$ ،  $e_{exe}^{32}$  و  $GCI$  به ترتیب بیانگر خطای نسبی تخمینی، خطای نسبی برون‌یابی 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 برحسب متر بر ثانیه و  $L$  طول خیس شده شناور بر حسب متر می‌باشد. براین‌اساس گام زمانی  $0/005$  ثانیه تنظیم شده است.

#### ۴-۶- مدل اغتشاشی

در این مطالعه، مدل دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  برای حل عبارت تنش رینولدز انتخاب شده است. مدل استاندارد  $k-\epsilon$  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 [31]. 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  $k-\epsilon$  می‌تواند اثرات آشفتگی را به‌ویژه آن‌هایی را که برای محاسبه نیروها و ممان‌ها لازم است، به‌درستی ثبت کند. مدل آشفتگی دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  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 [32] نیز مدل‌سازی آشفتگی جریان در اطراف هندسه زیرسطحی سابوف را مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل  $k-\epsilon$  می‌تواند نتایج قابل‌اعتمادتری نسبت به مدل‌های آشفتگی دیگر تولید کند.

#### ۵-۶- مطالعه استقلال از شبکه

روشی که به‌عنوان شاخص همگرایی شبکه ( $GCI$ ) شناخته می‌شود برای بررسی ساختار شبکه استفاده شده که توسط کلیک و همکاران [33] ارائه گردیده است. این روش بر مبنای برون‌یابی ریچارد داوسون [34] عمل می‌کند و خطای گسسته‌سازی را تخمین می‌زند. تحلیل عدم قطعیت برای سناریو دریافت استاتیکی با زاویه دریافت 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  $\Delta m$  و  $V$  بیانگر حجم سلول شبکه  $\Delta m$  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 می باشد.

## ۷- ارائه و بحث بر نتایج عددی

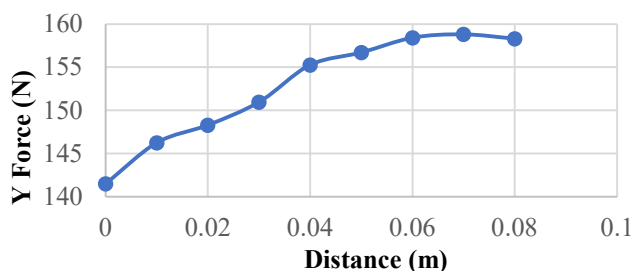
### ۷-۱- بررسی فاصله استقلال سطوح کنترلی از بدنه

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

جدول ۸ - مقادیر نیروی سوی و گشتاور یاو در فواصل مختلف سطوح کنترلی از بدنه

فاصله سطح کنترلی از بدنه [m]	نیروی سوی [N]	گشتاور یاو [N/m]
۰	۱۴۱/۵۱۹	۴۹۸/۳۸۸
۰/۰۱	۱۴۶/۲۶۴	۴۸۹/۲۴۷۸
۰/۰۲	۱۴۸/۳۱۱	۴۸۴/۸۷۹
۰/۰۳	۱۵۰/۹۷۷	۴۷۸/۹۷۳
۰/۰۴	۱۵۵/۲۷	۴۷۰/۲۸
۰/۰۵	۱۵۶/۷۱۸	۴۶۶/۹۴۱
۰/۰۶	۱۵۸/۴۲۱	۴۶۳/۲۸۴
۰/۰۷	۱۵۸/۸۱۸۷	۴۶۲/۰۹۸
۰/۰۸	۱۵۸/۳۲۰۵	۴۶۲/۶۷۱۶

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



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

جدول ۶ - خطای گسسته سازی مولفه‌های هیدرودینامیکی بر مبنای روش GCI

پارامترها	نیروی سرچ	نیروی سوی	گشتاور یاو
$N_1$ (ریز)		۶۱۶۱۰۹۰	
$N_2$ (متوسط)		۲۴۵۵۷۱۶	
$N_3$ (درشت)		۹۶۸۹۲۸	
$\phi_1$	-۹۹/۷۹۱۶۴	۴۶/۴۲۸۷	۴۱۰/۴۱۰۰۹۳۸۴
$\phi_2$	-۱۰۰/۲۶۳۲۵	۴۷/۳۵۴۰۴۶	۴۰۸/۷۵۰۴۹
$\phi_3$	-۱۰۱/۰۵۴۴۵	۴۸/۵۲۳۱۴۷	۴۰۶/۶۲۶۲۷
$P$	۲/۴۸۱۶	۳/۵۶۴۲	۴/۷۳۹۷
$R$	۰/۴۲۸۷	۰/۲۹۴۵	۰/۱۹۶۴
$GCI_{\text{درشت-متوسط}}$	۱/۶۹٪	۰/۷۶٪	۰/۳۱٪
$GCI_{\text{متوسط-ریز}}$	۰/۷۲٪	۰/۲۲٪	۰/۳۱٪

## ۶-۶- 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	CFD	آزمایشگاهی	مقدار خطا
$Y'_v$	-۵/۷۱۶	-۵/۹۵	۳/۹۳٪
$N'_v$	-۱۳/۰۴۸	-۱۲/۸	۱/۹۳۷۵٪
$Y''_v$	-۱۵/۹۲	-۱۳/۳	۱۹/۷٪
$N''_v$	-۰/۳۳	-۰/۴۲	۲۱/۴۲٪

باتوجه به نتایج فوق و خطاهای به دست آمده، می توان به این نتیجه رسید که شبیه سازی عددی دارای دقت و اطمینان مناسبی می باشد. 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. درحالی که در پژوهش حاضر محدوده خطای

**جدول ۱۱ - مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و ممان برای حالت بدنه و**

**سطوح کنترلی در فاصله ۰/۰۴ متر در شبیه سازی عددی**

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

**جدول ۱۲ - مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و ممان برای حالت بدنه و**

**سطوح کنترلی در فاصله ۰/۰۶ متر در شبیه سازی عددی**

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

پس از به دست آوردن نیروها و گشتاورها، ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی سابوف در تست دریافت استاتیکی در فاصله مربوطه سطوح کنترلی از بدنه 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 دریافت**

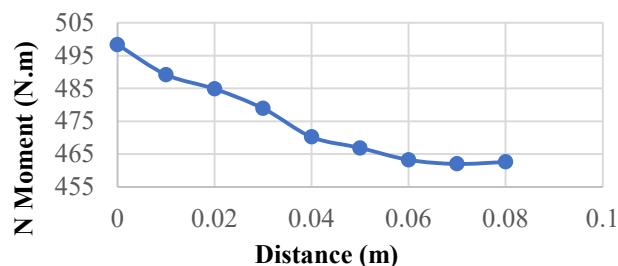
**استاتیکی بر اساس فاصله سطوح کنترلی از بدنه زیرسطحی**

فاصله سطوح کنترلی از بدنه زیرسطحی [m]	مقدار ضریب $Y_v$ [Kg/s]	مقدار ضریب $N_v$ [Kg. $\frac{m}{s}$ ]
۰	-۳۸۸/۶۹	-۱۴۶۶/۶
۰/۰۲	-۴۱۴/۹۱	-۱۴۱۵/۵
۰/۰۴	-۴۳۴/۰۶	-۱۳۷۵/۴
۰/۰۶	-۴۴۳/۸۷	-۱۳۵۴

**جدول ۱۴ - مقدار ضرایب هیدرودینامیکی بدون بعد تست دریافت**

**استاتیکی بر اساس فاصله سطوح کنترلی از بدنه زیرسطحی**

فاصله سطوح کنترلی از بدنه زیرسطحی [m]	مقدار ضریب $Y'_v$ ( $\times 10^{-2}$ )	مقدار ضریب $N'_v$ ( $\times 10^{-2}$ )
۰	-۱۲/۲۹	-۱۰/۶۵
۰/۰۲	-۱۳/۱۲	-۱۰/۲۷
۰/۰۴	-۱۳/۷۲	-۹/۹۸
۰/۰۶	-۱۴/۰۳	-۹/۸۳



**شکل ۹ - نمودار گشتاور یاو بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدنه**

باتوجه به نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که نیروی سوی و گشتاور یاو وارد بر زیرسطحی از فاصله ۰/۰۶ متر به بعد، تقریباً مستقل از فاصله سطوح کنترلی از بدنه شده است. در نتیجه فاصله ۰/۰۶ متر به عنوان بیشینه فاصله سطوح کنترلی از زیرسطحی در نظر گرفته می‌شود و شبیه‌سازی‌های موجود در این پژوهش در فاصله‌های ۰، ۰/۰۲، ۰/۰۴ و ۰/۰۶ متر سطوح کنترلی از بدنه زیرسطحی انجام می‌شود.

**۲-۷- نتایج تست دریافت استاتیکی**

تست دریافت استاتیکی سابوف در شبیه‌سازی‌ها، طبق تست‌های انجام شده در آزمایشگاه دیوید تیلور بوده که در تست دریافت استاتیکی آن، مدل با سرعت ۶/۵ نات توسط ارا به رو به جلو کشیده می‌شود. در این قسمت شبیه سازی برای ۴ فاصله بالک از بدنه انجام شد که این فواصل شامل ۰، ۰/۰۲، ۰/۰۴ و ۰/۰۶ متر می باشد. مقادیر نیرو و گشتاور برای فاصله‌های مختلف بدنه و سطوح کنترلی در جداول ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است.

**جدول ۹ - مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و ممان برای حالت بدنه و**

**سطوح کنترلی در فاصله صفر در شبیه سازی عددی**

زوایای دریافت (درجه)	سرعت در راستای سوی [m/s]	نیروی سوی [N]	گشتاور یاو [N.m]
۲+	-۰/۱۱۵۶۹۲	۳۷/۰۹۷	۱۸۱/۴۱
۴+	-۰/۲۳۱۲۴۳	۸۳/۵۸۱	۳۴۷/۹۳۸
۶+	-۰/۳۴۶۵۱۲	۱۴۱/۵۱۹	۴۹۸/۳۸۸

**جدول ۱۰ - مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و ممان برای حالت بدنه و**

**سطوح کنترلی در فاصله ۰/۰۲ متر در شبیه سازی عددی**

زوایای دریافت (درجه)	سرعت در راستای سوی [m/s]	نیروی سوی [N]	گشتاور یاو [N.m]
۲+	-۰/۱۱۵۶۹۲	۴۲/۷۰۲	۱۷۰/۸۰۹
۴+	-۰/۲۳۱۲۴۳	۹۱/۷۹۳	۳۳۲/۱۹۵
۶+	-۰/۳۴۶۵۱۲	۱۴۸/۳۱۱	۴۸۴/۸۷۹

**جدول ۱۸ - مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و ممان برای حالت بدنه و**

**سطوح کنترلی در فاصله ۰/۰۶ متر در شبیه سازی عددی**

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

پس از به دست آوردن نیروها و گشتاورها، تمامی ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی سابوف در تست سوی خالص در فاصله مربوطه سطوح کنترلی از بدنه 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 بدنه زیرسطحی**

فاصله سطوح کنترلی از بدنه زیرسطحی $[m]$	مقدار ضریب $Y_p$	مقدار ضریب $N_p$
۰	-۷۳۲/۱	۸۰/۳۴
۰/۰۲	-۶۷۲/۸۶	-۲۵/۰۰۷
۰/۰۴	-۶۵۹/۲	-۴۷/۶۶
۰/۰۶	-۶۵۰/۷	-۶۲/۴۱

**جدول ۲۰ - مقدار ضرایب هیدرودینامیکی بدون بعد تست سوی خالص**

**بر اساس فاصله سطوح کنترلی از بدنه زیرسطحی**

فاصله سطوح کنترلی از بدنه زیرسطحی $[m]$	مقدار ضریب $(\times 10^{-2}) Y'_p$	مقدار ضریب $(\times 10^{-2}) N'_p$
۰	-۱۷/۷۷	۰/۴۴۸
۰/۰۲	-۱۶/۳۳	-۰/۱۴
۰/۰۴	-۱۶	-۰/۲۶۶
۰/۰۶	-۱۵/۷۹	-۰/۳۴۷۷

با استخراج ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به تست سوی خالص مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدنه، مقدار ضریب  $Y_p$  کاهش و مقدار ضریب  $N_p$  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 بدنه و روش محاسبه مستقیم حالت ترکیبی بدنه و سطوح کنترلی پرداخته خواهد شد.

**۱-۴-۷ - ضرایب هیدرودینامیکی میرایی**

با استفاده از ضرایب به دست آمده میزان تاثیر فاصله سطوح کنترلی با بدنه بر روی مقدار ضرایب هیدرودینامیکی بی‌بعد شده سنجیده

با استخراج ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به تست دریافت استاتیکی مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدنه، مقدار ضریب  $Y_p$  افزایش و مقدار ضریب  $N_p$  کاهش می‌یابد.

**۳-۷ - نتایج تست سوی خالص**

تست سوی خالص مرجع در فرکانس حرکتی ثابت برابر ۰/۳۵۳ هرتز و در سرعت پیشروی ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۵ نات انجام شده است که در این مطالعه باتوجه به استفاده از رگراسیون خطی برای استخراج ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به حرکت سوی، تنها سرعت پیشروی ۰/۵ نات مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این قسمت نیز شبیه‌سازی برای ۴ فاصله بالک از بدنه 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 بدنه و سطوح کنترلی در فرکانس‌های مختلف تست سوی خالص استخراج شده است و در جداول ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸ ارائه شده است.

**جدول ۱۵ - مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و ممان برای حالت بدنه و**

**سطوح کنترلی در فاصله صفر در شبیه سازی عددی**

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

**جدول ۱۶ - مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و ممان برای حالت بدنه و**

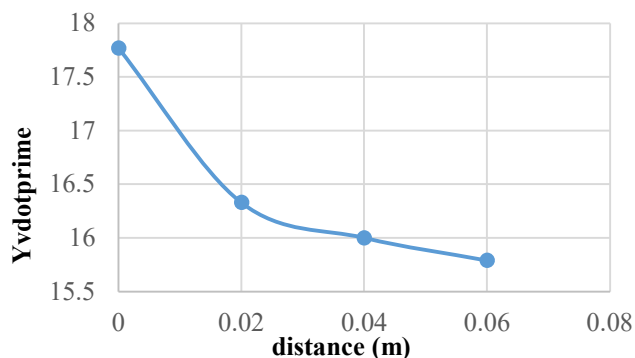
**سطوح کنترلی در فاصله ۰/۰۲ متر در شبیه سازی عددی**

فرکانس (هرتز)	شتاب در راستای سوی $[m/s^2]$	نیروی سوی $[N]$	گشتاور یاو $[N.m]$
۰/۱	۰/۰۹۸۷	-۶۶/۸۳۱۵	-۲/۰۷۱۸۳
۰/۲	۰/۳۹۴۷۸	-۲۶۹/۰۴	-۷/۲۸۴۲۲
۰/۳	۰/۸۸۸۲۶	-۵۹۵/۷۱۶	-۲۳/۰۱۷۶

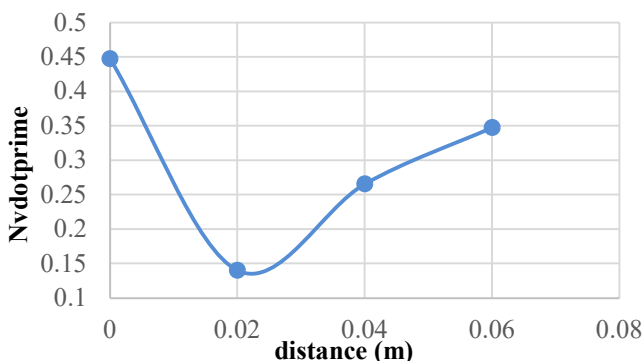
**جدول ۱۷ - مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و ممان برای حالت بدنه و**

**سطوح کنترلی در فاصله ۰/۰۴ متر در شبیه سازی عددی**

فرکانس (هرتز)	شتاب در راستای سوی $[m/s^2]$	نیروی سوی $[N]$	گشتاور یاو $[N.m]$
۰/۱	۰/۰۹۸۷	-۶۵/۴۶۵	-۴/۹۵۸۲۲
۰/۲	۰/۳۹۴۷۸	-۲۶۲/۸۲۱	-۱۷/۶۳۴۱
۰/۳	۰/۸۸۸۲۶	-۵۸۴/۱۳۷	-۴۲/۶۰۲۱



شکل ۱۲ - نمودار ضریب هیدرودینامیکی  $Y'_{\dot{v}}$  بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدنه

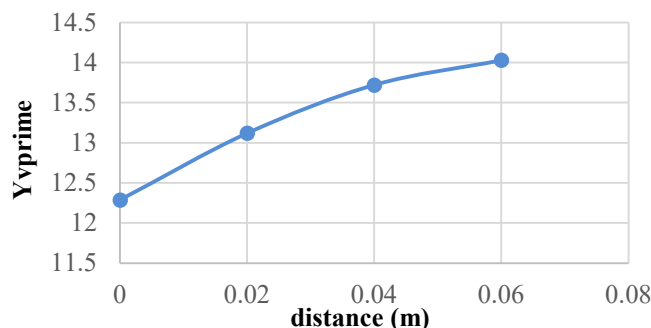


شکل ۱۳ - نمودار ضریب هیدرودینامیکی  $N'_{\dot{v}}$  بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدنه

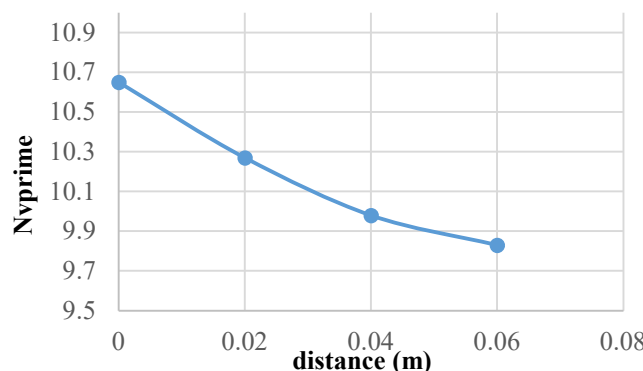
باتوجه به نمودارهای شکل ۱۲ و شکل ۱۳ نیز می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدنه، مقدار قدرمطلق ضریب هیدرودینامیکی  $Y'_{\dot{v}}$  کاهش یافته و نمودار به صورت نزولی می‌باشد. اما مقادیر ضریب هیدرودینامیکی  $N'_{\dot{v}}$  در ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش یافته و به صورت صعودی می‌باشد. افزایش یا کاهش ضرایب هیدرودینامیکی نسبت به تغییرات فاصله بدنه 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 یاو ممکن است مؤثر باشد. معمولاً به علت هندسه زیردریایی، مرکز فشار به سمت جلو متمایل می‌باشد. هنگامی که سطوح کنترلی به زیردریایی افزوده می‌شوند و به صورت چسبیده به بدنه قرار می‌گیرند، تمرکز فشار قوی ایجاد می‌شود که باعث می‌شود مرکز فشار به سمت پاشنه زیردریایی بیاید. اما با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدنه تمرکز فشار کمتر می‌شود و مرکز فشار دوباره به سمت جلو می‌رود. به همین دلیل می‌توان گفت که تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی گشتاورهای یاو صرفاً به

شده است. نمودار ضرایب هیدرودینامیکی  $Y'_{\dot{v}}$  و  $N'_{\dot{v}}$  بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدنه به ترتیب در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ آورده شده است. به علت بررسی دقیق روند نمودارها، قدرمطلق مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی قرارداد شده است.



شکل ۱۰ - نمودار ضریب هیدرودینامیکی  $Y'_{\dot{v}}$  بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدنه



شکل ۱۱ - نمودار ضریب هیدرودینامیکی  $N'_{\dot{v}}$  بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدنه

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

#### ۷-۴-۱- ضرایب هیدرودینامیکی جرم افزوده

نمودار ضرایب هیدرودینامیکی  $Y'_{\dot{v}}$  و  $N'_{\dot{v}}$  بر حسب فاصله سطوح کنترلی از بدنه 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 قرارداد 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. Hydrodyn.*, vol. 24, no. 6, pp. 840–847, 2012, doi: 10.1016/S1001-6058(11)60311-9.
- [14] S. He, P. Kellett, Z. Yuan, A. Incecik, O. Turan, and E. Boulougouris, “Manoeuvring prediction based on CFD generated derivatives,” *J. Hydrodyn.*, 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 یاو باشد.

## ۸- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، به منظور مطالعه اثر فاصله بین سطوح کنترلی از بدنه بر تعدادی از ضرائب هیدرودینامیکی خطی مانور زیرسطحی معیار سابوف، ضرائب خطی حاصل از تست‌های دریافت 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  $k - \epsilon$  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  $0/06$  متر اتفاق می‌افتد. تا قبل از این فاصله، در تست دریافت استاتیکی با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدنه، مقدار ضریب  $Y_v$  افزایش و مقدار ضریب  $N_v$  کاهش می‌یابد. درحالیکه در تست سوی خالص نیز با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدنه، مقدار ضریب  $Y_v$  کاهش و مقدار ضریب  $N_v$  افزایش می‌یابد. بطور کلی می‌توان گفت استفاده از روش‌های رگرسیون برای محاسبه ضرائب 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 ضرائب 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. Atsavaprane, 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/JSFM.2019.8095.2841.
- 10.1016/j.oceaneng.2018.06.063.
- [16] 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/JSFM.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,” *Brodogr. Teor. i praksa Brodogr. 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. Hasanvand, “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