

بررسی تاثیر فرم هندسی دم بر مانورپذیری شناور زیرسطحی هوشمند

امیر هنریار^۱، محمود غیائی^{۲*}، سید حسین موسوی زادگان^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

چکیده

در این مقاله به بررسی اثر فرم هندسی دم بر روی مانورپذیری شناور زیرسطحی هوشمند پرداخته شده است. 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 شده است. برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بازدارنده از شبیه سازی عددی دو تست کشش مورب و بازوی چرخان در دینامیک سیالات محاسباتی به کمک حلگر سی اف ایکس و برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی جرم اضافی از روش تئوری نواری استفاده شده است. استفاده ترکیبی از این دو روش برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی با توجه به ماهیت متفاوت ضرایب، موجب افزایش سرعت و دقت محاسبات شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش طول دم، ضرایب هیدرودینامیکی بازدارنده و جرم اضافی، کاهش و شعاع دایره چرخش و مانورپذیری به ترتیب کاهش و افزایش می یابد و معکوس این نتایج برای زاویه مخروطی دم شناور به دست آمده است.

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

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

Amir Honaryar¹, Mahmoud Ghiasi^{2*}, S. Hosien Mousavizadegan³

¹PhD Student in Marine Engineering, Amirkabir University of Technology; Yarehonar@aut.ac.ir

²Member of the Faculty of Marine Technology, Amirkabir University of Technology; Mghiasi@aut.ac.ir

³Member 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.

۱- مقدمه

شناور زیرسطحی هوشمند به طور گسترده جهت اهداف علمی، تحقیقاتی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هوشمندی یکی از مهمترین ویژگی این متحرک که بسیار متأثر 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 متحرک‌های 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 معمولاً در پیکربندی^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].

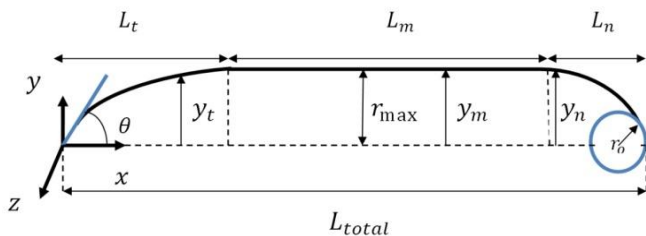
تاثیر فرم هندسی بدنه متحرک‌های دریایی بر روی مشخصه‌های هیدرودینامیکی آن‌ها، همواره مورد توجه محققان و مهندسان مرتبط با حوزه دانش هیدرودینامیک بوده‌است. پارسونز و همکارانش [۴] را می‌توان از اولین افرادی دانست که در سال ۱۹۷۴ به مطالعه پارامتری فرم هندسی بدنه و تاثیر آن بر کاهش نیروی درگ در جریان تراکم‌ناپذیر پرداختند. هدف از مطالعه آن‌ها، طراحی فرم‌های بدنه متقارن محوری با کمترین نیروی 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.

پرات 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 جرم اضافی استفاده نمودند که معادل روابطی است که لامپ برای بیضی‌گون مطرح کرده بود. آن‌ها برای بیان معادلات حرکت نیز از مدل کامپیوتری غیرخطی بر مبنای معادلات نیوتن-اولیتر استفاده کردند. برای بررسی پاسخ شناور، قطر تاکتیکی و زاویه اورشوت به ترتیب از شبیه‌سازی عددی مانورهای دایره‌چرخش و زیگزآگ، محاسبه شد. تی‌اگی و سن در سال ۲۰۰۶ [۸] به محاسبه ضرایب نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی بازدارنده عرضی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بر مبنای معادلات رانز^۳ پرداختند و برای حل معادلات رانز از الگوریتم سیمپلاس^۴ با روش حجم محدود و به کارگیری مدل $k - \epsilon$ برای مدل کردن 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 دی‌دی‌اس^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 بدنه‌های 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 شبیه‌سازی عددی هیدرودینامیک زیردریایی در چرخش پایا البته با دو مدل توربولانسی $k - \epsilon$ و انتقال تنش برشی $k - \omega$ (SST)

بر جریان پتانسیل است، استفاده شده است. برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بازدارنده از شبیه سازی عددی دو تست کشش مورب و دستگاه بازوی چرخان در دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. سپس با به دست آوردن ضرایب هیدرودینامیکی، با استفاده از مدل ابکوویچ نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی محاسبه می شود. برای بررسی مانورپذیری شناور زیرسطحی هوشمند، پارامتر مهم شعاع دایره چرخش از شبیه سازی عددی تست دایره چرخش به دست آمده است.

۲- تعریف ریاضی فرم هندسی بدنه

شناور زیرسطحی هوشمند با توجه به ماموریت ها و کاربردهای متفاوت، دارای فرم های بدنه گوناگونی می باشد. 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 می توان 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_0 تعریف نمود. شکل ۱ تعریف پارامتری فرم هندسی بدنه را نشان می دهد.



شکل ۱- تعریف پارامتری از فرم هندسی کلی بدنه شناور

پس از تعریف کلی از فرم هندسی بدنه شناور زیرسطحی هوشمند و پارامترهای اصلی تعریف کننده 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 آسان تر 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 می شود. در این رابطه همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، شعاع $r(x)$ پروفیل بدنه در راستای محور طولی x ، قطر بیشینه d ، زاویه انتهای دم θ ، طول ناحیه دماغه، b طول ناحیه میانی، c طول ناحیه دم و n مشخصه مرتبه سهمی ناحیه دماغه که به نوعی تعیین کننده شعاع دایره جلوی دماغه نیز می باشد.

پرداختند. آلوارز و همکاران [۱۵] نیز به بهینه سازی فرم بدنه شناور زیرسطحی هوشمند برای حرکت در عمق اسنورکلی پرداختند. آن ها با تغییرات فرم دماغه و دم شناور، فرم بدنه ای را پیشنهاد دادند که می تواند تا ۲۵ درصد مقاومت کل را کاهش دهد که بیشترین میزان این کاهش در مقاومت موج سازی 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 آن ها با توجه به اینکه در نزدیکی سطح آزاد حرکت می کند، به خصوص در ناحیه دماغه و دم، نسبت به بدنه های معمول متفاوت می باشد. 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.

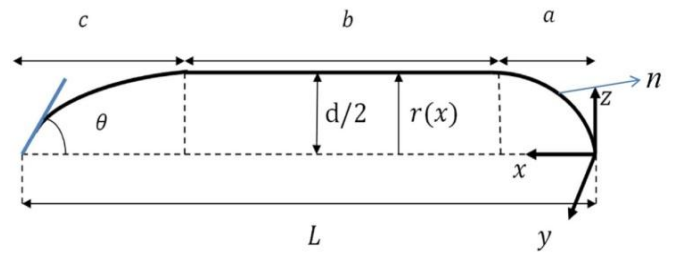
از جمله فعالیت های محققان ایرانی در این زمینه که اخیرا صورت گرفته است می توان به مطالعه نوری، زینعلی و جهانگردی [۱۸] بر روی طراحی فرم بدنه شناور زیرسطحی هوشمند بر مبنای توزیع فشار مناسب اشاره نمود. در کار ایشان به تاثیرگذاری ماموریت شناور زیرسطحی هوشمند بر فرم بدنه آن اشاره شده است. آن ها با تغییر پروفیل دماغه و دم شناور زیرسطحی هوشمند توزیع فشار اطراف بدنه را مورد ارزیابی قرار داده اند و دریافتند که می توان با طراحی فرم بدنه به توزیع فشار دلخواه دست یافت. جواد، 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 حوضچه کشش مورد ارزیابی قرار داده اند. 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 شده است. 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 شده است. در ادامه با تغییر این دو پارامتر و با توجه به ثابت نگه داشتن طول و قطر کلی بدنه، تاثیرگذاری آن ها بر روی ضرایب هیدرودینامیکی بررسی شده است. برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی جرم اضافی از روش تئوری نواری که مبتنی

جدول ۱- مشخصه‌های هندسی معادله ریاضی فرم مینا

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

$$r(x) = f(d, \theta, a, b, c, n) \quad (1)$$



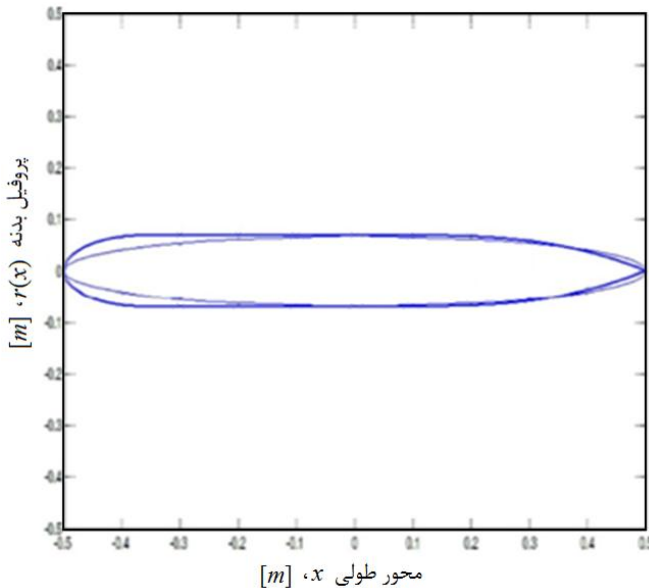
شکل ۲- بیان ریاضی معادله پروفیل بدنه

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

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

$$r(x) = \frac{1}{2}d, \quad a < x < a+b \quad (3)$$

$$r(x) = \frac{1}{2}d - \left[\left(\frac{3d}{2c^2} \right) - \left(\frac{\tan \theta}{c} \right) \right] (x - (a+b))^2 + \left[\left(\frac{d}{c^3} \right) - \left(\frac{\tan \theta}{c^2} \right) \right] (x - (a+b))^3, \quad a+b < x < a+b+c \quad (4)$$



شکل ۳- فرم هندسی مینا نزدیک به فرم بیضیگون

۳-۱- فرم‌های هندسی تعریف شده با تغییرات زاویه دم

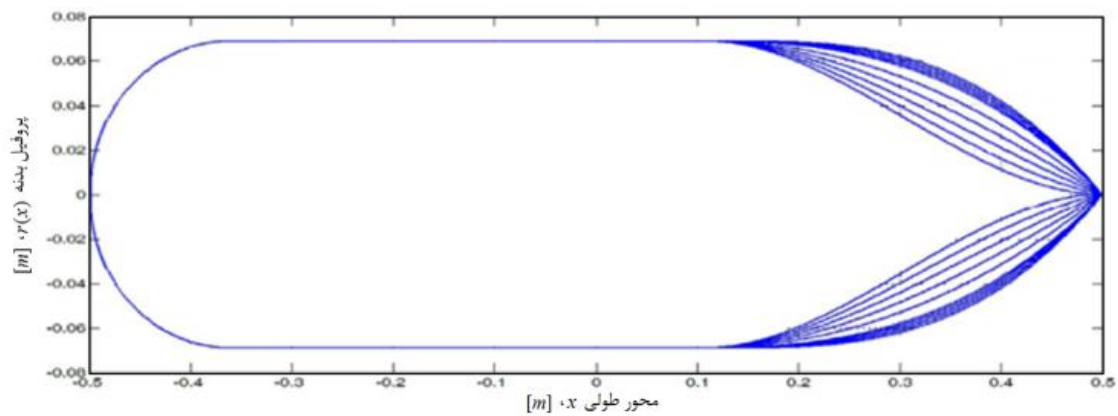
همان‌گونه که پیش از این بیان شد، یکی از پارامترهای موثر در معادله فرم بدنه در ناحیه دم، زاویه مخروطی دم می‌باشد. برای بررسی تاثیر آن (پارامتر θ)، ۱۰ فرم بدنه مطابق جدول ۲ تعریف شده‌است. در شکل ۴ نیز این ۱۰ فرم بدنه با زاویه‌های مختلف نشان داده شده‌است. سایر پارامترهای a, b, c, d, n برای هر ۱۰ فرم بدنه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

۳-۲- فرم‌های بدنه مورد بررسی

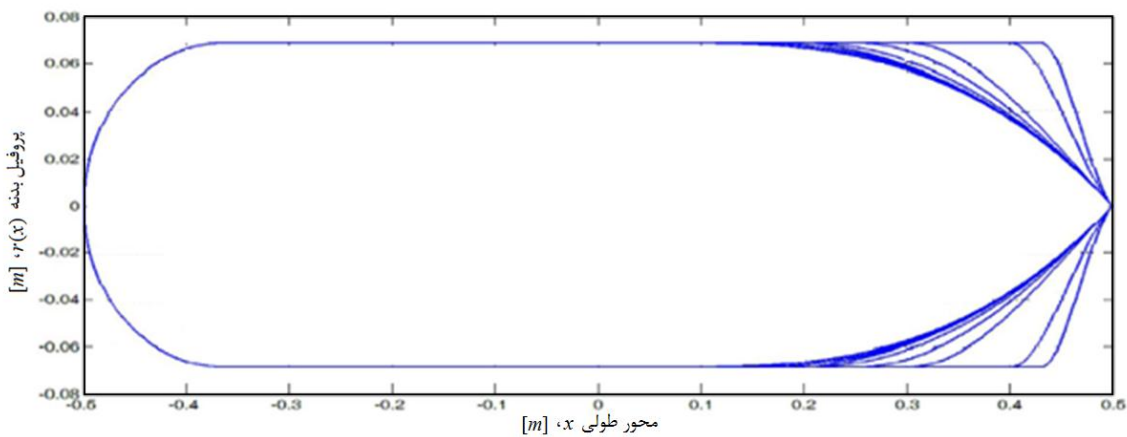
پس از بیان ریاضی فرم بدنه شناور زیرسطحی هوشمند به صورت تابعی از پارامترهای هندسی، برای بررسی تاثیر فرم دم بر مانورپذیری، با تغییرات پارامترهای طول دم و زاویه مخروطی آن، می‌توان فرم‌های مختلف را ایجاد نمود و تاثیر هر یک از این دو پارامتر را بر روی ضرایب هیدرودینامیکی و سپس بر روی مانورپذیری بررسی کرد.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

جدول ۲- فرم‌های بدنه تعریف شده بر حسب مشخصه زاویه انتهای دم

فرم بدنه	θ [°]	فرم بدنه	θ [°]
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



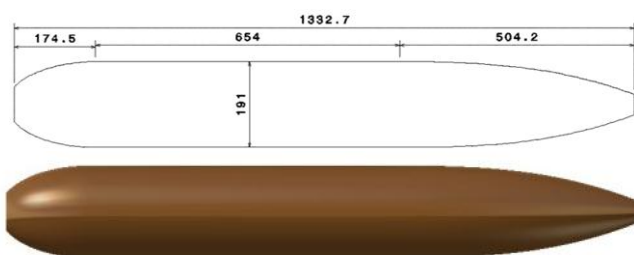
شکل ۴- فرم‌های بدنه تعریف شده با زاویه‌های مخروطی دم مختلف مطابق با جدول ۲



شکل ۵- فرم‌های بدنه تعریف شده با طول دم مختلف مطابق با جدول ۳

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.



شکل ۶- فرم بدنه شناور زیرسطحی هوشمند ریموس (ابعاد به میلی‌متر است)

۲-۳- فرم‌های هندسی تعریف شده با تغییرات طول دم

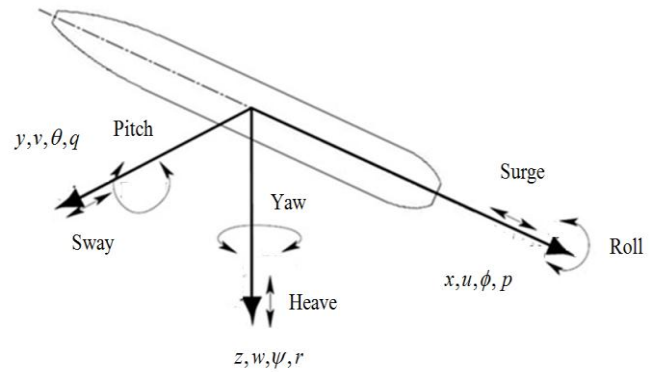
یکی دیگر از پارامترهای موثر در معادله فرم بدنه در ناحیه دم، طول دم C می‌باشد. برای بررسی تاثیر این پارامتر، ۱۰ فرم بدنه مطابق جدول ۳ تعریف شده‌است. در شکل ۵ نیز این ۱۰ فرم بدنه با طول‌های دم مختلف نشان داده شده‌است.

جدول ۳- 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

۴- معادلات حرکت حاکم بر مسئله

شناور زیرسطحی هوشمند درون سیال آب دارای شش درجه آزادی (سه حرکت خطی هیو، سرچ و اسوی و سه حرکت دورانی یاو، رول و پیچ) می باشد، حرکت های شناور در شش درجه آزادی نسبت به دستگاه مختصات متصل به بدنه در شکل ۷ تعریف شده است. در صورتی که دستگاه مختصات متصل به بدنه دارای سرعت های زاویه ای در جهتهای مختلفی باشد، می توان این سرعت های زاویه ای را با استفاده از زاویه های اوپلر توصیف نمود [۱].



شکل ۷- حرکت های شناور زیرسطحی هوشمند در شش درجه آزادی [۲۵]

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

$$\begin{cases} X = m[\dot{u} + qw - rv] \\ Y = m[\dot{v} + ru - pw] \\ Z = m[\dot{w} + pv - qu] \\ K = I_{xx}\dot{p} + I_{xy}\dot{q} + I_{xz}\dot{r} + (I_{zz} - I_{yy})rq \\ \quad + I_{yz}(q^2 - r^2) + I_{xz}pq - I_{xy}pr \\ M = I_{yx}\dot{p} + I_{yy}\dot{q} + I_{yz}\dot{r} + (I_{xx} - I_{zz})pr \\ \quad + I_{xz}(r^2 - p^2) + I_{xy}qr - I_{yz}qp \\ N = I_{zx}\dot{p} + I_{zy}\dot{q} + I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq \\ \quad + I_{xy}(p^2 - q^2) + I_{yz}pr - I_{xz}qr \end{cases} \quad (5)$$

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 مولفه های سرعت خطی و زاویه ای می باشد. در مقاله حاضر، مطالعه سه درجه آزادی به دلیل فرض حرکت در صفحه افقی انجام گرفته است. نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی وارد بر شناور در صفحه حرکتی افقی را می توان با استفاده از بسط تیلور به صورت رابطه (۶) بیان نمود.

$$\begin{cases} X = X_e + X_u \Delta u + X_{\dot{u}} \dot{u} + X_{\delta} \delta \\ Y = Y_e + Y_v v + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_r r + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\delta} \delta \\ N = N_e + N_v v + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_r r + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\delta} \delta \end{cases} \quad (6)$$

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

$$\begin{cases} (m - X_{\dot{u}})\dot{u} = X_u \Delta u + \tilde{X} \\ (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (m x_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} = \\ \quad Y_v v + (Y_r - mU)r + \tilde{Y} \\ (m x_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_{zz} - N_{\dot{r}})\dot{r} = \\ \quad N_v v + (N_r - m x_G U)r + \tilde{N} \end{cases} \quad (7)$$

که در آن $\tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{N}$ 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 می باشد.

۵- شبیه سازی عددی در دینامیک سیالات محاسباتی

روش های عددی برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی با توجه به هزینه کمتر نسبت به روش های آزمایشگاهی، روش مناسبی است. در این بخش به شبیه سازی عددی دو تست کشش مورب و دستگاه بازوی چرخان در دینامیک سیالات محاسباتیبه کمک حلگر سی اف ایکس^v پرداخته شده است.

۵-۱- معادلات حاکم بر جریان سیال

معادله پیوستگی، معادلات ممنتوم (ناویر-استوکس) و معادله انرژی از جمله مهم ترین معادلات حاکم بر جریان سیال می باشند. با توجه به اینکه جریان سیال اطراف شناور زیرسطحی هوشمند از نوع جریان تراکم ناپذیر می باشد، نیازی به حل معادله انرژی به طور جداگانه نیست. معادله پیوستگی با استفاده از قانون بقای جرم مطابق با رابطه (۸) به دست می آید.

آشفتگی بر اساس مدل $k - \omega$ نوشته شده است و جریان کناره دیواره (بدنه شناور) را مشابه با این مدل پیش‌بینی می‌نماید، به طوری که دو معادله بقایی برای انرژی جنبشی آشفتگی و ورتیسیتته 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^۱، طراحی شده است. استفاده از این مدل برای شبیه‌سازی لایه‌مرزی توصیه می‌شود. این مدل برای غلبه بر نقایص مدل $k - \omega$ گسترش یافته است. 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 کشتی مورب و بازوی چرخان پرداخته شده است، جریان حاکم دارای ماهیت چرخشی است و پدیده‌هایی مانند جدایش جریان و تغییرات ناگهانی گرادیان فشار اهمیت می‌یابد و از این‌رو شبیه‌سازی 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 $k - \omega$ (SST) انتخاب شده است. 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 $k - \omega$ (SST) بهره بردند. آن‌ها دلیل استفاده از این مدل را جمع مزیت‌های دو مدل $k - \varepsilon$ و $k - \omega$ در مدل $k - \omega$ (SST) 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 $k - \omega$ (SST) استفاده کردند. آن‌ها چنین بیان کردند که این مدل آشفتگی علاوه بر اینکه در مقایسه با سایر مدل‌ها دقت نسبتاً 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 $k - \omega$ (SST) برای بررسی عددی میدان جریان اطراف شناور

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\forall} \rho d\forall + \iint_S \rho V dS = 0 \quad (۸)$$

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.

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

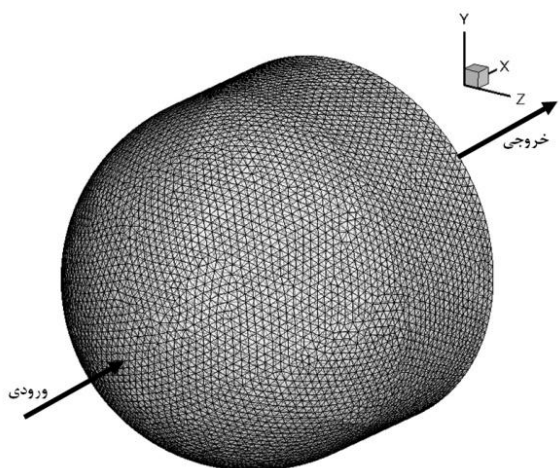
در این رابطه u_i و u_j مولفه‌های سرعت، τ_{ij} مولفه تنش برشی و f_i مولفه نیرو در واحد حجم می‌باشد.

۵-۲- مدل‌سازی اغتشاش

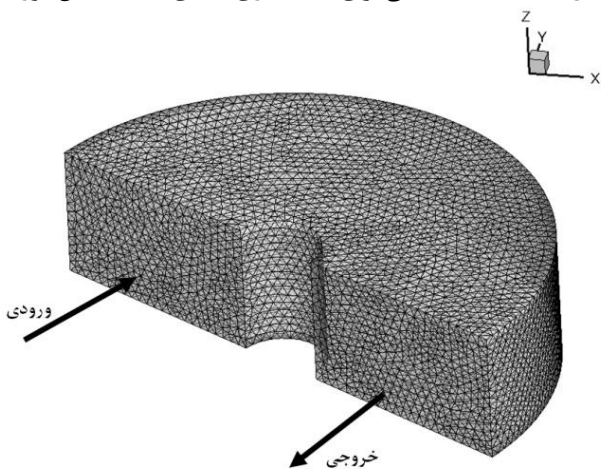
در عدد رینولدز بالاتر از مقدار بحرانی، رفتار جریان تصادفی و نامنظم می‌شود به طوری که سرعت و سایر خواص جریان به صورت دائمی و نامنظم تغییر می‌کند. طبیعت تصادفی جریان آشفته مانع از محاسبات و بررسی کامل حرکت همه ذرات سیال می‌شود. در عوض می‌توان سرعت را به دو بخش مقدار متوسط دائمی و مولفه نوسانی تقسیم نمود. 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.

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

در این رابطه μ ویسکوزیته سیال، \bar{p} فشار، x_i و x_j مولفه‌های بردار مکان می‌باشد. به عبارتی می‌توان گفت، تنها تفاوت معادلات (۱۰) و (۹) عبارت $\overline{\rho v_i v_j}$ 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) اصطلاحاً معادلات رانز نامیده می‌شود. برای مدل‌کردن آشفتگی از مدل انتقال تنش برشی $k - \omega$ (SST) استفاده شده است. این مدل



شکل ۸- شبکه محاسباتی برای شبیه‌سازی عددی تست کشش مورب



شکل ۹- 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^{۱۱} پرداخته شده‌است. مانور دایره‌چرخش، مانوری است که در آن هدف هم تغییر مسیر و هم کنترل آن است. در مانور دایره‌چرخش، شناور زیرسطحی هوشمند نهایتاً در یک مسیر دایره‌ای شکل با شعاع ثابت R در حالت پایا و سرعت‌های 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 کوچک بودن δ و بزرگ بودن R مطابق با رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$\frac{R}{L} = \left(\frac{U}{L} \right) \frac{Y_v(N_r - mx_G U) - N_v(Y_r - mU)}{(Y_v N_\delta - N_v Y_\delta)} \left(\frac{1}{\delta} \right) \quad (12)$$

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 $(SST)k - \omega$ 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.

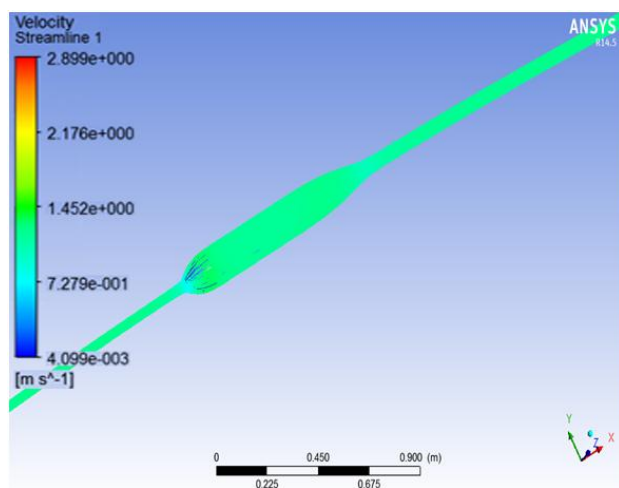
$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k U) = \nabla \cdot (\gamma_k \nabla k) + \tilde{G}_k + Y_k \quad (11)$$

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \omega U) = \nabla \cdot (\gamma_\omega \nabla \omega) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega$$

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. عبارت D_ω بخش متقاطع^۹ و γ_k و γ_ω به ترتیب معرف پخش موثر k و ω می‌باشد.

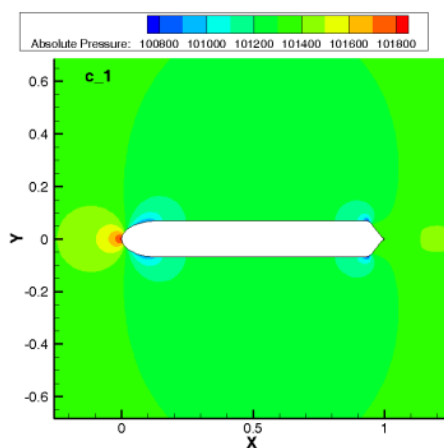
۵-۳- شبیه‌سازی آزمون‌ها

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 Y و گشتاور یا 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 Y و گشتاور یا 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.

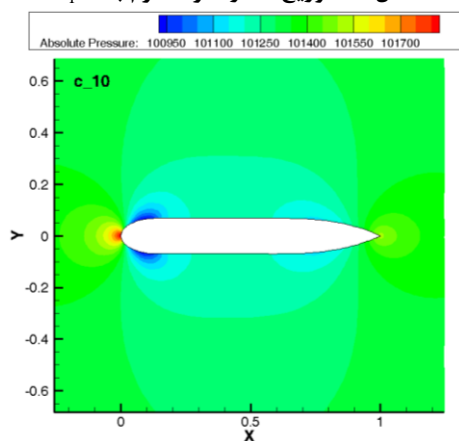


شکل ۱۲- جریان حول شناور در تست بازوی چرخان با سرعت 1 m/s

شکل های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب توزیع فشار را برای دو فرم بدنه C_1 و C_{10} با طول دم مختلف نشان می دهد.



شکل ۱۳- توزیع فشار اطراف فرم بدنه C_1



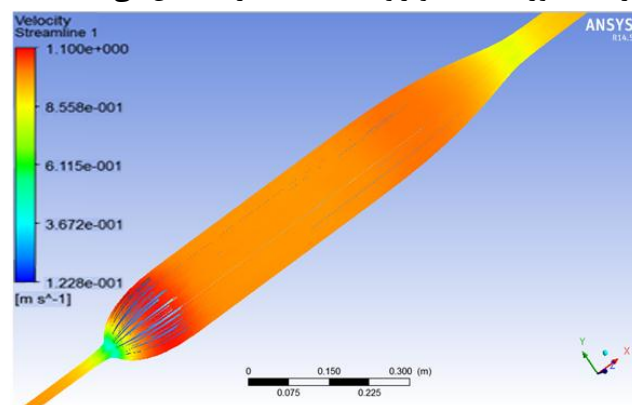
شکل ۱۴- توزیع فشار اطراف فرم بدنه C_{10}

شکل های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب توزیع فشار را برای دو فرم بدنه θ_1 و θ_{10} با زاویه های مخروطی دم مختلف نشان می دهد.

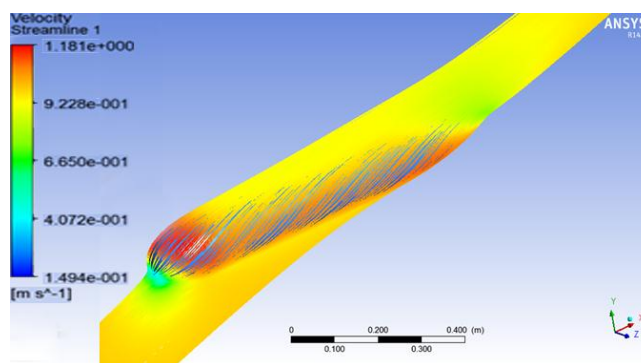
با توجه به ثابت بودن سطوح کنترل برای همه فرم های بدنه، ضرایب سطوح کنترل به ترتیب برابر با $N_\delta = -34.6[\text{kg.m}^2/\text{s}^2]$ و $Y_\delta = -50.6[\text{kg.m}/\text{s}^2]$ فرض می شود. تاثیر سطوح کنترل بر روی ضرایب هیدرودینامیکی بازدارنده و جرم اضافی کل نیز با استفاده از اصل برهم نهی اعمال شده است.

۷- نتایج

شکل ۱۰ جریان حول شناور زیرسطحی هوشمند را در تست کشش مورب نشان می دهد. سرعت محوری در این شکل برابر با $U = 1[\text{m/s}]$ و شناور بدون زاویه حمله می باشد. شکل ۱۱ نیز جریان حول شناور زیرسطحی هوشمند را در تست کشش مورب با سرعت محوری 1 m/s و زاویه حمله 20° درجه نشان می دهد.

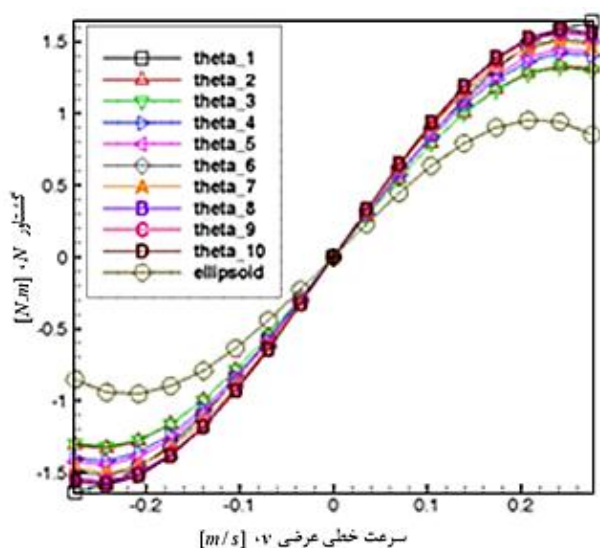


شکل ۱۰- جریان حول شناور در تست کشش مورب با زاویه حمله 0° درجه



شکل ۱۱- جریان حول شناور در تست کشش با زاویه حمله 20° درجه

شکل ۱۲ نیز جریان حول شناور زیرسطحی هوشمند را در تست بازوی چرخان نشان می دهد. سرعت محوری شناور برابر با ۱ متر بر ثانیه است و سرعت های زاویه ای در این تست به گونه ای به شناور اعمال می شود که سرعت محوری ثابت بماند.



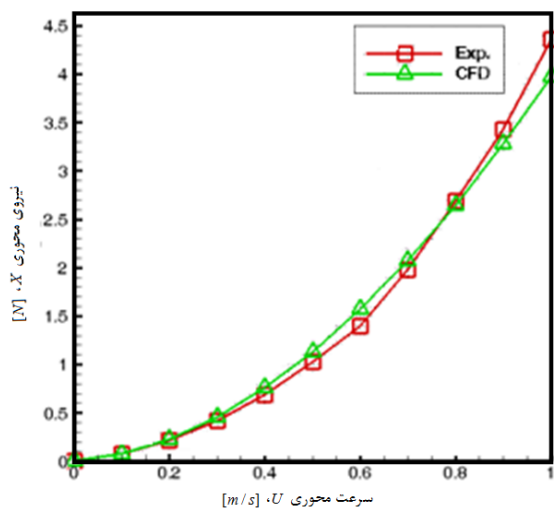
شکل ۱۸- منحنی $N - v$ برای فرم‌های بدنه با زاویه دم مختلف

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.

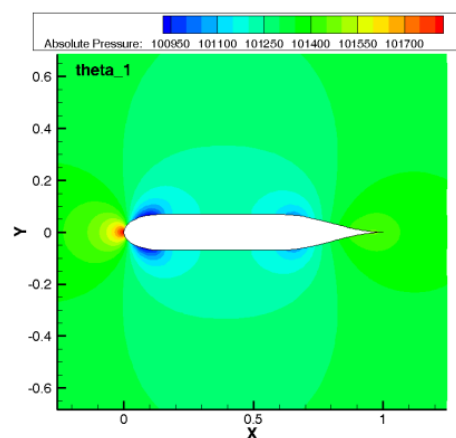
جدول ۴- اعتبارسنجی نتایج استخراج شده برای بدنه ریموس

ضریب هیدرودینامیکی	پرسترو	پژوهش حاضر	اختلاف
$Y_v [kg/s]$	-۶۶۱۶	-۵۹۳۸	٪۱۰/۸۴
$N_v [kg.m/s]$	۳۰۱۷	۲۵۳۵	٪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

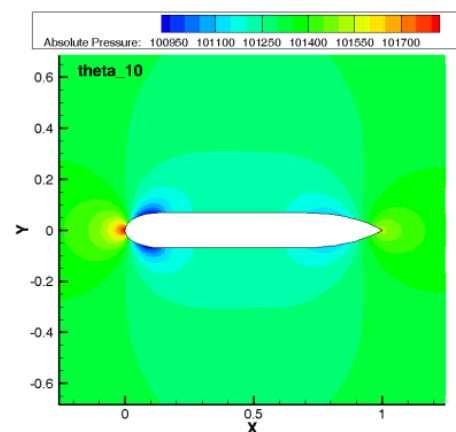


شکل ۱۹- نتایج عددی و آزمایشگاهی منحنی $N - U$ بدنه ریموس،

بیشترین اختلاف: ٪۱۲/۶۹، کمترین اختلاف: ٪۱/۷۶

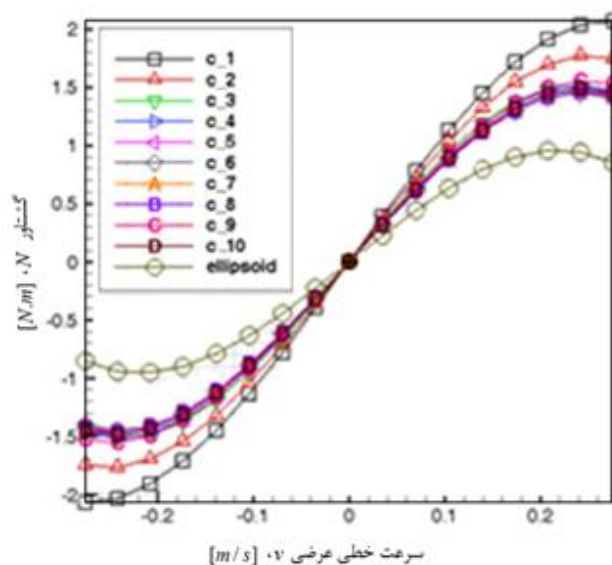


شکل ۱۵- توزیع فشار اطراف فرم بدنه θ_1



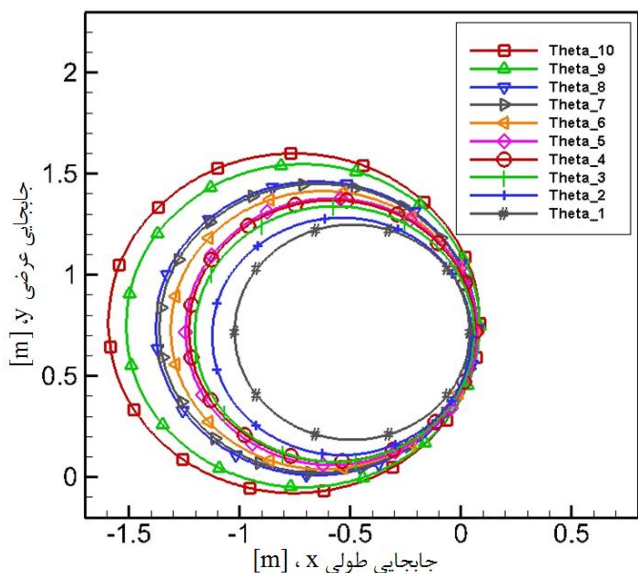
شکل ۱۶- توزیع فشار اطراف فرم بدنه θ_{10}

با شبیه‌سازی عددی دو تست کشش مورب و بازوی چرخان، منحنی‌های $N - v$ ، $Y - v$ ، $N - r$ و $Y - r$ 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.



شکل ۱۷- منحنی $N - v$ برای فرم‌های بدنه با طول دم مختلف

۵/۷۸٪، ۴/۰۸٪ و ۱/۸۷٪ افزایش ضریب N_v به میزان ۴/۹٪ شده- است. همچنین افزایش زاویه دم به میزان ۱۵٪ سبب افزایش ضرایب بازدارنده N_r, Y_r, N_v, Y_v, X_u به ترتیب به میزان ۲۰/۳۵٪، ۱۰/۱۹٪، ۳/۹۹٪، ۰/۶۸٪ و ۲/۰۸٪ شده است.

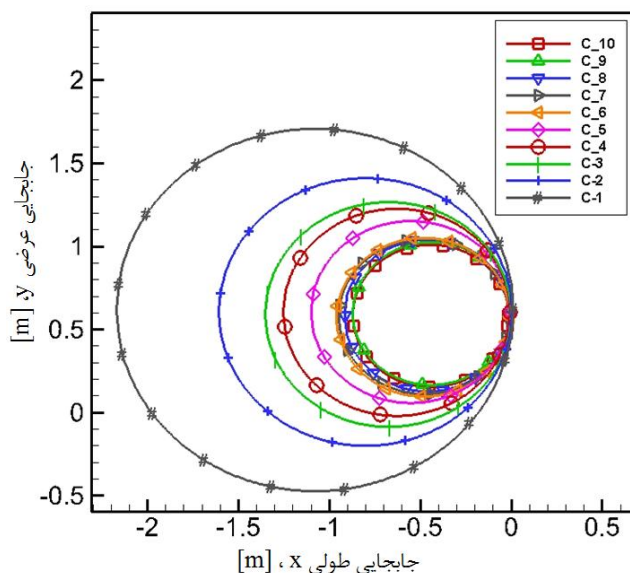


شکل ۲۱- مانور دایره چرخش برای فرم‌های با زاویه دم مختلف

شعاع دایره چرخش 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 دایره چرخش 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 دایره چرخش را به میزان ۱۰/۸٪ افزایش می‌دهد، اما افزایش ۵۰٪ طول دم، مقدار شعاع دایره چرخش را به میزان ۱۹/۰۳٪ 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 نسبتاً 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



شکل ۲۰- مانور دایره چرخش 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 دایره چرخش 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_{ii} می‌شود اما به ترتیب ضرایب جرم‌اضافی N_r, Y_r, N_v, Y_v را به میزان ۳۸٪، ۳۸٪، ۳۸٪ و ۳۴٪ کاهش می‌دهد. همچنین افزایش زاویه دم به میزان ۱۵٪ سبب افزایش ضرایب جرم‌اضافی N_r, Y_r, X_{ii} به ترتیب به میزان ۷/۴۹٪، ۲/۹٪ و ۲/۸۴٪ و کاهش ضرایب جرم‌اضافی N_v, Y_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 N_r, Y_r, Y_v, X_{ii} به ترتیب به میزان ۲/۸۳٪،

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 Engineering, 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.

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., Goodson, 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*

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.

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*