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

علیرضا پاژن[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

اطلاعات مقاله

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 بدنه
شبیه‌سازی عددی
تست دریفت استاتیکی
تست سوی خالص

چکیده

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 رگراسیونی برای محاسبه ضرائب 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 موردمطالعه 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 دریفت 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.

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

AliReza Pazhan[1],Amin Najafi[2], AliAsghar Moghaddas[3*]

[1] MSc in mechanical engineering, Imam Hossein Comprehensive University; alirezapazhan@yahoo.com
[2] Academic Sttaf, Imam Hossein Comprehensive University; Najafi.sharif@yahoo.com
[3] 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,

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.27]

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 زیردریایی ها در نزدیک بستر دریا ضرورت طراحی کنترلر دقیق برای آن ها را افزایش می دهد. همچنین توسعه روز افزون زیرسطحی‌های هوشمند و کنترل از راه دور نیز ضرورت محاسبه دقیق ضرائب هیدرودینامیکی مانور را جهت طراحی کنترلرهای 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 (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[1][3]، هوچبوم[2][4] و آلساندرینی[3] [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 غیراینرسی، مانند مکانیسم حرکت مسطح (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[4] 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 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 می یابند. یاژینگ وانگ[5] 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 به طور 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 تاحدامکان 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 اندازهٔ لایه‌مرزی برخوردکننده به

[1] Ohmori
[2] Hochbaum
[3] Alessandrini
[4] Philips
[5] Yaxing Wang

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.27]

آن‌ها تغییر می‌کند، در نتیجه جریان دنبله 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 به‌منظور پیش‌بینی مانورپذیری و محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی میرایی وابسته به‌سرعت شناور زیرسطحی هوشمند (AUV) پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که ضرایب میرایی وابسته به‌سرعت عرضی خطی تحت‌تأثیر حضور این بالک‌ها قرار می‌گیرند. این اثر تقریباً برای همه نوع سطوح کنترلی یکسان است و ضخامت سطوح کنترلی تأثیر قابل‌توجهی 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 اضافه‌کردن 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 دنبله ورودی به پرولنه 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 $x/L = ۰/۹۵$ به‌عنوان مکان بهینه برای قرارگیری بالک‌های انتهایی به منظور بهبود جریان دنبله ورودی به پرولنه از نظر کاهش مساحت کلی و نیز کمترین میزان اغتشاشات و غیریکنواختی انتخاب شده است. در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۲۱ سیف و حسنوند [23] با استفاده از نرم افزار matlab برنامه ای تهیه کردند که با در نظر گرفتن اطلاعات اولیه ی کاربر، طراحی مفهومی کاربردی را در اختیار کاربر قرار می دهد. یک از خروجی-های این برنامه محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی و شبیه سازی مانورهای عملیاتی می باشد که براساس الگوریتم های 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.

۲ – تعریف مسئله

امروزه محاسبه دقیق ضرایب هیدرودینامیکی به‌منظور 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 درنتیجه مدل ریاضی مورداستفاده، به تجربه طراح بستگی دارد [26]. درصورتی‌که تغییرات نیرو نسبت به متغیر مؤثر بر نیرو به‌صورت 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]:

$$X = X_u u + X_v v + X_p p + X_q q + X_r r + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{\dot{v}}\dot{v} + X_{\dot{w}}\dot{w} + X_{\dot{p}}\dot{p} + X_{\dot{q}}\dot{q} + X_{\dot{r}}\dot{r} \quad (۱)$$

$$Y = Y_u u + Y_v v + Y_p p + Y_q q + Y_r r + Y_{\dot{u}}\dot{u} + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{w}}\dot{w} + Y_{\dot{p}}\dot{p} + Y_{\dot{q}}\dot{q} + Y_{\dot{r}}\dot{r} \quad (۲)$$

$$Z = Z_u u + Z_v v + Z_p p + Z_q q + Z_r r + Z_{\dot{u}}\dot{u} + Z_{\dot{v}}\dot{v} + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{p}}\dot{p} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{\dot{r}}\dot{r} \quad (۳)$$

$$K = K_u u + K_v v + K_p p + K_q q + K_r r \quad (۴)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

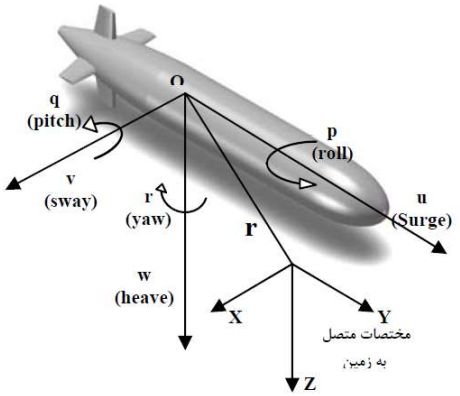
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.27]

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

$$\begin{aligned} M &= M_u u + M_v v + M_p p + M_q q + M_r r \\ &+ M_{\dot{u}}\dot{u} + M_{\dot{v}}\dot{v} + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{p}}\dot{p} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{\dot{r}}\dot{r} \end{aligned} \quad (۵)$$

$$\begin{aligned} N &= N_u u + N_v v + N_p p + N_q q + N_r r \\ &+ N_{\dot{u}}\dot{u} + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{w}}\dot{w} + N_{\dot{p}}\dot{p} + N_{\dot{q}}\dot{q} + N_{\dot{r}}\dot{r} \end{aligned} \quad (۶)$$

که در آن X، Y و Z به ترتیب نشان‌دهنده نیروهای سرج، سوی و هیو و K، M و N به ترتیب نشان‌دهنده گشتاورهای رول، پیچ و یاو هستند. نام حرکت در هر جهت و چارچوب مرجع بدنه ثابت نیز در شکل ۱ نمایش‌داده‌شده 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.

$$\begin{aligned} U_i &= \bar{U}_i + u_i \\ P &= \bar{P} + p \end{aligned} \quad (۷)$$

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[6]) حاصل می‌شود که معادله مذکور مطابق روابط (۸) و (۹) بیان می‌گردد.

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\bar{u}_i\bar{u}_j + \rho\overline{u_i'u_j'}\right) = \frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \rho g_i + \mu\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}\right) \quad (۸)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (۹)$$

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

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

جدول ۲ - برخی از مشخصات سطوح کنترلی سابوف

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

[6] Reynolds averaged Navier-Stokes

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.27]

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[7] برای کنترل حرکات عمق و دو صفحه عمودی[8] برای حرکات جانبی می‌باشد.

۵- سناریو تحلیل عددی

از میان تست‌های مختلف انجام شده در منابع مختلف برای بدنه سابوف، تست‌های ذکرشده 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 جرم‌افزوده

ردیف	تست	نوع تست	ضریب قابل استخراج	
			عنوان ضریب	نوع ضریب
۱	دریفت استاتیکی	استاتیکی	Y_v	دمپینگ
			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 به‌صورت 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 این آزمایش مدل در یک تانک کشش با زاویه دریفت به ارابه 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 y می‌گردد. با توجه به مؤلفه عرضی سرعت، شرایط و معادلات حاکم بر این تست عبارت‌اند از روابط (۱۰) تا (۱۳):

$$v = V_0 sin\beta \qquad (۱۰)$$

$$X_M = X_0 + X_{vv} \times v^2 + X(u) \qquad (۱۱)$$

$$Y_M = Y_0 + Y_v \times v + \begin{Bmatrix} Y_{vvv} \times v^3 \\ Y_{v|v|} \times v|v| \end{Bmatrix} \qquad (۱۲)$$

$$N_M = N_0 + N_v \times v + \begin{Bmatrix} N_{vvv} \times v^3 \\ N_{v|v|} \times v|v| \end{Bmatrix} \qquad (۱۳)$$

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

ازآنجایی‌که در پژوهش حاضر هدف استخراج ضرایب هیدرودینامیکی خطی می‌باشد، ماکزیمم 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

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

باتوجه‌به جدول ۴ و باتوجه‌به این که در ۴ فاصله سطوح‌کنترلی از بدنه شبیه سازی صورت می‌گیرد، در مجموع می توان گفت که برای تست دریفت استاتیکی ۱۲ شبیه سازی باید انجام بگیرد.

۵-۲- تست دینامیکی (سوی خالص)

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

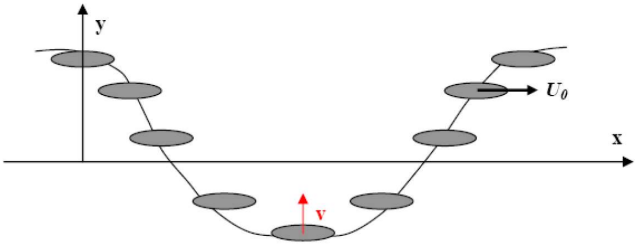
[7] stern

[8] rudder

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.27]

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

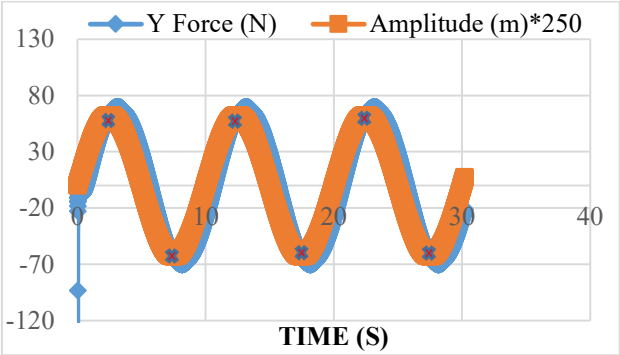


شکل ۳ - وضعیت مانور مدل در تست سوی خالص

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

$$y = y_0 \sin(\omega t + \varepsilon_y)$$
$$\dot{y} = \omega y_0 \cos(\omega t + \varepsilon_y) \qquad (۱۴)$$
$$\ddot{y} = -\omega^2 y_0 \sin(\omega t + \varepsilon_y)$$

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 محاسبه ضرایب وابسته به شتاب در جهت سوی، یعنی $Y_{\dot{v}}$ و $N_{\dot{v}}$ 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 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 می شود.



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 باتوجه‌به این که در تست سوی خالص r و $\dot{r}$ صفر می‌باشند، نیرو و ممان به صورت روابط (۱۵) و (۱۶) نوشته می‌شوند:

$$Y_M = -Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_v v \qquad (۱۵)$$

$$N_M = -N_{\dot{v}}\dot{v} + N_v v \qquad (۱۶)$$

بر اساس پژوهش رودی[9] و همکاران [28] مقدار فرکانس در تست سوی خالص باید در بازه ۰ تا ۰/۵۳ هرتز قرار داشته باشد. بر همین اساس مقادیر فرکاس‌های شبیه سازی‌های 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

سرعت پیشروی (نات)	فرکانس حرکت سوی خالص (هرتز)	دامنه حرکت سوی خالص (متر)	پارامترهای اندازه‌گیری شونده
۶/۵	۰/۱	۰/۲۵	نیروی عرضی، ممان یاوینگ، سرعت و شتاب
	۰/۲		
	۰/۳		

باتوجه‌به جدول با استدلال مشابه با تست‌های دریفت استاتیکی می توان 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.

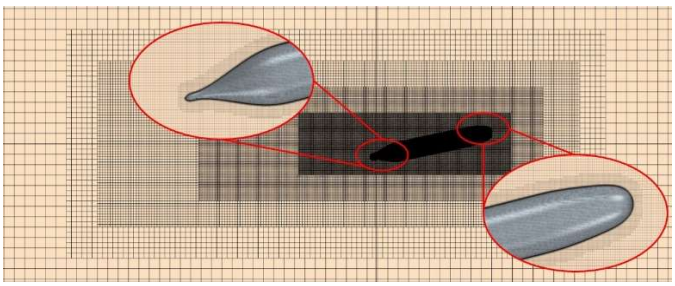
۶-۱- ساختار شبکه

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 به‌عنوان نمونه برای یکی از تست‌ها در شکل ۵ نمایش‌داده‌شده است. در شبیه‌سازی تست دریفت استاتیکی که فیزیک مسئله به‌صورت پایا تعریف می‌شود، شبکه حرکتی ثابت دارد و حرکت روبه‌جلو مدل توسط جریان ورودی

[9] Roddy

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.27]

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



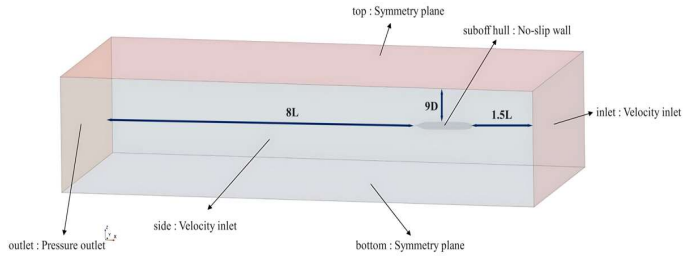
شکل ۵ - شبکه بندی شبیه سازی تست‌های مانور زیرسطحی سابوف

باتوجه‌به شرایط مرزی دیواره بدون لغزش برای بدنه زیرسطحی، جریان سیال در نزدیکی بدنه به‌شدت تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد و موجب ایجاد تغییرات زیادی در سرعت سیال می‌گردد. براین‌اساس در مطالعه حاضر به‌منظور 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 ۱/۳ تشکیل شده است.

۶-۲- 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 قرارگرفته حول جسم به صورتی در نظر گرفته شده است که شرایط آب عمیق برای شبیه‌سازی به وجود آید. ابعاد تعیین شده به نوع حرکت شبیه‌سازی‌شده، انحراف خطوط جریان به‌واسطه حضور جسم، گردابه‌های تشکیل شده در پشت جسم و غیره بستگی دارد. ازآنجایی‌که سناریوهای انتخاب شده برای اعتبارسنجی، تست-های آزمایشگاه دیوید تیلور می‌باشد، عرض دامنه محاسباتی برابر با عرض آزمایشگاه دیوید تیلور تنظیم شده است. به‌طورکلی اندازه دامنه محاسباتی را می‌توان باتوجه‌به دستورالعمل‌های ارائه شده توسط ITTC در سال ۲۰۱۱ [29] تعیین کرد.

همچنین یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در شبیه‌سازی عددی تعیین شرایط مرزی مسئله می‌باشد. مشخص‌کردن 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 می‌باشد. ابعاد دامنه محاسباتی و شرایط مرزی حل عددی در شکل ۶ نشان‌داده‌شده است.

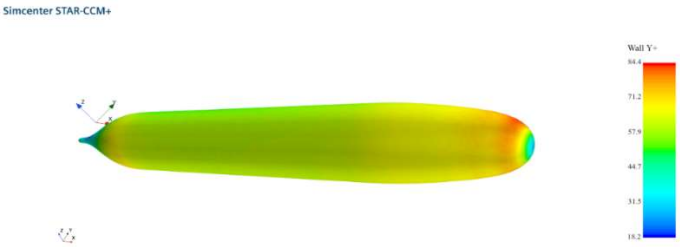


شکل ۶ - شرایط مرزی شبیه سازی و ابعاد دامنه محاسباتی

باتوجه‌به شرایط مرزی دیواره بدون لغزش برای بدنه زیرسطحی، جریان سیال در نزدیکی بدنه به‌شدت تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد و موجب ایجاد تغییرات زیادی در سرعت سیال می‌گردد. براین‌اساس در مطالعه حاضر به‌منظور 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.

$$y^+ = \frac{y.u^*}{\nu} \qquad (۱۷)$$

که در آن y فاصله اولین گره تا دیواره، ν 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 دریفت ۶ درجه نمایش‌داده‌شده است.



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

۶-۳- 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.

$$\Delta t = 0.01 \sim 0.005 \frac{L}{V} \qquad (۱۸)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.27]

در رابطه (۱۸)، V بیانگر سرعت شناور برحسب متر بر ثانیه و L طول خیس شده شناور بر حسب متر می‌باشد. براین‌اساس گام زمانی ۰/۰۰۵ ثانیه تنظیم شده است.

۶-۴- مدل اغتشاشی

در این مطالعه، مدل دو معادله‌ای k-ε برای حل عبارت تنش رینولدز انتخاب شده است. مدل استاندارد k-ε پیش‌بینی خوبی برای جریان‌های آزاد با گرادیان‌های فشار کوچک ارائه می‌دهد. مدل مذکور بر این فرض استوار است که جریان کاملاً متلاطم است؛ ازاین‌رو 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-ε می‌تواند اثرات آشفتگی را به‌ویژه آن‌هایی را که برای محاسبه نیروها و ممان‌ها لازم است، به‌درستی ثبت کند. مدل آشفتگی دو معادله‌ای k-ε همراه با توابع دیواره استاندارد برای شبیه‌سازی اثرات آشفته‌ای که نیاز به تولید مش باتوجه‌به 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-ε می‌تواند نتایج قابل‌اعتمادتری نسبت به مدل‌های آشفته دیگر تولید کند.

۶-۵- 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 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.

$$h_i = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n} V_i\right]^{\frac{1}{3}} \qquad (۱۹)$$

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

$$\frac{h_i}{h_{i+1}} > 1.3 \qquad (۲۰)$$

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

$$p_{avg} = \frac{1}{\ln(r_{21})}\ |\ln|\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}| + q(p)| \qquad (۲۱)$$

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

$$q(p) = \ln\left(\frac{r_{21}^{p} - s}{r_{32}^{p} - s}\right) \qquad (۲۲)$$

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 ۱/۴۱ تعیین شده‌اند. خطای نسبی برون‌یابی مطابق روابط (۲۳) تا (۲۵) تعیین شده است.

$$\varphi_{txt}^{32} = \frac{\left(r_{21}^{p_{avg}}\varphi_1 - \varphi_2\right)}{\left(r_{21}^{p} - 1\right)} \qquad (۲۳)$$

$$e_a^{32} = \left|\frac{\varphi_2 - \varphi_3}{\varphi_2}\right| \qquad (۲۴)$$

$$e_{exe}^{32} = \left|\frac{\varphi_{ext}^{23} - \varphi_3}{\varphi_{ext}^{23}}\right| \qquad (۲۵)$$

$$GCI_{fine}^{32} = \frac{1.25 e_a^{32}}{r_{32}^{p_{avg}} - 1} \qquad (۲۶)$$

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 هگرایی 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.27]

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

پارامترها	نیروی سرج	نیروی سوی	گشتاور یاو
N_1 (ریز)		۶۱۶۱۰۹۰	
N_2 (متوسط)		۲۴۵۵۷۱۶	
N_3 (درشت)		۹۶۸۹۲۸	
ϕ_1	- ۹۹/۷۹۱۶۴	۴۶/۴۲۸۷	۴۱۰/۴۱۰۰۹۳۸۴
ϕ_2	- ۱۰۰/۲۶۳۲۵	۴۷/۳۵۴۰۴۶	۴۰۸/۷۵۰۴۹
ϕ_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 به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی 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	مقدار ضرایب هیدرودینامیکی بدنه زیرسطحی ($\times 10^{-3}$)		
	CFD	آزمایشگاهی	مقدار خطا
Y'_v	-۵/۷۱۶	-۵/۹۵	۳/۹۳ ٪
N'_v	-۱۳/۰۴۸	-۱۲/۸	۱/۹۳۷۵ ٪
$Y'_{\dot{v}}$	-۱۵/۹۲	-۱۳/۳	۱۹/۷ ٪
$N'_{\dot{v}}$	-۰/۳۳	-۰/۴۲	۲۱/۴۲ ٪

باتوجه‌به نتایج فوق و خطاهای به‌دست‌آمده، می‌توان به این نتیجه رسید که شبیه‌سازی 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 محدودهٔ ۰/۸ تا ۱۲ درصد بود. این اختلاف در ضرایب جرم افزوده در محدودهٔ ۰/۸ تا ۳۷ درصد بود که نشان از تطبیق خوب روش عددی با آزمایشگاهی دارد. درحالی‌که در پژوهش حاضر محدوده خطای 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

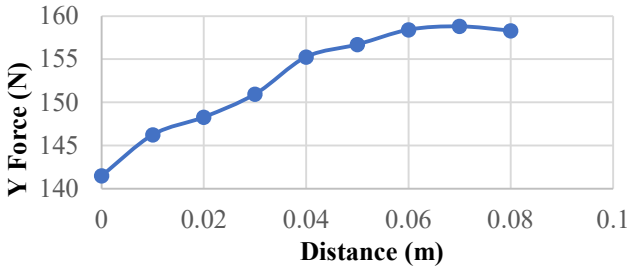
۷-۱- بررسی فاصله استقلال سطوح کنترلی از بدنه

برای به‌دست‌آوردن فاصله بیشینه سطوح کنترلی از بدنه 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 بدنه) تا ۰/۰۸ 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 شبیه‌سازی 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

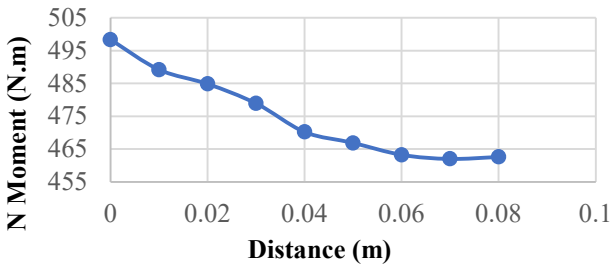
فاصله سطح کنترلی از بدنه $[m]$	نیروی سوی $[N]$	گشتاور یاو $[N/m]$
۰	۱۴۱/۵۱۹	۴۹۸/۳۸۸
۰/۰۱	۱۴۶/۲۶۴	۴۸۹/۲۴۷۸
۰/۰۲	۱۴۸/۳۱۱	۴۸۴/۸۷۹
۰/۰۳	۱۵۰/۹۷۷۱	۴۷۸/۹۷۳
۰/۰۴	۱۵۵/۲۷	۴۷۰/۲۸
۰/۰۵	۱۵۶/۷۱۸۱	۴۶۶/۹۴۱۱
۰/۰۶	۱۵۸/۴۲۱	۴۶۳/۲۸۴
۰/۰۷	۱۵۸/۸۱۸۷	۴۶۲/۰۹۸
۰/۰۸	۱۵۸/۳۲۰۵	۴۶۲/۶۷۱۶

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 برحسب فاصله سطوح کنترلی از بدنه در شکل ۹ ترسیم شده است.



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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.27]



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

باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده 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 به‌عنوان 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.

۷-۲- نتایج تست دریفت استاتیکی

تست دریفت استاتیکی سابوف در شبیه‌سازی‌ها، طبق تست‌های انجام شده در آزمایشگاه دیوید تیلور بوده که در تست دریفت استاتیکی آن، مدل با سرعت ۶/۵ نات توسط ارابه 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 اندازه‌گیری‌شده نیرو و ممان برای حالت بدنه و سطوح کنترلی در فاصله صفر در شبیه سازی عددی

زوایای دریفت (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 اندازه‌گیری‌شده نیرو و ممان برای حالت بدنه و سطوح کنترلی در فاصله ۰/۰۲ متر در شبیه سازی عددی

زوایای دریفت (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 ۱۱ - مقادیر اندازه‌گیری‌شده نیرو و ممان برای حالت بدنه و سطوح کنترلی در فاصله ۰/۰۴ متر در شبیه سازی عددی

زوایای دریفت (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 اندازه‌گیری‌شده نیرو و ممان برای حالت بدنه و سطوح کنترلی در فاصله ۰/۰۶ متر در شبیه سازی عددی

زوایای دریفت (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 دریفت 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 دریفت 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 دریفت استاتیکی بر اساس فاصله سطوح کنترلی از بدنه زیرسطحی

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.27]

با استخراج ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به تست دریفت استاتیکی مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدنه، 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 باتوجه به استفاده از رگراسیون 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 بدنه انجام شد که این فواصل شامل ۰، ۰/۰۲، ۰/۰۴ و ۰/۰۶ متر می باشد. 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 اندازه‌گیری‌شده 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 اندازه‌گیری‌شده 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 اندازه‌گیری‌شده 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	-۱۷/۶۲۴۱
۰/۳	۰/۸۸۸۲۶	-۵۸۴/۱۳۷	-۴۲/۶۰۲۱

جدول ۱۸ - مقادیر اندازه‌گیری‌شده 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 بدون‌بعد 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 $Y_{\dot{v}}$ $[Kg]$	مقدار ضریب $N_{\dot{v}}$ $[Kg.m]$
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 $(\times 10^{-3})\ Y'_{\dot{v}}$	مقدار ضریب $(\times 10^{-3})\ N'_{\dot{v}}$
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 $Y_{\dot{v}}$ کاهش و مقدار ضریب $N_{\dot{v}}$ افزایش می‌یابد.

۷-۴- 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.

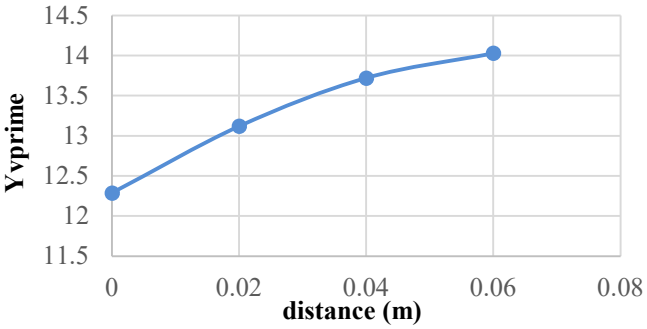
۷-۴-۱- ضرایب هیدرودینامیکی میرایی

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

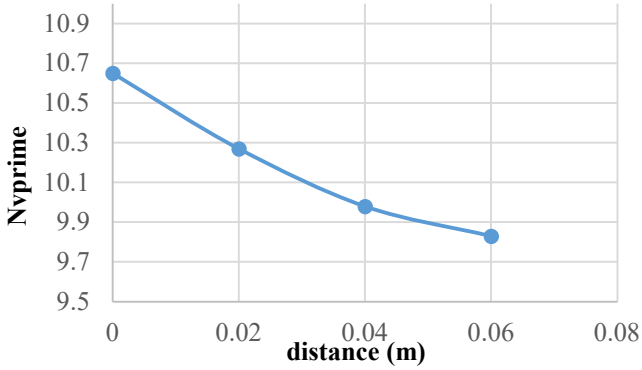
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.27]

شده است. نمودار ضرایب هیدرودینامیکی Y'_v و N'_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 قرارداده شده است.



شکل ۱۰ - نمودار ضریب هیدرودینامیکی Y'_v برحسب فاصله سطوح کنترلی از بدنه

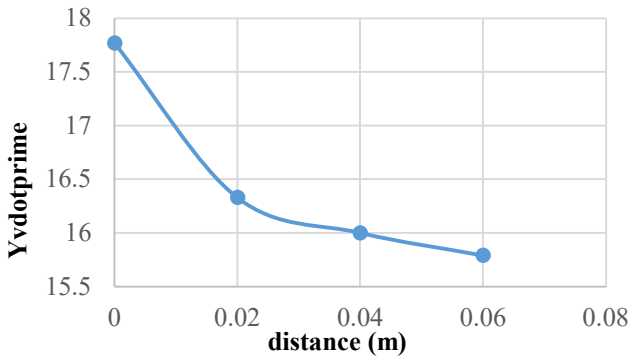


شکل ۱۱ - نمودار ضریب هیدرودینامیکی N'_v برحسب فاصله سطوح کنترلی از بدنه

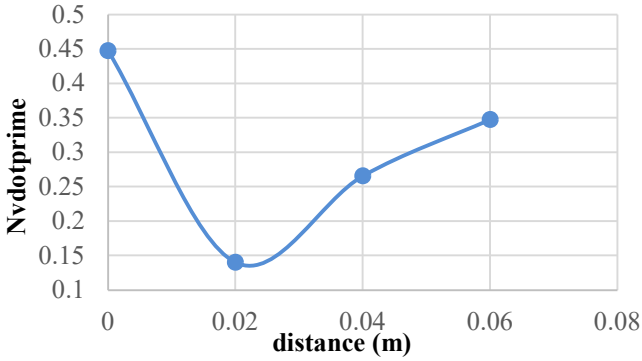
باتوجه‌به نمودارهای شکل ۱۰ و شکل ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فاصله سطوح کنترلی از بدنه، مقدار قدرمطلق ضریب هیدرودینامیکی Y'_v افزایش یافته و نمودار به صورت صعودی می‌باشد. اما مقادیر ضریب هیدودینامیکی N'_v کاهش یافته و نمودار به صورت نزولی می‌باشد.

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 قرارداده شده است.



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



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

باتوجه‌به 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 صرفا 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. هنگامی‌که سطوح کنترلی به زیردریایی افزوده می‌شوند و به‌صورت چسبیده به بدنه قرار می‌گیرند، تمرکز فشارقوی 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.27]

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 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 $k-\varepsilon$ 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 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 $Y_{\dot{v}}$ کاهش و مقدار ضریب $N_{\dot{v}}$ افزایش می‌یابد. بطور کلی می‌توان گفت استفاده از روش‌های رگراسیونی 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 کاملا مجزا هستند نیز بررسی شده است که نتایج حاصل از آن می‌تواند درصد خطای حاکم بر روش‌های رگراسیونی 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 EliminatingFree 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 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:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.27]

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/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. Mohammmad 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.27]