بررسی تاثیر فرم هندسی دُم بر مانورپذیری شناور زیرسطحی هوشمند

امیر هنریار[۱]، محمود غیاثی[۲*]، سید حسین موسوی‌زادگان[۳]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛Yarehonar@aut.ac.ir
[۲] عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛Mghiasi@aut.ac.ir
[۳] عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛Hmousavi@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷

کلمات کلیدی:
شناور زیرسطحی هوشمند
فرم هندسی دم
ضرایب هیدرودینامیکی
مانورپذیری

چکیده

در این مقاله به بررسی اثر فرم هندسی دُم بر روی مانورپذیری شناور زیرسطحی هوشمند پرداخته شده‌است.ابتدا فرم هندسی دم به کمک تابع ریاضی وابسته به دو پارامتر طول دم و زاویه مخروطی آن تعریف شده و آنگاه به بررسی تاثیر این دو پارامتر ابتدا بر روی ضرایب هیدرودینامیکی شناور و سپس مانورپذیری آن پرداخته شده‌است. برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بازدارنده از شبیه‌سازی عددی دو تست کشش مورب و بازوی چرخان در دینامیک سیالات محاسباتی به کمک حلگر سی‌اف‌ایکس و برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی جرم‌اضافی از روش تئوری نواری استفاده شده‌است. استفاده ترکیبی از این دو روش برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی با توجه به ماهیت متفاوت ضرایب، موجب افزایش سرعت و دقت محاسبات شده‌است. نتایج نشان می دهد که با افزایش طول دم، ضرایب هیدرودینامیکی بازدارنده و جرم‌اضافی، کاهش و شعاع دایره‌چرخش و مانورپذیری به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد و معکوس این نتایج برای زاویه مخروطی دم شناور به دست آمده‌است.

Investigation on the Effect of Tail Form on Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Maneuverability

Amir Honaryar[1], Mahmoud Ghiasi[2*], S. Hosien Mousavizadegan[3]

[1] PhD Student in Marine Engineering, Amirkabir University of Technology; Yarehonar@aut.ac.ir
[2] Member of the Faculty of Marine Technology, Amirkabir University of Technology; Mghiasi@aut.ac.ir
[3] Member of the Faculty of Marine Technology, Amirkabir University of Technology; Hmousavi@aut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 28 Aug. 2016
Accepted: 27 Nov. 2016

Keywords:
Autonomous Underwater Vehicle
Tail Form
Hydrodynamic Coefficients
Maneuverability

ABSTRACT

In this paper the effect of tail form on maneuverability of autonomous underwater vehicle is investigated. In the beginning, tail form is defined using a mathematical function dependent on two parameters including length of the tail and its cone angle. Then the effect of these two parameters on the hydrodynamic coefficients and maneuverability is investigated respectively. Hydrodynamic damping coefficients are calculated by applying the numerical simulation of oblique towing and rotating arm tests using computational fluid dynamics (CFD) with CFX solver and added mass coefficients are obtained using strip theory method. Due to the different nature of coefficients, using a combination of both these methods has improved the accuracy and speed of calculations. Results show that hydrodynamic damping and added mass coefficients and the turning radius decrease with increasing the tail length, however maneuverability increases. On the contrary, the results are obtained for tail cone angle.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.10.7]

۱- مقدمه

شناور زیرسطحی هوشمند به طور گسترده جهت اهداف علمی، تحقیقاتی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هوشمندی یکی از مهمترینویژگی این متحرک که بسیار متاثر از رفتار حرکتی یا مانورپذیری شناور است، به طوری که بدون داشتن شناخت کافی نسبت به مانورپذیری شناور، هوشمند شدن آن بسیار مشکل است و یا حتی امکان‌پذیر نیست. مانورپذیری برای یک متحرک دریایی شامل تغییر سرعت، تغییر مسیر و حفظ مسیر است. برای تعیین مشخصات مانورپذیری می‌توان از مدل ابکوویچ[۱] استفاده نمود که در آن نیروها و گشتاورها به کمک ضرایب هیدرودینامیکی تعیین می‌شود و می‌توان مانورپذیری متحرک زیرسطحی را بررسی نمود. یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر روی مانورپذیری متحرک‌های زیرسطحی، فرم هندسی بدنه است زیرا فرم هندسی بدنه متحرک-های دریایی به شدت بر روی ضرایب هیدرودینامیکی آن تاثیرگذار است، به طوری که با شناخت چگونگی تاثیر فرم هندسی بدنه بر ضرایب هیدرودینامیکی شناور زیرسطحی هوشمند می‌توان به مانورپذیری مناسب برای آن دست یافت.

به طور معمول در مراحل ابتدایی طراحی شناور زیرسطحی هوشمند، المان‌هایی از جمله انتخاب فرم بدنه، محل قرارگیری و اندازه سطوح کنترلی به صورت دقیق و جزئی تعیین نمی‌شود و معمولا در پیکره‌بندی[۱] نهایی وسیله، تغییرات نهایی بین تعدادی از گزینه‌ها، اجتناب‌ناپذیر است. آنالیز حساسیت‌پذیری به طراح این امکان را می‌دهد که از همان مراحل ابتدایی طراحی به فرم بدنه مناسب دست پیدا کرده و در نتیجه با کاهش زمان و هزینه، موجب افزایش بهره‌وری در طراحی و ساخت شناور زیرسطحی هوشمند شود[۲], [۳].

تاثیر فرم هندسی بدنه متحرک‌های دریایی بر روی مشخصه‌های هیدرودینامیکی آن‌ها، همواره مورد توجه محققان و مهندسان مرتبط با حوزه دانش هیدرودینامیک بوده‌است. پارسونز و همکارانش [۴] را می‌توان از اولین افرادی دانست که در سال ۱۹۷۴ به مطالعه پارامتری فرم هندسی بدنه و تاثیر آن بر کاهش نیروی درگ در جریان تراکم‌ناپذیر پرداختند. هدف از مطالعه آن‌ها، طراحی فرم‌های بدنه متقارن محوری با کمترین تیروی درگ بوده‌است. از مهمترین نتایج کار آن‌ها می‌توان به تعریف معیارها و ضوابط هیدرودینامیکی برای طراحی بهینه بدنه اشاره نمود. لوتز و وگنر [۵] نیز در سال ۱۹۹۸ بر روی بهینه‌سازی عددی فرم بدنه‌های جریان آرام طبیعی مطالعه نمودند. در روش آن‌ها برای مدل کردن بدنه از توزیع سینگولاریتی چشمه بر روی محور تقارن بدنه استفاده شد. میدان جریان غیر ویسکوز نیز به همین روش مدل شد، اما برای اعمال اثرات ویسکوزیته از یک روش انتگرال‌گیری لایه مرزی استفاده شد.

پرالت و همکارانش در سال ۲۰۰۳ حساسیت‌سنجی ضرایب جرم اضافی شناور زیرسطحی هوشمند را نسبت به تغییرات هندسی بدنه و سطوح کنترل آن [۶] و سپس حساسیت‌سنجی پاسخ یک شناور زیرسطحی هوشمند را نسبت به پارامترهای هیدرودینامیکی [۷] بررسی نمودند. آن‌ها از کد کامپیوتری ای‌اس‌ای‌ام[۲] توسعه داده شده توسط وات برای محاسبه ضرایب جرم‌اضافی استفاده نمودند که معادل روابطی است که لامپ برای بیضی‌گون مطرح کرده بود. آن-ها برای بیان معادلات حرکت نیز از مدل کامپیوتری غیرخطی بر مبنای معادلات نیوتن-اویلر استفاده کردند. برای بررسی پاسخ شناور، قطر تاکتیکی و زاویه اورشوت به ترتیب از شبیه‌سازی عددی مانورهای دایره‌چرخش و زیگزاگ، محاسبه شد. تیاگی و سن در سال ۲۰۰۶ [۸] به محاسبه ضرایب نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی بازدارنده عرضی با استفاده از دینامیک سیالاتمحاسباتی بر مبنای معادلات رانز[۳] پرداختند و برای حل معادلات رانز از الگوریتم سیمپلاس[۴] با روش حجم محدود و به کارگیری مدل $k-\varepsilon$ برای مدل‌کردن تنش‌های رینولدز استفاده-نمودند. آن‌ها نتایج خود را برای دو بدنه با مقاطع عرضی دایروی و بیضوی و فرم پاشنه متفاوت نسبت به شناورهای زیرسطحی هوشمند رایج، با روابط نیمه‌تجربی مقایسه نمودند. واز و همکارانش [۹] در سال ۲۰۱۰ به محاسبه نیروهای مانور وارد بر زیردریایی با استفاده از دو حلگر مبتنی بر جریان ویسکوز پرداختند. در کار آن‌ها دو دیدگاه رانز و دی‌دی‌ای‌اس[۵] با هم مقایسه شده‌است. در همان سال زینگ و ژو [۱۰] بر روی روش‌های پیش‌بینی هیدرودینامیکی مانورپذیری زیردریایی با استفاده از روش‌های عددی مطالعه نمودند. مدل توربولانسی $k-\omega$ به عنوان مدل مناسب‌تر برای تخمین مانورپذیری و استفاده از مقادیر شبکه‌بندی بیشتر برای تخمین نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی طولی نسبت به عرضی از جمله نتایج مهم کار آن‌ها می‌باشد. ژانگ و همکاران [۱۱] به همراه یوسان و همکارانش [۱۲] به ترتیب در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲ به محاسبه عددی ضرایب هیدرودینامیکی پرداختند. آن‌ها در کار خود برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی از شبیه‌سازی عددی تست مکانیزم حرکت صفحه‌ای[۶] استفاده نمودند. ژانگ و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۱۳ به شبیه‌سازی جریان حول بدنه-های متقارن شناور زیرسطحی هوشمند در چرخش پایا پرداختند. در روش ایشان مدلسازی محاسباتی بر اساس معادلات رانز انجام گرفت و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی برای فرم‌های مختلف بدنه مانند بیضیگون با نسبت طول به قطر ۴ و ۶، و چند فرم دیگر، با نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی مقایسه شد. در سال ۲۰۱۵ لیوشوای و همکارانش [۱۴] کار مشابهی را انجام داده و به شبیه-سازی عددی هیدرودینامیک زیردریایی در چرخش پایا البته با دو مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ و انتقال تنش برشی $k-\omega$ (SST)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.10.7]

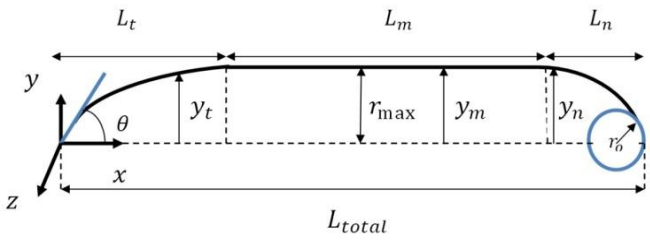
پرداختند. آلوارز و همکاران [۱۵] نیز به بهینه‌سازی فرم بدنه شناور زیرسطحی هوشمند برای حرکت در عمق اسنورکلی پرداختند. آن-ها با تغییرات فرم دماغه و دم شناور، فرم بدنه‌ای را پیشنهاد دادند که می‌تواند تا ۲۵ درصد مقاومت کل را کاهش دهد که بیشترین میزان این کاهش در مقاومت موج‌سازی است و برای حرکت در نزدیکی سطح آزاد مناسب است. سائوت و همکارانش [۱۶] به آنالیز دینامیکی و هیدرودینامیکی شناور زیرسطحی هوشمند در نزدیکی سطح آزاد پرداختند و پایداری دینامیکی آن را مورد ارزیابی قرار دادند. فرم بدنه شناور آن‌ها با توجه به اینکه در نزدیکی سطح آزاد حرکت می‌کند، به خصوص در ناحیه دماغه و دم، نسبت به بدنه‌های معمول متفاوت می‌باشد.فیلیپس و همکارانش [۱۷] از دینامیک سیالات محاسباتی برای طراحی هیدرودینامیکی مقرون به صرفه شناور زیرسطحی هوشمند استفاده کردند. در کار ایشان تاثیر فرم بدنه بر روی منحنی مقاومت-سرعت شناور بررسی شد.

از جمله فعالیت‌های محققان ایرانی در این زمینه که اخیرا صورت گرفته‌است می‌توان به مطالعه نوری، زینعلی و جهانگردی [۱۸] بر روی طراحی فرم بدنه شناور زیرسطحی هوشمند بر مبنای توزیع فشار مناسب اشاره نمود. در کار ایشان به تاثیرگذاری ماموریت شناور زیرسطحی هوشمند بر فرم بدنه آن اشاره شده‌است. آن‌ها با تغییر پروفیل دماغه و دم شناور زیرسطحی هوشمند توزیع فشار اطراف بدنه را مورد ارزیابی قرار داده‌اند و دریافتند که می‌توان با طراحی فرم بدنه به توزیع فشار دلخواه دست یافت. جوادی، دهقان منشادی، خردمند و مونسان [۱۹] نیز در سال ۲۰۱۵ به بررسی آزمایشگاهی تاثیر پروفیل دماغه بر روی مقاومت متحرک زیرسطحی در حرکت سطحی پرداخته و مقاومت دو فرم بدنه با دماغه تانگو و استاندارد را در حوضچه‌کشش مورد ارزیابی قرار داده‌اند.مونسان و همکاران [۲۰] و [۲۱] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به آنالیز فرم پاشنه زیردریایی پرداختند. ایشان چندین نمونه فرم پاشنه را با معادلات هندسی مختلف از دید مقاومت و ویک بررسی کردند و چند نمونه فرم پاشنه را از دید حداقل مقاومت پیشنهاد دادند. در مطالعه ایشان ابعاد دامنه، قطر، فرم دماغه و طول کلی (مجموع طول پاشنه، دماغه و استوانه میانی) ثابت فرض شده‌است. ایشان همچنین در پژوهشی دیگر [۲۲] علاوه بر فرم پاشنه، تاثیرگذاری فرم دماغه را نیز بر روی مقاومت زیردریایی بررسی کردند.

در مقاله حاضر پس از تعریف فرم بدنه عمومی برای شناورهای زیرسطحی هوشمند، پروفیل دم با استفاده از دو پارامتر طول دم و زاویه انتهای آن بیان شده‌است. در ادامه با تغییر این دو پارامتر و با توجه به ثابت نگه‌داشتن طول و قطر کلی بدنه، تاثیرگذاری آن‌ها بر روی ضرایب هیدرودینامیکی بررسی شده‌است. برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی جرم‌اضافی از روش تئوری نواری که مبتنی بر جریان پتانسیل است، استفاده شده‌است. برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بازدارنده از شبیه‌سازی عددی دو تست کشش مورب و دستگاه بازوی چرخان در دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده‌است. سپس با به دست آوردن ضرایب هیدرودینامیکی، با استفاده از مدل ابکوویچ نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی محاسبه می‌شود. برای بررسی مانورپذیری شناور زیرسطحی هوشمند، پارامتر مهم شعاع دایره‌چرخش از شبیه‌سازی عددی تست دایره‌چرخش به دست آمده‌است.

۲- تعریف ریاضی فرم هندسی بدنه

شناور زیرسطحی هوشمند با توجه به ماموریت‌ها و کاربردهای متفاوت، دارای فرم‌های بدنه گوناگونی می‌باشد. برای بررسی تاثیر فرم بدنه ابتدا لازم است که بدنه شناور به صورت فرم استاندارد و تابعی از پارامترهای مشخص، تعریف شود. به طور کلی می‌توان فرم هندسی بدنه شناور زیرسطحی هوشمند را با پارامترهایی از جمله طول کلی L_{total}، قطر بیشینه $d_{\max} = 2r_{\max}$، طول ناحیه ورودی دماغه L_n، طول ناحیه میانی L_m، طول ناحیه خروجی دم L_t، پروفیل ناحیه دماغه y_n، پروفیل ناحیه میانی y_m، پروفیل ناحیه دم y_t، زاویه انتهای دم θ و شعاع دایره جلوی دماغه r_o تعریف نمود. شکل ۱ تعریف پارامتری فرم هندسی بدنه را نشان می‌دهد.



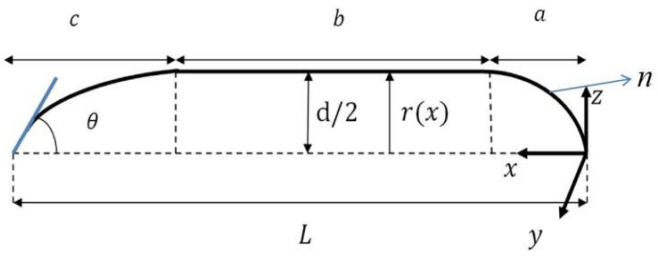
شکل۱-تعریف پارامتری از فرم هندسی کلی بدنه شناور

پس از تعریف کلی از فرم هندسی بدنه شناور زیرسطحی هوشمند و پارامترهای اصلی تعریف‌کننده آن، بهتر است که فرم بدنه به صورت یک معادله ریاضی مشخص و تابعی از حداقل پارامترهای ممکن بیان شده تا بررسی تغییرات فرم بدنه آسان‌تر گردد. برای ارائه یک تعریف ریاضی ابتدا بدنه را به سه قسمت ناحیه دماغه، ناحیه میانی و ناحیه دم تقسیم نموده و سپس معادله ریاضی شعاع پروفیل بدنه در راستای محور طولی شناور به صورت رابطه (۱) بر حسب چند پارامتر مشخص بیان می‌شود. در این رابطه همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده‌است، $r(x)$ شعاع پروفیل بدنه در راستای محور طولی x، d قطر بیشینه، θ زاویه انتهای دم، a طول ناحیه دماغه، b طول ناحیه میانی، c طول ناحیه دم و n مشخصه مرتبه سهمی ناحیه دماغه که به نوعی تعیین‌کننده شعاع دایره جلوی دماغه نیز می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.10.7]

$$r(x) = f(d,\theta,a,b,c,n) \quad (۱)$$



شکل۲–بیان ریاضی معادله پروفیل بدنه

معادله شعاع پروفیل بدنه در ناحیه دماغه، میانی و دم به ترتیب به صورت رابطه‌های (۲)، (۳) و (۴) تعریف شده‌است[۲۳].

$$r(x) = \frac{1}{2}d\left[1-\left(\frac{x-a}{a}\right)^2\right]^{\frac{1}{n}}, \quad 0 < x < a \quad (۲)$$

$$r(x) = \frac{1}{2}d, \quad a < x < a+b \quad (۳)$$

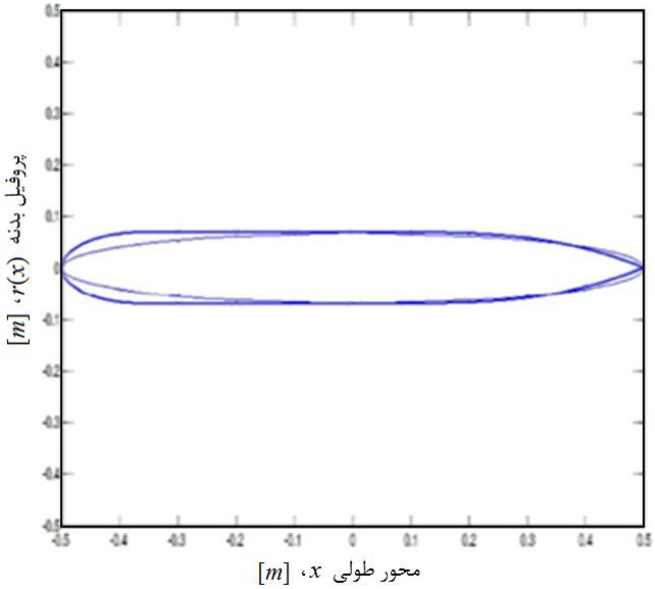
$$r(x) = \frac{1}{2}d - \left[\left(\frac{3d}{2c^2}\right)-\left(\frac{\tan\theta}{c}\right)\right](x-(a+b))^2 + \left[\left(\frac{d}{c^3}\right)-\left(\frac{\tan\theta}{c^2}\right)\right](x-(a+b))^3, \quad a+b < x < a+b+c \quad (۴)$$

۳- فرم‌های بدنه مورد بررسی

پس از بیان ریاضی فرم بدنه شناور زیرسطحی هوشمند به صورت تابعی از پارامترهای هندسی، برای بررسی تاثیر فرم دم بر مانورپذیری، با تغییرات پارامترهای طول دم و زاویه مخروطی آن، می‌توان فرم‌های مختلف را ایجاد نمود و تاثیر هر یک از این دو پارامتر را بر روی ضرایب هیدرودینامیکی و سپس بر روی مانورپذیری بررسی کرد. بنابراین در ابتدا یک فرم هندسی با پارامترهای مشخص و معلوم به عنوان فرم مبنا انتخاب شده تا علاوه بر اعتبارسنجی، تاثیر تغییرات فرم بدنه با توجه به فرم مبنا تعیین شود. مشخصه‌های فرم مبنا در جدول ۱ و شکل ۳ آورده شده‌است. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، فرم مبنا بسیار نزدیک به فرم بیضیگون می‌باشد.

جدول۱–مشخصه‌های هندسی معادله ریاضی فرم مبنا

مشخصه	مقدار
طول دماغه $a\ [m]$	۰/۱۳۷۸
طول میانی $b\ [m]$	۰/۴۷۱۸
طول دم $c\ [m]$	۰/۳۹۰۴
قطر بیشینه $d\ [m]$	۰/۱۳۷۸
زاویه انتهای دم $\theta\ [^o]$	۲۵
مشخصه مرتبه سهمی $n\ [-]$	۲



شکل۳–فرم هندسی مبنا نزدیک به فرم بیضیگون

۳-۱- فرم‌های هندسی تعریف‌شده با تغییرات زاویه دم

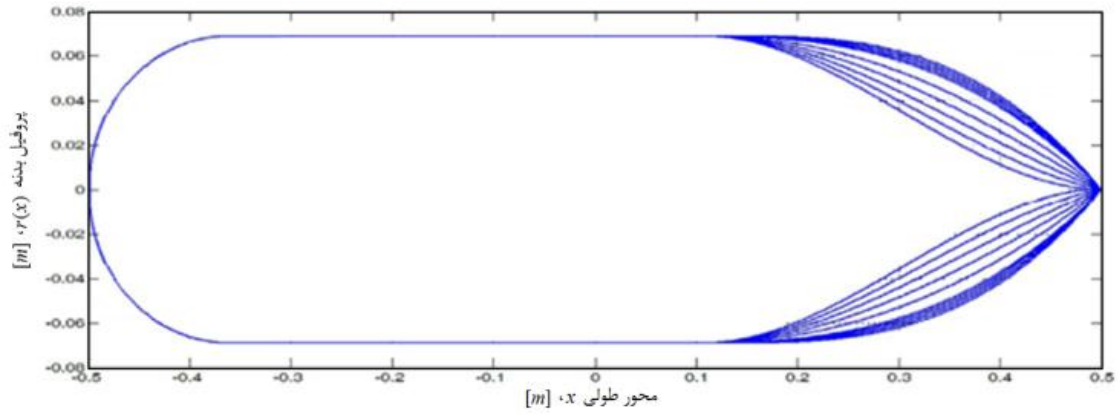
همان‌گونه که پیش از این بیان شد، یکی از پارامترهای موثر در معادله فرم بدنه در ناحیه دم، زاویه مخروطی دم می‌باشد. برای بررسی تاثیر آن (پارامتر θ)، ۱۰ فرم بدنه مطابق جدول ۲ تعریف شده‌است. در شکل ۴ نیز این ۱۰ فرم بدنه با زاویه‌های مختلف نشان داده شده‌است. سایر پارامترهای n، d، c، b و a برای هر ۱۰ فرم بدنه ثابت بوده و مقدار آن‌ها برابر با جدول ۱ می‌باشد.

جدول۲– فرم‌های بدنه تعریف شده بر حسب مشخصه زاویه انتهای دم

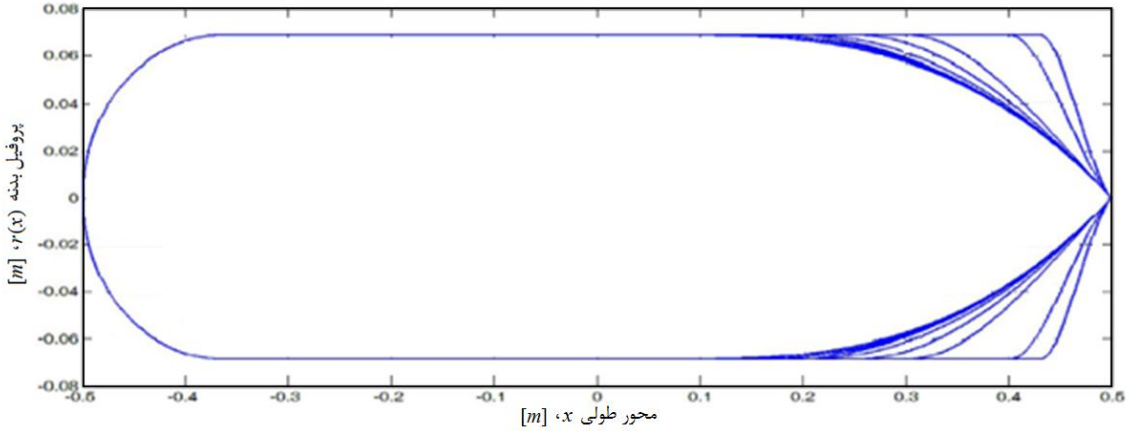
فرم بدنه	$\theta\ [^o]$	فرم بدنه	$\theta\ [^o]$
θ_1	۰	θ_6	۲۵
θ_2	۵	θ_7	۲۶
θ_3	۱۰	θ_8	۲۷
θ_4	۱۵	θ_9	۲۸
θ_5	۲۰	θ_{10}	۲۹

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.10.7]



شکل۴– فرم‌های بدنه تعریف شده با زاویه‌های مخروطی دم مختلف مطابق با جدول ۲



شکل۵– فرم‌های بدنه تعریف شده با طول دم مختلف مطابق با جدول ۳

۳-۲- فرم‌های هندسی تعریف‌شده با تغییرات طول دم

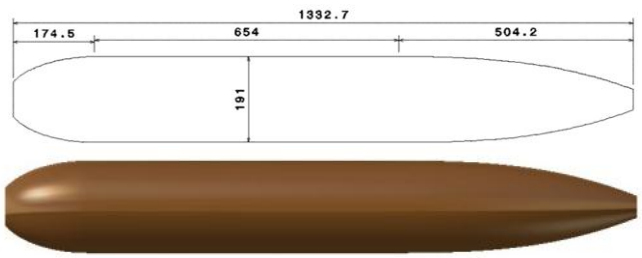
یکی دیگر از پارامترهای موثر در معادله فرم بدنه در ناحیه دم، طول دم c می‌باشد. برای بررسی تاثیر این پارامتر، ۱۰ فرم بدنه مطابق جدول ۳ تعریف شده‌است. در شکل ۵ نیز این ۱۰ فرم بدنه با طول-های دم مختلف نشان داده شده‌است.

جدول۳– فرم‌های بدنه تعریف شده بر حسب طول دم

فرم بدنه	$c\ [m]$	$b\ [m]$
c_1	۰/۰۷	۰/۷۹۲
c_2	۰/۱	۰/۷۶۲
c_3	۰/۱۵	۰/۷۱۲
c_4	۰/۲	۰/۶۶۲
c_5	۰/۲۵	۰/۶۱۲
c_6	۰/۳	۰/۵۶۲
c_7	۰/۳۵	۰/۵۱۲
c_8	۰/۳۹	۰/۴۷۲
c_9	۰/۴۵	۰/۴۱۲
c_{10}	۰/۵	۰/۳۶۲

سایر پارامترهای n، θ، d و a برای هر ۱۰ فرم بدنه ثابت بوده و مقدار آن‌ها برابر با جدول ۱ می‌باشد. شایان ذکر است که با افزایش یا کاهش طول دم، طول ناحیه میانی b به ترتیب کاهش یا افزایش می‌یابد.

برای اعتبارسنجی نتایج، شناور زیرسطحی هوشمند ریموس[۲۴] به عنوان شناوری که نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی آن موجود است، مدلسازی شده‌است. شکل ۶ مدلسازی هندسی بدنه این شناور را نشان می‌دهد.



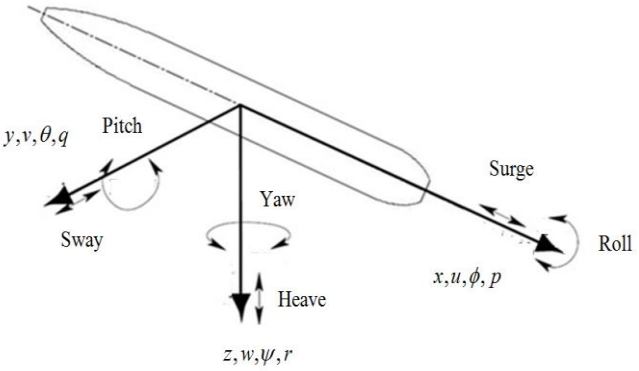
شکل۶– فرم بدنه شناور زیرسطحی هوشمند ریموس (ابعاد به میلی‌متر است)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.10.7]

۴- معادلات حرکت حاکم بر مسئله

شناور زیرسطحی هوشمند درون سیال آب دارای شش درجه آزادی (سه حرکت خطی هیو، سرج و اسوی و سه حرکت دورانی یاو، رول و پیچ) می‌باشد، حرکت‌های شناور در شش درجه آزادی نسبت به دستگاه مختصات متصل به بدنه در شکل ۷ تعریف شده‌است. در صورتی که دستگاه مختصات متصل به بدنه دارای سرعت‌های زاویه‌ای درجهت‌های مختلفی باشد،می‌توان این سرعت‌های زاویه‌ای را با استفاده از زاویه‌های اویلر توصیف نمود[۱].



شکل۷-حرکت‌های شناور زیرسطحی هوشمند در شش درجه آزادی[۲۵]

معادلات حرکت برای شناور با شش درجه‌آزادی در صورتی که مبدا مختصات بر روی مرکز جرم شناور منطبق باشد، به صورت رابطه (۵) به دست می‌آید[۲۶].

$$\begin{cases} X = m\left[\dot{u} + qw - rv\right] \\ Y = m\left[\dot{v} + ru - pw\right] \\ Z = m\left[\dot{w} + pv - qu\right] \\ K = I_{xx}\dot{p} + I_{xy}\dot{q} + I_{xz}\dot{r} + (I_{zz} - I_{yy})rq \\ \quad + I_{yz}(q^2 - r^2) + I_{xz}pq - I_{xy}pr \\ M = I_{yx}\dot{p} + I_{yy}\dot{q} + I_{yz}\dot{r} + (I_{xx} - I_{zz})pr \\ \quad + I_{xz}(r^2 - p^2) + I_{xy}qr - I_{yz}qp \\ N = I_{zx}\dot{p} + I_{zy}\dot{q} + I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq \\ \quad + I_{xy}(p^2 - q^2) + I_{yz}pr - I_{xz}qr \end{cases} \quad (۵)$$

در این رابطه (X,Y,Z) و (K,M,N) به ترتیب نیروها و گشتاورهای خارجی وارد بر شناور و (u,v,w) و (p,q,r) نیز به ترتیب مولفه‌های سرعت خطی و زاویه‌ای می‌باشد. در مقله حاضر، مطالعه سه درجه آزادی به دلیل فرض حرکت در صفحه افقی انجام گرفته‌است. نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی وارد بر شناور در صفحه حرکتی افقی را می‌توان با استفاده از بسط تیلور به صورت رابطه (۶) بیان نمود.

$$\begin{cases} X = X_e + X_u\Delta u + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_\delta\delta \\ Y = Y_e + Y_v v + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_r r + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_\delta\delta \\ N = N_e + N_v v + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_r r + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_\delta\delta \end{cases} \quad (۶)$$

در این رابطه X_e، Y_e و N_e نیروها و گشتاور در حالت تعادل (حرکت با سرعت ثابت)، X_u، Y_v، N_r، Y_r و N_v ضرایب بازدارنده و $X_{\dot{u}}$، $Y_{\dot{v}}$، $N_{\dot{r}}$، $Y_{\dot{r}}$ و $N_{\dot{v}}$ ضرایب جرم اضافی و $X_\delta\delta$، $Y_\delta\delta$ و $N_\delta\delta$ که در آن‌ها δ زاویه سکان می‌باشد، نیروها و گشتاور ناشی از سطوح کنترل (سکان) می‌باشد. با جایگذاری معادله (۶) در (۵)، معادله خطی حرکت شناور در صفحه حرکت افقی مطابق با رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$\begin{cases} \left(m - X_{\dot{u}}\right)\dot{u} = X_u\Delta u + \tilde{X} \\ \left(m - Y_{\dot{v}}\right)\dot{v} + \left(mx_G - Y_{\dot{r}}\right)\dot{r} = \\ \qquad Y_v v + \left(Y_r - mU\right)r + \tilde{Y} \\ \left(mx_G - N_{\dot{v}}\right)\dot{v} + \left(I_{zz} - N_{\dot{r}}\right)\dot{r} = \\ \qquad N_v v + \left(N_r - mx_G U\right)r + \tilde{N} \end{cases} \quad (۷)$$

که در آن $\tilde{X}$، $\tilde{Y}$ و $\tilde{N}$ نیروها و گشتاور ناشی از سطوح کنترل، m جرم شناور، I_{zz} ممان اینرسی جرمی، x_G موقعیت طولی مرکز جرم و U سرعت شناور می‌باشد.

۵- شبیه‌سازی عددی در دینامیک سیالات محاسباتی

روش‌های عددی برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی با توجه به هزینه کمتر نسبت به روش‌های آزمایشگاهی، روش مناسبی است. در این بخش به شبیه‌سازی عددی دو تست کشش مورب و دستگاه بازوی چرخان در دینامیک سیالات محاسباتیبه کمک حلگر سی‌اف‌ایکس[۷] پرداخته شده‌است.

۵-۱- معادلات حاکم بر جریان سیال

معادله پیوستگی، معادلات ممنتوم (ناویر-استوکس) و معادله انرژی از جمله مهم‌ترین معادلات حاکم بر جریان سیال می‌باشند. با توجه به اینکه جریان سیال اطراف شناور زیرسطحی هوشمند از نوع جریان تراکم‌ناپذیر می‌باشد، نیازی به حل معادله انرژی به طور جداگانه نیست. معادله پیوستگی با استفاده از قانون بقای جرم مطابق با رابطه (۸) به دست می‌آید.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.10.7]

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint_{\forall}\rho d\forall+\iint_{S}\rho V dS=0 \qquad (۸)$$

معادلات ممنتوم ناویر-استوکس مبتنی بر قانون دوم نیوتن می‌باشد که طبق آن برآیند نیروهای وارد بر جسم برابر با حاصلضرب شتاب در جرم جسم می‌باشد. در این رابطه ρ چگالی سیال، $\forall$ حجم کنترل، S سطح کنترل، V سرعت سیال و t زمان بر حسب ثانیه می‌باشد. فرم انتگرالی معادلات ممنتوم در راستای i را می‌توان به صورت رابطه (۹) بیان نمود.

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint_{\forall}\rho u_i d\forall+\iint_{S}\rho u_i u_j dS_j=\iint_{S}\rho\tau_{ij}dS_j+\iiint_{\forall}f_i d\forall \qquad (۹)$$

در این رابطه u_i و u_j مولفه‌های سرعت، τ_{ij} مولفه تنش برشی و f_i مولفه نیرو در واحد حجم می‌باشد.

۵-۲- مدلسازی اغتشاش

در عدد رینولدز بالاتر از مقدار بحرانی، رفتار جریان تصادفی و نامنظم می‌شود به طوری که سرعت و سایر خواص جریان به صورت دائمی و نامنظم تغییر می‌کند. طبیعت تصادفی جریان آشفته مانع از محاسبات و بررسی کامل حرکت همه ذرات سیال می‌شود. در عوض می‌توان سرعت را به دو بخش مقدار متوسط دائمی و مولفه نوسانی تقسیم نمود. برای نمایش اثر نوسانات آشفته روی جریان متوسط، معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس به طور هم‌زمان برای جریان تراکم‌ناپذیر با لزجت ثابت مورد بررسی قرار داده می‌شود. بنابراین فرم تانسوری معادلات ممنتوم در جهت i به صورت معادله (۱۰) بیان می‌شود.

$$\rho\frac{\partial\overline{v}_i}{\partial t}+\rho\overline{v}_j\frac{\partial\overline{v}_i}{\partial x_j}=-\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i}+\mu\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial\overline{v}_i}{\partial x_j}-\rho\overline{v_i v_j}\right)+\rho f_i \qquad (۱۰)$$

در این رابطه μ ویسکوزیته سیال، $\overline{p}$ فشار، x_i و x_j مولفه‌های بردار مکان می‌باشد. به عبارتی می‌توان گفت، تنها تفاوت معادلات (۱۰) و (۹) عبارت $\rho\overline{v_i v_j}$ می‌باشد که به آن تنش آشفتگی یا تنش رینولدز گفته می‌شود. تنها تفاوت معادلات جریان آرام و آشفته نیز حضور همین عبارت است. معادله (۱۰) اصطلاحا معادلات رانز نامیده می‌شود. برای مدل‌کردن آشفتگی از مدل انتقال تنش برشی $(SST)k-\omega$ استفاده شده‌است. این مدل آشفتگی بر اساس مدل $k-\omega$ نوشته شده‌است و جریان کناره دیواره (بدنه شناور) را مشابه با این مدل پیش‌بینی می‌نماید، به طوری که دو معادله بقایی برای انرژی جنبشی آشفتگی و ورتیسیته نوشته می‌شود و با حل این دو معادله مقدار ویسکوزیته آشفتگی محاسبه می‌شود. این مدل انتقال تنش‌های برشی را در نظر می‌گیرد و در پیش‌بینی جدایش جریان بسیار قوی عمل می‌نماید. در واقع این مدل به منظور پیش‌بینی دقیق شروع و جدایش جریان تحت شرایط گرادیان فشار مخالف با مد نظر قرار دادن اثرات انتقال در فرمول‌بندی ویسکوزیته ادی[۸]، طراحی شده‌است. استفاده از این مدل برای شبیه‌سازی لایه‌مرزی توصیه می‌شود. این مدل برای غلبه بر نقایص مدل $k-\omega$ گسترش یافته‌است. از جمله مهمترین تفاوت‌های این مدل نسبت به مدل $k-\omega$ عبارت است از:۱- تغییر تدریجی از مدل استاندارد $k-\omega$ در نواحی داخل لایه‌مرزی به نسخه عدد رینولدز بالای مدل $k-\varepsilon$ در ناحیه خارج از لایه مرزی، ۲- اصلاح فرمول‌بندی ویسکوزیته آشفتگی برای به حساب آوردن اثرات انتقال تنش‌های برشی اصلی آشفتگی.

با توجه به اینکه در مقاله حاضر به شبیه‌سازی عددی دو تست کشش مورب و بازوی چرخان پرداخته شده‌است، جریان حاکم دارای ماهیت چرخشی است و پدیده‌هایی مانند جدایش جریان و تغییرات ناگهانی گرادیان فشار اهمیت می‌یابد و از این‌روشبیه‌سازی دقیق‌تر لایه‌مرزی به رسیدن به جواب‌های بهتر منجر می‌شود. بنابراین در این مقاله با توجه به مقایسه ماهیت مدل‌های آشفتگی و همچنین به توصیه سایر منابع، مدل آشفتگی $(SST)k-\omega$ انتخاب شده‌است. باروش و همکارانش [۲۷] که برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی، به محاسبه نیروهای وارد بر شناور زیرسطحی هوشمند در زاویه‌های حمله مختلف نسبت به جریان پرداختند، از مدل آشفتگی $k-\omega$ استفاده کردند. گائو و همکاران [۲۸] نیز که نیروهای وارد بر شناور زیرسطحی هوشمند در جریان ویسکوز را به صورت عددی محاسبه نمودند، در روش خود از مدل آشفتگی $(SST)k-\omega$ بهره بردند. آن‌ها دلیل استفاده از این مدل را جمع مزیت‌های دو مدل $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ در مدل $(SST)k-\omega$ بیان کردند. دانتاس و همکارانش [۲۹] که به آنالیز عددی تاثیر سطوح کنترل بر روی مانورپذیری شناور زیرسطحی هوشمند پرداختند، در کار خود انواع مدل‌های آشفتگی را مورد بررسی قرار دادند و در نهایت از مدل $(SST)k-\omega$ استفاده کردند. آن‌ها چنین بیان کردند که این مدل آشفتگیعلاوه بر اینکه در مقایسه با سایر مدل‌ها دقت نسبتا بالایی دارد و نتایج نزدیکی را نسبت به روش‌های آزمایشگاهی ارائه می‌دهد، از نظر هزینه محاسباتی و زمان محاسبات نیز مناسب می‌باشد. سائو و همکارانش [۱۴] نیز از مدل $(SST)k-\omega$ برای بررسی عددی میدان جریان اطراف شناور

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.10.7]

زیرسطحی در حرکت چرخش پایا استفاده کردند و نتایج کار خود را با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی نمودند.

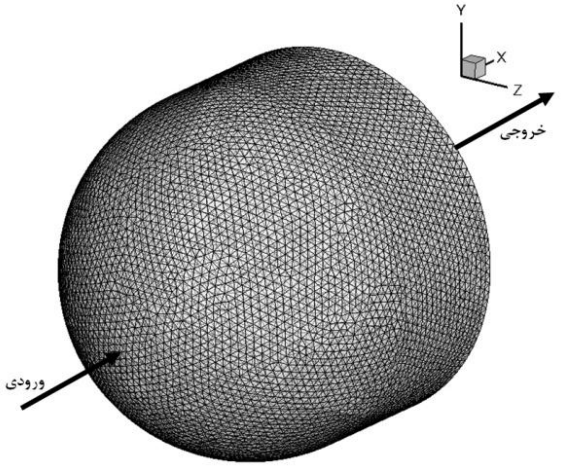
همان‌طور که پیش از این بیان شد، در مدل آشفتگی $k-\omega$ (SST) دو معادله انتقال یکی برای انرژی سینتیکی آشفتگی k و دیگری برای نرخ هدررفت آشفتگی ω حل می‌شود، این دو معادله در رابطه (۱۱) ارائه شده‌اند.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t}+\nabla.(\rho k U)=\nabla(\gamma_k \nabla k)+\tilde{G}_k+Y_k$$
$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}+\nabla(\rho\omega U)=\nabla(\gamma_\omega \nabla\omega)+G_\omega-Y_\omega+D_\omega \qquad (۱۱)$$

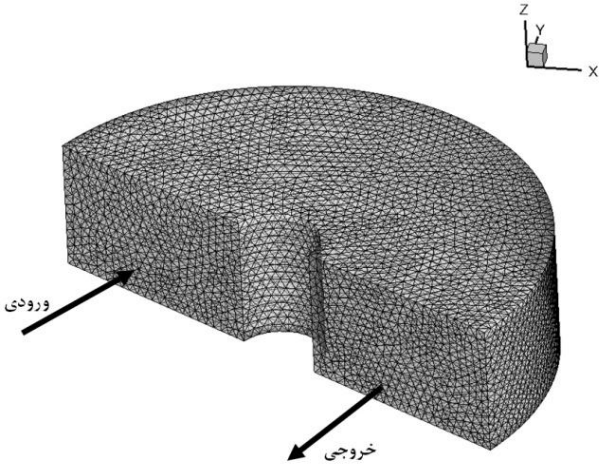
که در آن $\tilde{G}_k$ و G_ω به ترتیب بیانگر تولید k و ω، و Y_k و Y_ω به ترتیب بیانگر هدررفت k و ω می‌باشد. D_ω عبارت پخش متقاطع[۹] و γ_k و γ_ω به ترتیب معرف پخش موثر k و ω می‌باشد.

۵-۳- شبیه‌سازی آزمون‌ها

برای شبیه‌سازی عددی تست کشش مورب در دینامیک سیالات محاسباتی پس از مدل‌سازی هندسی فرم‌های مختلف بدنه شناور زیرسطحی هوشمند، دامنه محاسباتی شبکه‌بندی شده‌است. ثابت بودن مدل بدنه شناور و عبور جریان سیال از اطراف آن یکی از تفاوت‌های بارز شبیه‌سازی عددی تست کشش مورب با شبیه‌سازی آزمایشگاهی است که در آن مدل متحرک و جریان ثابت است. در این شبیه‌سازی عددی با اعمال زوایای حمله مختلف α برای جریان عبوری، مقادیر نیروی عرضی اسوی Y و گشتاور یاو N به ترتیب بر حسب سرعت‌های عرضی v محاسبه شده و در نهایت ضرایب بازدارنده Y_v و N_v به دست آورده می‌شوند. دامنه و شبکه محاسباتی برای شبیه‌سازی عددی تست کشش مورب در شکل ۸ نشان داده شده‌است. در شبیه‌سازی عددی تست بازوی چرخان نیز، با اعمال سرعت‌های زاویه‌ای مختلف r برای جریان عبوری (بدنه با سرعت‌های زاویه‌ای مختلف در شعاع‌های دورانی متناظر به گونه‌ای دوران می‌کند که سرعت پیش‌روی ثابت می‌ماند)، مقادیر نیروی عرضی اسوی Y و گشتاور یاو N بر حسب سرعت‌های زاویه‌ای r محاسبه شده و در نهایت ضرایب بازدارنده Y_r و N_r به دست آورده می‌شوند. دامنه و شبکه محاسباتی برای شبیه‌سازی عددی این تست در شکل ۹ نشان داده شده‌است.



شکل۸- شبکه محاسباتی برای شبیه‌سازی عددی تست کشش مورب



شکل۹- شبکه محاسباتی برای شبیه‌سازی عددی تست بازوی چرخان

۶- معادلات مانور

در این بخش به شبیه‌سازی عددی مانور دایره‌چرخش به عنوان معیار مانورپذیریبا استفاده از نرم‌افزار متلب[۱۰] پرداخته‌شده‌است. مانور دایره‌چرخش، مانوری است که در آن هدف هم تغییر مسیر و هم کنترل آن است. در مانور دایره‌چرخش، شناور زیرسطحی هوشمند نهایتا در یک مسیر دایره‌ای شکل با شعاع ثابت R در حالت پایا وسرعت‌های ثابت زاویه‌ای r و خطی v حرکت می‌کند، یعنی در این حالت حرکت بدون شتاب است. شعاع گردش شناور در این مانور $R=U/r$ می‌باشد که در آن $U=\sqrt{u^2+v^2}$ است. در نهایت شعاع گردش با توجه به فرض خطی بودن روابط و کوچک‌بودن δ و بزرگ‌بودن R مطابق با رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$\frac{R}{L}=\left(\frac{U}{L}\right)\frac{Y_v(N_r-mx_GU)-N_v(Y_r-mU)}{(Y_vN_\delta-N_vY_\delta)}\left(\frac{1}{\delta}\right) \qquad (۱۲)$$

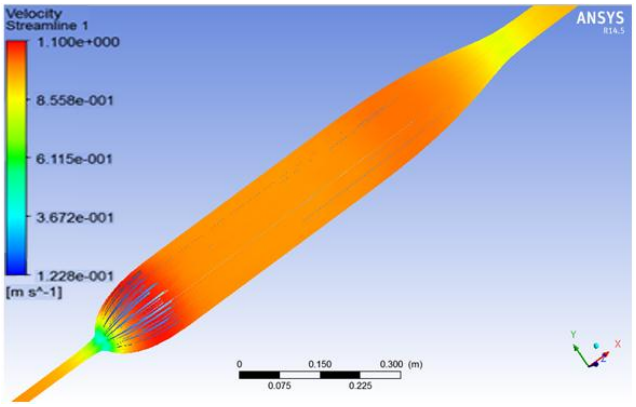
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.10.7]

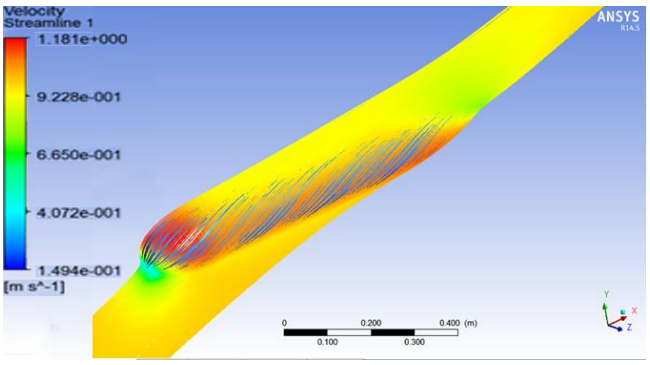
با توجه به ثابت بودن سطوح کنترل برای همه فرم‌های بدنه، ضرایب سطوح کنترل به ترتیب برابر با $Y_\delta = -50.6[kg.m/s^2]$ و $N_\delta = -34.6[kg.m^2/s^2]$ فرض می‌شود. تاثیر سطوح کنترل بر روی ضرایب هیدرودینامیکی بازدارنده و جرم‌اضافی کل نیز با استفاده از اصل برهم‌نهی اعمال شده‌است.

۷- نتایج

شکل ۱۰ جریان حول شناور زیرسطحی هوشمند را در تست کشش مورب نشان می‌دهد. سرعت محوری در این شکل برابر با $U = 1[m/s]$ و شناور بدون زاویه حمله می‌باشد. شکل ۱۱ نیز جریان حول شناور زیرسطحی هوشمند را در تست کشش مورب با سرعت محوری $1m/s$ و زاویه حمله ۲۰ درجه نشان می‌دهد.

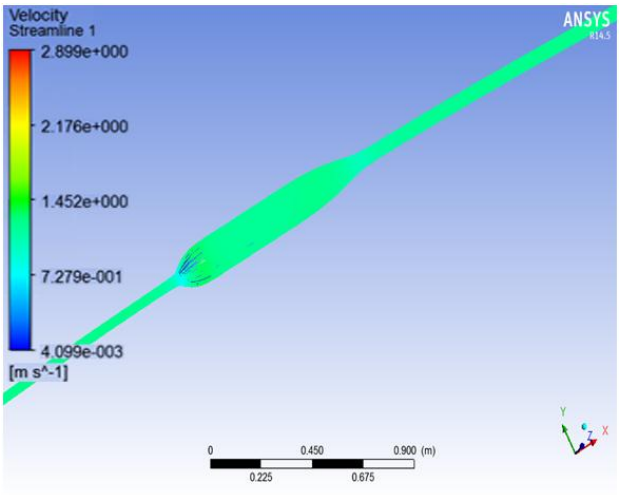


شکل۱۰- جریان حول شناور در تست کشش مورب با زاویه حمله ۰ درجه



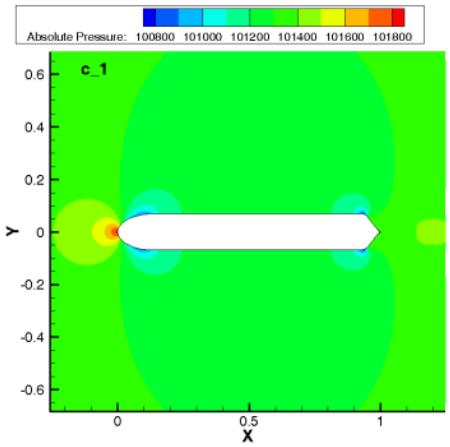
شکل۱۱- جریان حول شناور در تست کشش با زاویه حمله ۲۰ درجه

شکل ۱۲ نیز جریان حول شناور زیرسطحی هوشمند را در تست بازوی چرخان نشان می‌دهد. سرعت محوری شناور برابر با ۱ متر بر ثانیه است و سرعت‌های زاویه‌ای در این تست به گونه‌ای به شناور اعمال می‌شود که سرعت محوری ثابت بماند.

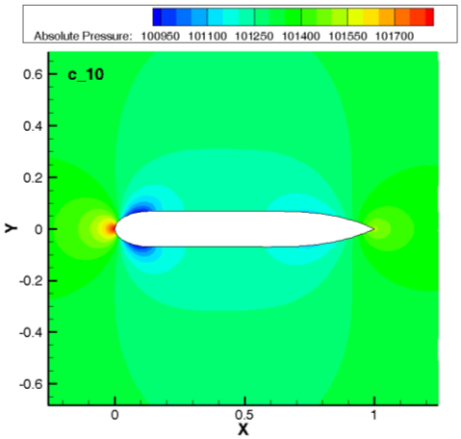


شکل۱۲- جریان حول شناور در تست بازوی چرخان با سرعت $1m/s$

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب توزیع فشار را برای دو فرم بدنه c_1 و c_{10} با طول دم مختلف نشان می‌دهد.



شکل۱۳- توزیع فشار اطراف فرم بدنه c_1

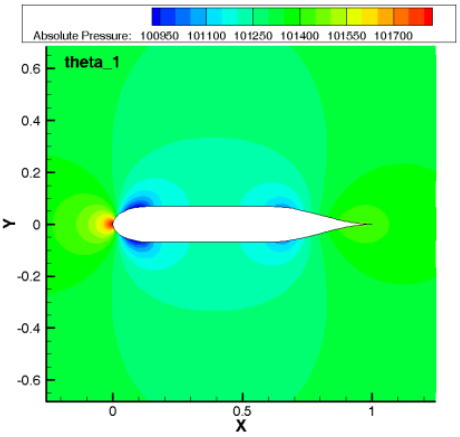


شکل۱۴- توزیع فشار اطراف فرم بدنه c_{10}

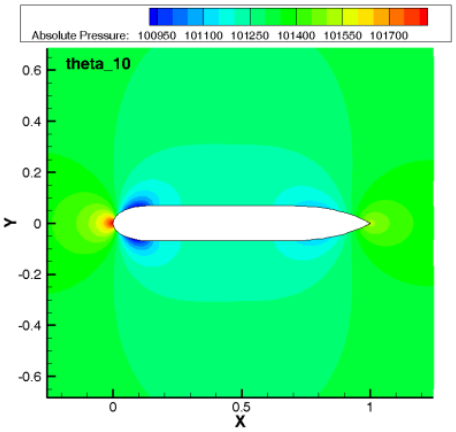
شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب توزیع فشار را برای دو فرم بدنه θ_1 و θ_{10} با زاویه‌های مخروطی دم مختلف نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.10.7]

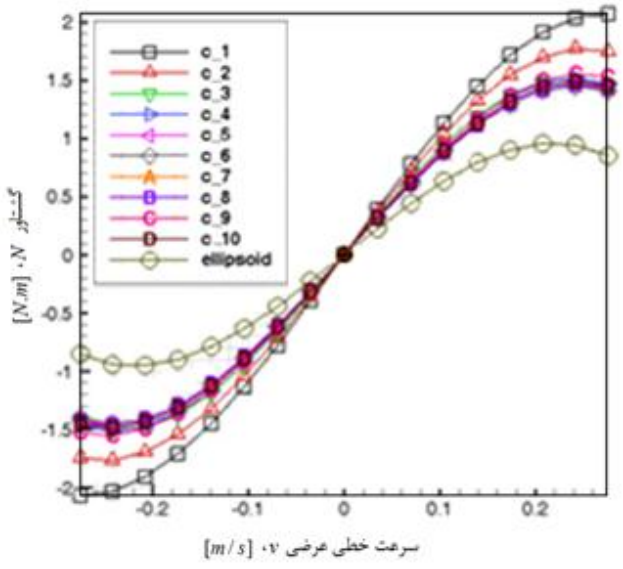


شکل۱۵- توزیع فشار اطراف فرم بدنه θ_1

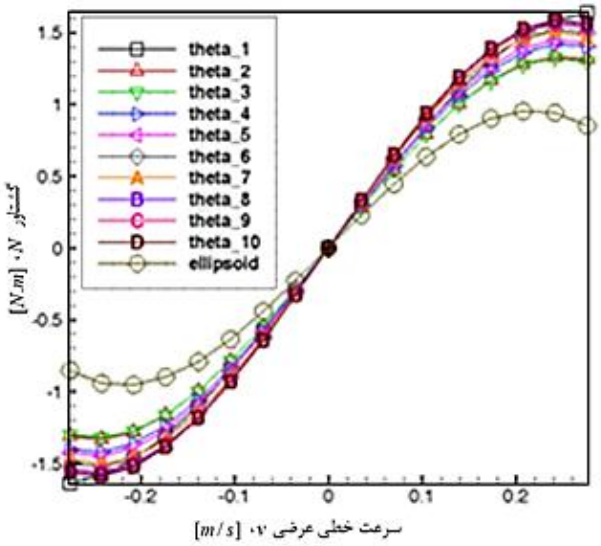


شکل۱۶- توزیع فشار اطراف فرم بدنه θ_{10}

با شبیه‌سازی عددی دو تست کشش مورب و بازوی چرخان، منحنی‌های $Y-v$، $N-v$، $Y-r$ و $N-r$ استخراج شده‌است که به ترتیب ضرایب Y_v، N_v، Y_r و N_r از آن‌ها به دست آمده‌است . شکل‌های ۱۷ و ۱۸ منحنی $N-v$ را به ترتیب برای طول‌ها و زاویه‌های دم مختلف نشان می‌دهد.



شکل۱۷- منحنی $N-v$ برای فرم‌های بدنه با طول دم مختلف



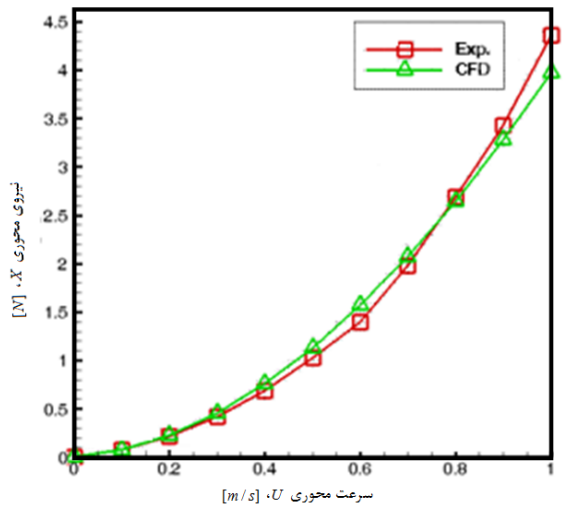
شکل۱۸- منحنی $N-v$ برای فرم‌های بدنه با زاویه دم مختلف

برای اعتبارسنجی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی بدنه ریموس با نتایج پرسترو[۲۴] مقایسه شده‌است. جدول ۴ و شکل ۱۹ این مقایسه را نشان می‌دهد.

با محاسبه ضرایب جرم‌اضافی از روش تئوری نواری، ضرایب مورد نیاز برای تست دایره‌چرخش به دست می‌آید. شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نتایج این مانور را به ترتیب برای فرم‌های بدنه با طول و زاویه دم مختلف نشان می‌دهد.

جدول۴- اعتبارسنجی نتایج استخاج شده برای بدنه ریموس

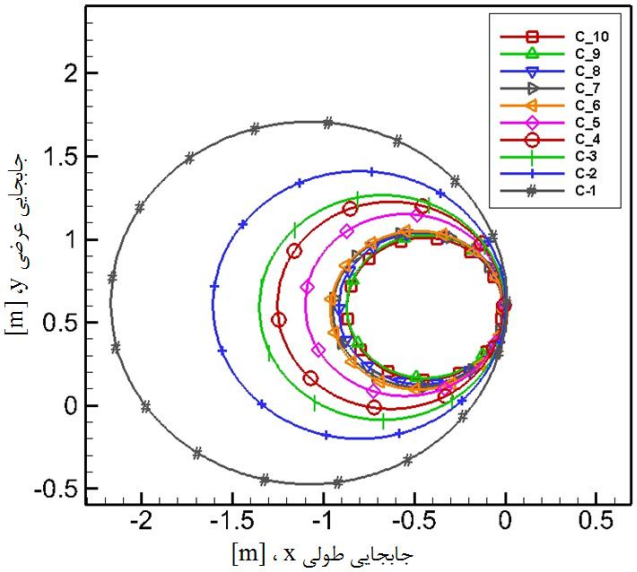
ضریب هیدرودینامیکی	پرسترو	پژوهش حاضر	اختلاف
$Y_v[kg/s]$	-۶۶/۶	-۵۹/۳۸	٪۱۰/۸۴
$N_v[kg.m/s]$	۳۰/۷	۲۵/۳۵	٪۱۷/۴۱
$Y_r[kg.m/s]$	-۹/۶۷	-۷/۳۸	٪۲۳/۷۳
$N_r[kg.m^2/s]$	-۶/۸۷	-۵/۰۹	٪۲۵/۸۶



شکل۱۹- نتایج عددی و آزمایشگاهی منحنی $X-U$ بدنه ریموس، بیشترین اختلاف: ٪۱۲/۶۹، کمترین اختلاف: ٪۱/۷۶

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

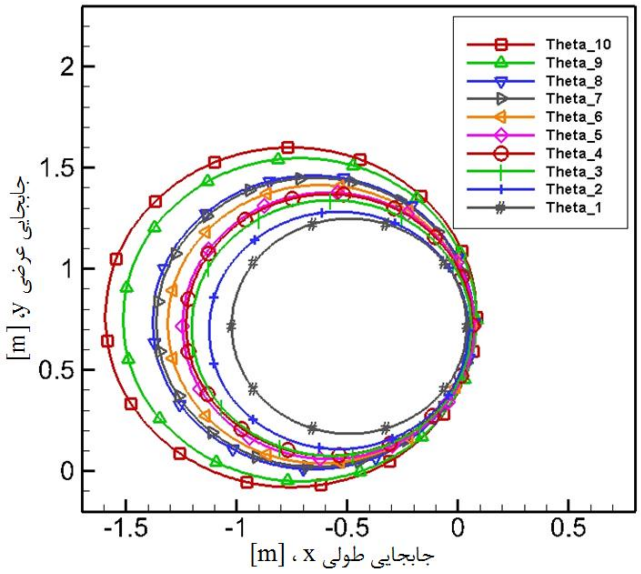
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.10.7]



شکل۲۰- مانور دایره‌چرخش برای فرم‌های با طول دم مختلف

۸- نتیجه‌گیری

تاثیرگذاری فرم هندسی دم شناور زیرسطحی هوشمند بر روی مانورپذیری آن، مورد ارزیابی قرار گرفت. برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بازدارنده از شبیه‌سازی عددی دو تست کشش مورب و بازوی چرخان در دینامیک سیالات محاسباتی و برای محاسبه ضرایب جرم‌اضافی از روش تئوری نواری استفاده شد. جهت ارزیابی مانورپذیری، مانور دایره‌چرخش به صورت عددی و با استفاده از ضرایب به دست آمده در مرحله قبل شبیه‌سازی شد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش طول دم، ضرایب هیدرودینامیکی بازدارنده و جرم‌اضافی کاهش می‌یابد، اما افزایش زاویه مخروطی دم سبب افزایش ضرایب هیدرودینامیکی بازدارنده و جرم‌اضافی می‌گردد. همان‌گونه که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده شد، افزایش طول دم سبب کاهش فشار به خصوص در نقطه سکون شده و موجب کاهش نیروهای هیدرودینامیکی می‌شود. افزایش زاویه مخروطی دم نیز موجب افزایش فشار در ناحیه دم شده و با برهم زدن توزیع فشار، سبب افزایش نیروهای هیدرودینامیکی و در نتیجه آن ضرایب هیدرودینامیکی می‌گردد. به تعبیر دقیق‌تر می‌توان گفت افزایش طول دم به میزان ۱۵٪ ، سبب افزایش ۸۷٪ ضریب جرم‌اضافی $X_{\dot{u}}$ می‌شود اما به ترتیب ضرایب جرم اضافی $Y_{\dot{v}}, N_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, N_{\dot{r}}$ را به میزان ۷۹٪، ۳۸٪، ۳۸٪ و ۰/۳۴٪ کاهش می‌دهد. همچنین افزایش زاویه دم به میزان ۱۵٪ سبب افزایش ضرایب جرم‌اضافی $N_{\dot{r}}$ به ترتیب به میزان $X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}$ ۷/۴۹٪ ، ۲/۹٪ و ۲/۸۴٪ و کاهش ضرایب جرم‌اضافی $Y_{\dot{r}}, N_{\dot{v}}$ به ترتیب به میزان ۱۸۳٪ و ۱۸۳٪ می‌شود. برای ضرایب هیدرودینامیکی بازدارنده نیز می‌توان چنین نتیجه گرفت که افزایش طول دم به میزان ۱۵٪ سبب کاهش ضرایب X_u, Y_v, Y_r, N_r به ترتیب به میزان۲/۸۳٪، ۵/۷۸٪، ۴/۰۸٪ و ۱/۸۷٪و افزایش ضریب N_v به میزان ۴/۹٪ شده‌است. همچنین افزایش زاویه دم به میزان ۱۵٪ سبب افزایش ضرایب بازدارنده X_u, Y_v, N_v, Y_r, N_r به ترتیب به میزان۲۰/۳۵٪، ۱۰/۱۹٪، ۳/۹۹٪ ، ۰/۶۸٪ و ۲/۰۸٪شده‌است.



شکل۲۱- مانور دایره‌چرخش برای فرم‌های با زاویه دم مختلف

شعاع دایره‌چرخش شناور نیز از شکل‌های ۲۰ و ۲۱ استخراج شد. با کاهش مقدار این شعاع، مانورپذیری شناور زیرسطحی هوشمند افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به اینکه افزایش دو پارامتر طول دم و زاویه مخروطی دم به ترتیب باعث کاهش و افزایش شعاع دایره‌چرخش می‌گردد، بنابراین به ترتیب مانورپذیری شناور زیرسطحی هوشمند را افزایش و کاهش می‌دهد که البته تاثیر طول دم بیشتر از زاویه مخروطی آن است، زیرا افزایش ۵۰٪ زاویه دم مقدار شعاع دایره‌چرخش را به میزان۱۰/۸٪ افزایش می‌دهد، اما افزایش ۵۰٪ طول دم، مقدار شعاع دایره‌چرخش را به میزان۱۹/۰۳٪ کاهش می‌دهد. برای اعتبارسنجی، نتایج حاصل از این مقاله با نتایج آزمایشگاهی موجود برای یک شناور زیرسطحی هوشمند مقایسه شد که با وجود برخی اختلافات نسبتا کوچک ناشی از فرضیات موجود در روش‌های عددی و تحلیلی، تطابق خوبی را ارائه می‌دهد.

کلید واژگان

1- Configuration
2- ESAM (Estimate Submarine Added Masses)
3- RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equation)
4- SIMPLAC
5- DDES(Delayed-Detached-Eddy-Simulation)
6- PMM (Planar Motion Mechanism)
7- ANSYS CFX
8- Eddy-Viscosity
9- Cross-diffusion
10- MATLAB

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.10.7]

۹- مراجع

1- Abkowitz, M. A., (1969),*Stability and motion control of ocean vehicles*. Massachusetts Institute of Technology (MIT) Press.

2- Kim , H., and Cho, H., (2011),*Numerical study on control derivatives of a high-speed underwater vehicle*,Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 25, no. 3, p. 759–765.

3- Xu, F.,Zou, Z. J.,Yin, J. C. and Cao, J., (2012), *Parametric identification and sensitivity analysis for Autonomous Underwater Vehicles in diving plane*,Journal of Hydrodynamics, vol. 24, no. 5, pp. 744–751.

4- Parsons, J. S.,Goodsont, R. E., and Goldschmiedt, F. R., (1974), Shaping of axisymmetric bodies for minimum drag in incompressible flow,Journal of Hydronautics, vol. 8, no. 3, pp. 100–107.

5- Lutz, T., and Wagner, S., (1998),*Numerical shape optimization of natural laminar flow bodies*, International Council of the Aeronautical Sciences, no. 15, pp. 1–11.

6- Perrault, D.,Bose, N.,O'Young, S., and Williams, C. D., (2003),*Sensitivity of AUV added mass coefficients to variations in hull and control plane geometry*,Ocean Engineering, vol. 30, no. 5, pp. 645–671.

7- Perrault, D.,Bose, N.,O'Young, S., and Williams, C. D., (2003),*Sensitivity of AUV response to variations in hydrodynamic parameters*,Ocean Engineering, vol. 30, no. 6, pp. 779–811.

8- Tyagi , A. and Sen, D., (2006),*Calculation of transverse hydrodynamic coefficients using computational fluid dynamic approach*,Ocean Engineering, vol. 33, no. 5–6, pp. 798–809.

9- Vaz, G.,Toxopeus, S. and Holmes, S., (2010),*Calculation of manoeuvring forces on submarines using two viscous-flow solvers*, in *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, vol. 6, pp. 621–633.

10- Zeng, G., and Zhu, J., (*2010*),*Study on Key Techniques of Submarine Maneuvering Hydrodynamics Prediction Using Numerical Method*,Second International Conference of Computational, Modeling and Simulation, pp. 83–87.

11- Zhang, H.,Xu, Y. ru, and Cai, H. peng, (2010),*Using CFD software to calculate hydrodynamic coefficients*,Journal of Marine Science and Application, vol. 9, no. 2, pp. 149–155.

12- Pan, Y.,Zhang, H., and Zhou, Q., (2012), *Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation*,Journal of Hydrodynamics, vol. 24, no. 6, pp. 840–847.

13- Zhang, J. T.,Maxwell, J. A.,Gerber, A. G.,Holloway, A. G. L., and Watt, G. D., (2013),*Simulation of the flow over axisymmetric submarine hulls in steady turning*,Ocean Engineering, vol. 57, pp. 180–196.

14- Cao, L. shuai,Zhu, J., and Wan, W. bin,(2016), *Numerical investigation of submarine hydrodynamics and flow field in steady turn*, China Ocean Engneering, vol. 30, no. 1, pp. 57–68.

15- Alvarez, A.,Bertram, V., and Gualdesi, L., (2009),*Hull hydrodynamic optimization of autonomous underwater vehicles operating at snorkeling depth*,Ocean Engineering, vol. 36, no. 1, pp. 105–112.

16- Saout, O., (2003),*Computation of hydrodynamic coefficients and determination of dynamic stability characteristics of an underwater vehicle including free surface effect*,Florida Atlantic University.

17- Phillips, A. B.,Turnock, S. R., and Furlong, M.,(2010), *The use of computational fluid dynamics to aid cost-effective hydrodynamic design of autonomous underwater vehicles*,Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, vol. 224, no. 4, pp. 239–254.

18- Nouri, N. M.,Zeinali, M., and Jahangardy, Y., (2016),*AUV hull shape design based on desired pressure distribution*,Journal of Marine Science and Technology, vol. 21, no. 2, pp. 203–215.

19- Javadi, M.,Manshadi, M. D.,Kheradmand, S., and Moonesun, M., (2015),*Experimental investigation of the effect of bow profiles on resistance of an underwater vehicle in free surface motion*,Journal of Marine Science and Application, vol. 14, pp. 53–60.

20- Moonesun, M.,Korol, Y. M., and Brazhko, A., (2015),*CFD analysis on the equations of submarine stern shape*,Journal of Taiwan Society of Naval Architects and Marine Engineering, vol. 34, no. 1, pp. 21–32.

21- Moonesun, M.,Korol, Y. M.,Dalayeli, H.,Tahvildarzade, D.,Javadi, M.,Jelokhaniyan, M., and Mahdian, A., (2016),*Optimization on submarine stern design*,Journal of Engineering for the Maritime Environment, no. 9, pp. 1–11.

22- Moonesun, M.,Korol, Y. M., and Dalayeli, H., (2015), *CFD analysis on the bare hull form of submarines for minimizing the resistance*,International Journal of Maritime Technology, vol. 3, pp. 1–16.

23- Myring, D. F., (1976),*A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow,*" Aeronautical Quarterly, vol. 27, no. 3, pp. 186–194.

24- Prestero, T., (2001),*Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle*, M.Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.

25- Honaryar, A., (2014), *Investigation on the effect of body form on autonomous underwater vehicle maneuverability*, M.Sc. Thesis, Amirkabir University of Technology.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.10.7]

26- De Souza , H., and Garg, V. K., (1984),*Stability and motion control of ocean vehicles*. Prentice-Hall.
27- De Barros, E. A.,Pascoal, A., and De Sa, E., (2008), *Investigation of a method for predicting AUV derivatives*, vol. 35, pp. 1627–1636.
28- Gao, F. D.,Pan, C. Y. and Y. Han, Y., (2012), *Numerical computation and analysis of high-speed autonomous underwater vehicle (AUV) moving in head sea based on dynamic mesh*,Journal of Central South University, vol. 19, no. 4, pp. 944–952.
29- Dantas , J. L. D. and De Barros, E. A., (2013), *Numerical analysis of control surface effects on AUV manoeuvrability*, Applied Ocean Research, vol. 42, pp. 168–181.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.10.7]