

بررسی هندسه بدنه و سطوح کنترلی بر روی عملکرد هیدرودینامیکی ربات های AUV

محمد سعید سیف^۱، علی حسونند^{۲*}

^۱ استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، Seif@sharif.edu

^۲ دکتری مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی شریف، Ali.hasanvand@mech.sharif.edu

چکیده

ربات های زیرسطحی مجموعه ای از وسایل دریایی هستند که برای مقاصد از قبیل اکتشاف، حفاری، کابل گذاری زیردریا، نگهداری و تعمیرات سازه های دریایی و کاربردهای نظامی بکار میروند. در این پژوهش، سعی بر ارائه زمینه مناسبی جهت طراحی مفهومی کاربردی ربات های AUV با در نظر گرفتن هندسه های رایج برای طراحی بدنه می باشد. با استفاده از نرم افزار MATLAB برنامه ای تهیه شده است که با در نظر گرفتن اطلاعات اولیه کاربر، طراحی مفهومی کاربردی را در اختیار کاربر قرار می دهد. در این برنامه سری های بدنه پر کاربرد DARPA Suboff، Series 58، Myring و DRDC گنجانده شده است تا کاربر بتواند از بدنه های رایج برای طراحی بهره ببرد. خروجی های این برنامه محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی و شبیه سازی مانورهای عملیاتی، طراحی سیستم رانش، بررسی استحکام سازه ای و محاسبات هندسی بدنه ربات زیرسطحی AUV هستند که براساس الگوریتم های طراحی شده سعی گردیده در محدوده ای مناسب و بهینه قرار داشته باشند. اساس این مطالعه دیدگاهی عملیاتی و کاربردی، باتوجه به خواسته ها و الویت های عملیاتی طراحان می باشد و با نتایجی که ارائه شده است، می توان برای شرایط مختلف هندسه ای مطلوب تری برای طراحی فرم هندسی بدنه انتخاب نمود.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳

کلمات کلیدی:

طراحی AUV

مدلسازی هیدرودینامیکی

هندسه بدنه

طراحی مفهومی

سیستم رانش

Investigating the geometry and control surface of AUV robots on hydrodynamics performance

Mohammad Saeed Seif¹, Ali Hasanvand^{2*}

¹Mechanical Engineering Department, Sharif University of technology, seif@sharif.edu

²ph.D of naval architecture, Sharif University of technology, Ali.hasanvand@mech.sharif.edu

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 11 Sep. 2020

Accepted: 13 Mar. 2021

Keywords:

Design AUV

Hydrodynamic modeling

Hull geometry

Preliminary design

Propulsion system

ABSTRACT

Underwater equipment is a set of marine equipment used for purposes such as exploration, drilling, submarine cabling, maintenance and repair of offshore structures, and military applications. In this research, we try to provide a suitable background for the conceptual design of AUV robots by considering the common geometries for hull design. Using MATLAB software, software has been prepared that provides the user with a practical concept design based on the user's basic information. In this software, the widely used body series DARPA Suboff, Series 58, Myring and DRDC are included so that the user can use the mentioned bodies for design according to his style. The results of this program are calculation of hydrodynamic coefficients and simulation of maneuvers, design of propulsion system, structural strength study and geometric calculations of AUV, which based on designed program have been tried to be in the appropriate and optimal range. The principle of this study is an operational and applied perspective. Based on the results of the algorithm, a more desirable geometry can be selected for different conditions to design the geometric form of the AUV's hull.

۱ - مقدمه

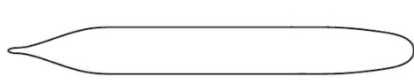
شرایط فیزیکی مختلف و تاثیرات محیط و جنس طراحی پروانه های مدرن از دیگر مباحثی می باشد که در این کتاب مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳]. در [۱۴] به روش های اتخاذ شده برای طراحی ربات های زیرسطحی می پردازد. به ویژه، تمرکز اصلی این مطالعه بر سیستم رانش آن است. ادوارد و فوسن روش هایی برای مدلسازی دینامیکی و محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی وسیله های دریایی ارائه داده اند [۱۵ و ۱۶]. حسنونند و همکاران به بررسی تاثیر پروفیل سکان بر عملکرد مانور کشتی به صورت مدلسازی مستقیم پرداخته اند [۱۷].

۲ - هندسه و استحکام

برای طراحی فرم بدنه ربات های AUV از سری های خاصی برای طراحی استفاده می شود. نمای ظاهری فرم بدنه و معادله هر کدام در شکل ۱ تا ۴ ارائه شده است. این سری ها هر کدام دارای مزایا و معایب مختص خود می باشند که می تواند تاثیر بسزایی در عملکرد ربات در عملیات مدنظر می باشد.

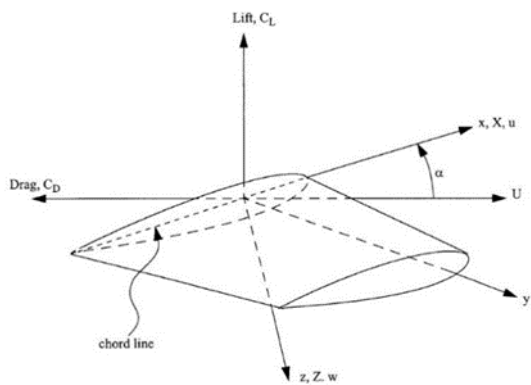
	Myring	1
$R = \frac{D}{2} \left[1 - \left(\frac{x_f}{L_f} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n_f}}$	Nose eq	
$R = \frac{D}{2} - \left[\frac{3D}{2L_A^2} - \frac{\tan \alpha_t}{L_A} \right] x_a^2 + \left[\frac{D}{L_A^3} - \frac{\tan \alpha_t}{L_A^2} \right] x_a^3$	Tail eq	

شکل ۱ نمای هندسی بدنه مایرینگ همراه با معادله بدنه [۲۱]

	DARPA	2
$R = \frac{D}{2} [1.126395101 x_{SUBOFF} (0.3 x_{SUBOFF} - 1)^4 + 0.442874707 x_{SUBOFF}^2 (0.3x - 1)^4 (1.2x + 1)^{1/2.1}]$	Nose eq	
$R = \frac{D}{2} \left[r_h^2 + r_h K_0 \xi^2 + (20 - 20r_h^2 - 4r_h K_0 - \frac{1}{3} K_1) \xi^3 + (-45 + 45r_h^2 + 6r_h K_0 + K_1) \xi^4 + (36 - 36r_h^2 - 4r_h K_0 - K_1) \xi^5 + (-10 + 10r_h^2 + r_h K_0 + \frac{1}{3} K_1) \xi^6 \right]^{1/2}$	Tail eq	

شکل ۲ نمای هندسی بدنه سابوف همراه با معادله بدنه [۲۱]

مطالعه و بررسی بسیاری از مسائل مهندسی، زیست شناسی، تجاری و نظامی مرتبط با دریاها همواره مورد توجه محققان بوده است. لذا توجه به توسعه و گسترش صنایع دریایی و علوم مرتبط با دریا، امروزه برای انجام بسیاری از کاربردهای کشف و استخراج منابع زیرآبی، بازرسی و جمع آوری اطلاعات زیست محیطی و تحقیقاتی، نصب، تعمیر و نگهداری سازه های ساحلی و دریایی، مستلزم بکارگیری تکنولوژی خاص و جدیدی برای پاسخ گویی به نیازهای روزافزون پیش آمده می باشد. ربات های AUV از سری وسایل زیرسطحی هستند که به منظور عملیات تحقیقاتی و بهره برداری توجهات بخش های آکادمیک، تحقیقاتی و صنعتی در سراسر دنیا را به خود جلب کرده است. طراحی ربات های AUV شامل مراحل مختلف و پیچیده ای می باشد که همواره چالش هایی برای طراح ایجاد می نماید. روند طراحی ربات ها مانند کشتی های تجاری دارای نمودار حلزونی می باشد که وقت زیادی را طراح برای انجام روند طراحی صرف می کند. کورتیس و همکاران در پژوهش خود پروسه طراحی، ساخت و تست های اولیه یک ربات زیر سطحی C-SCOUT با قابلیت انجام چند ماموریت را شرح داده اند [۱]. مایرنگ و همکاران به بررسی یک نوع فرم بدنه زیرسطحی و محاسبه تاثیر فرم دماغه و دم در ضریب درگ پرداخته اند [۲]. ماکای در پژوهش خود به بررسی نیرو و ممان های وارده به بدنه ای DRDC به صورت آزمایشگاهی و در تونل باد پرداخته است [۳]. جکسون در کتابچه خود براساس سابقه بیست ساله تحقیقات دانشگاه MIT در زمینه طراحی زیردریایی، خلاصه ای از طراحی زیردریایی را پیشنهاد داده است [۲]. نانسی و همکاران اطلاعات هندسی بدنه ای زیردریایی DARPA Suboff و ملحقات بدنه را ارائه داده اند [۳]. درانستیتی ملی اقیانوس شناسی درگوا هند مراحل ساخت و تست عملیاتی یک AUV با نام MAYA پرداخته شده است [۴]. در مراجع مختلفی بررسی پوسته ای تحت فشار ربات های AUV و حد کمانش پوسته پرداخته شده است [۵ و ۶]. در پژوهشی دیگر به بهبود کارایی و دقت ساختار بدنه تحت فشار پرداخته اند [۷]. همچنین جرم افزوده و ضرایب دمپینگ را برای ربات های AUV توسط روش تئوری نواری ارائه داده اند [۸ و ۹]. مونسان و همکاران به بررسی تاثیر نسبت طول به قطر بدنه و تاثیر آن بر ضریب درگ پرداخته اند [۱۰]. در پژوهش هونگ با استفاده از نرم افزار WAMITTM ضرایب جرم افزوده و ضریب میرایی را برای یک نمونه ROV پرداخته شده است [۱۱]. در [۱۲] سعی در مدلسازی دینامیکی یک ROV و طراحی یک کنترلر برای تعقیب مسیر می باشد. کارلتون در کتاب خود به بررسی پروانه های و پارامترهای دارای اهمیت آن پرداخته است. هدف بررسی عملکرد پروانه در



شکل ۵ قراردادهای هندسی سطوح کنترلی

مواد مورد استفاده در ربات‌های زیر آب باید دارای خواصی باشند که در برابر فشارهای هیدرواستاتیکی و شرایط عملیاتی زیر سطح آب مورد استفاده و کارآمد باشند. یک عامل مهم در انتخاب مواد سازه‌ای، نسبت بین استحکام و چگالی مواد استفاده شده است. با استفاده از یک دیدگاه تحلیلی ساده مبتنی بر تئوری غشایی روش متناسبی برای محاسبه استحکام بدنه می‌باشد. در این تئوری با فرض جداره نازک بودن بدنه ربات ($h < R/10$) می‌توان تنش‌های وارده به بدنه را محاسبه نمود.

$$\sigma_l = \frac{pR}{2h} \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = \frac{pR}{h} \quad (6)$$

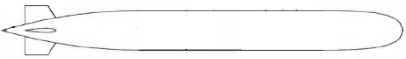
که در اینجا σ_l تنش طولی، σ_θ تنش محیطی (شعاعی)، p فشار هیدرواستاتیکی، h ضخامت پوسته و R شعاع انحنا پوسته می‌باشد. طبق این روش، رایج ترین نتیجه اتخاذ شده برای برآورد فشار کماتش بحرانی، فرمول ون مایرز می‌باشد.

$$q_{cr} = \frac{Eh}{R} \frac{1}{n^2 - 1 + \frac{\pi^2 R^2}{2l^2}} \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{n^2 l^2}{\pi^2 R^2}\right)^2} + \frac{h^2}{12R^2(1 - \nu^2)} \left(n^2 + \frac{\pi^2 R^2}{2l^2}\right)^2 \right] \quad (7)$$

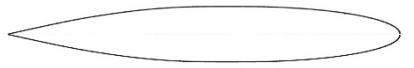
که در اینجا l طول ربات، n مود لوبار، E ضریب الاستیسیته، ν ضریب پواسون و q_{cr} فشار کماتش بحرانی پوسته‌ی مقاوم می‌باشد.

۴ - سیستم رانش

عملکرد کامل سیستم پیشران معمولاً از نظر کارایی سیستم مشخص می‌شود، یعنی نسبت توان مصرفی مفید به ورودی توان مورد نیاز. محصول منبع تغذیه، ولتاژ و جریان است که توسط باتری‌ها تهیه می‌شود. توان خروجی پیشران‌های تولید شده و سرعت حاصل عملکرد وسایل مکانیکی ربات زیرسطحی است. گام اول طراحی سیستم رانش و پروانه بعد از مشخص شدن فرم بدنه،

	DRDC	3
$\frac{R}{D} = 0.8685 \sqrt{\frac{x_F}{D}} - 0.3978 \frac{x_F}{D} + 0.006511 \left(\frac{x_F}{D}\right)^2 + 0.005086 \left(\frac{x_F}{D}\right)^3$		
$\frac{R}{D} = \frac{1}{3} \left(\frac{x_A}{D}\right) - \frac{1}{18} \left(\frac{x_A}{D}\right)^2$		

شکل ۳ نمای هندسی بدنه DRDC همراه با معادله بدنه [۲۱]

	Series 58	4
$R = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6$ Hull eq		

شکل ۴ نمای هندسی بدنه سری ۵۸ همراه با معادله بدنه [۲۱]

۳ - هندسه و استحکام

مانورپذیری و تغییر جهت مستلزم داشتن سطوح کنترلی می‌باشد. سطوح کنترلی با قرارگیری تحت جریان باعث ایجاد اختلاف فشار بین دو طرف شده جلاک شده و ممان لازم جهت مانورپذیری و غوص و صعود ربات می‌شود. ضریب منظری بالک، به عنوان یکی از پارامترهای مهم و تاثیر گذار به شکل معادله‌ی (۱) بیان می‌گردد.

$$a_e = \frac{b^2}{S} \quad (1)$$

که در اینجا b طول اسپن و S مساحت سطح بالک می‌باشد. یکی دیگر از پارامترهای هیدرودینامیکی بالک که تاثیر بسزایی در عملکرد بالک دارد، ضریب لیفت بالک نیز از رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌گردد.

$$C_L = \frac{L}{0.5 \rho A U^2} \quad (2)$$

که در اینجا ρ چگالی سیال، A مساحت سطح جانبی بالک می‌باشد. برای بدست آوردن زاویه محلی بالک از رابطه‌ی (۴) و (۳) می‌توان استفاده نمود.

$$\alpha = \delta + \frac{w - qx_{plane}}{U} + \alpha_{local} \quad (3)$$

$$\alpha = \delta + \frac{v - rx_{plane}}{U} + \alpha_{local} \quad (4)$$

که در اینجا δ زاویه بالک نسبت به بدنه، w و v سرعت‌های خطی ربات، q و r سرعت زاویه‌ای ربات، x_{plane} موقعیت نسبی بالک به مرکز جرم ربات و اصطلاح α_{local} تغییرات محلی جهت جریان را در نزدیکی سطوح کنترلی را ارائه می‌باشد.

$$K_t = \left(\frac{T}{\rho V_a^2 D^2} \right) J^2 \quad (14)$$

V_a سرعت در مقطع پروانه می باشد. براساس رابطه ی (۱۵) محل تلاقی نمودار K_t با نمودار ضریب هیدرودینامیکی پروانه های متناسب برای ربات می باشد. راندمان کلی سیستم رانش از رابطه ی (۱۵) قابل محاسبه است.

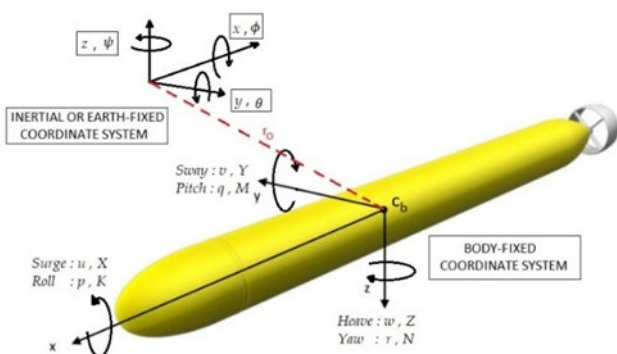
$$QPC = \eta_O \eta_R \eta_H \quad (15)$$

که در اینجا η_H راندمان بدنه، η_O راندمان آب آزاد پروانه، η_R راندمان چرخش نسبی (نسبت راندمان در پشت بدنه نسبت به آب آزاد) است که مقدار η_R برای زیرسطحی های بدنه مدرن حدود ۱۰۱ تا ۱۰۵ در نظر گرفته می شود.

۵- مدلسازی دینامیکی

در این بخش معادلات حاکم بر حرکت ربات AUV را تعریف می شود. این معادلات از عناصر زیر تشکیل شده است:

- سینماتیک: جنبه های هندسی حرکت
 - دینامیک بدنه صلب: ماتریس اینرسی ربات AUV
 - مکانیک: نیروها و ممان هایی که باعث حرکت می شوند
- برای مدلسازی دینامیکی همواره دو دستگاه مختصات تعریف می شود. اولی فیکس شده در قاب مرجع متصل به زمین و بی حرکت و دومی متصل به بدنه وسیله می باشد. شکل (۶) نمایی از وضعیت نسبی دستگاه مختصات های در نظر گرفته شده برای شبیه سازی را قابل مشاهده می باشد.



شکل ۶ دستگاه مختصات مرجع و متصل به بدنه

حرکت دستگاه مختصات متصل به بدنه نسبت به دستگاه مختصات قاب مرجع ثابت مرجع توصیف شده است. حرکت کلی وسیله در شش درجه آزادی را می توان با بردارهای (۱۷) و (۱۸) و (۱۹) و (۲۰) توصیف کرد.

$$\eta_1 = [x \ y \ z]^T; \quad (16)$$

$$\eta_2 = [\phi \ \theta \ \psi]^T \quad (17)$$

محاسبه درگ ربات زیر سطحی در زیر آب با سرعت مطلوب می باشد. به همین دلیل محاسبه دقیق این بخش کمک بسزایی در طراحی مناسب با راندمان بالایی برای پروانه و سیستم رانش خواهد کرد. مولفه های مقاومت یک زیرسطحی به طور کلی به صورت رابطه ی (۸) بیان می گردد.

$$C_T = C_F + C_r + C_A + C_k \quad (8)$$

که C_F ضریب مقاومت اصطکاکی، C_r ضریب مقاومت باقیمانده (ویسکوزیته فشاری)، C_A ضریب مجاز برای مدل کردن در مقیاس کامل و C_k ضریب مقاومت زبری سطح است. برای محاسبه ضرایب مقاومت روابط توسط سایر محققین ارائه شده است که در این پژوهش برای کاهش میزان خطا از ۱۰ مورد از روابط ارائه شده استفاده شده است. بنابراین برای ربات های سطحی که سرعت چشم گیری ندارند هرچه قطر بزرگ تر باشد، عملکرد پروانه بهتر خواهد شد. رابطه ی پیشنهادی برای قطر پروانه برای زیرسطحی های با بدنه مدرن طبق رابطه (۹) ارائه شده است.

$$D_p = 0.4 \sim 0.7 D_h \quad (9)$$

که در اینجا D_h قطر ماکزیمم ربات AUV، D_p قطر پروانه سیستم رانش است. در این پژوهش برای طراحی سیستم رانش از پروانه ی سری B استفاده شده است. برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی پروانه می توان از چندجمله ای پیشنهاد شده برای محاسبه ضرایب پروانه استفاده کرد.

$$K_t = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (10)$$

$$K_t = \sum_{n=1}^{39} C_n \times (J)^{s_n} \times \left(\frac{P}{D} \right)^{t_n} \times \left(\frac{A_E}{A_O} \right)^{u_n} \times (Z)^{v_n} \quad (11)$$

$$K_q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (12)$$

$$K_q = \sum_{n=1}^{47} C_n \times (J)^{s_n} \times \left(\frac{P}{D} \right)^{t_n} \times \left(\frac{A_E}{A_O} \right)^{u_n} \times (Z)^{v_n} \quad (13)$$

که در اینجا Z تعداد پره پروانه، $\frac{A_E}{A_O}$ نسبت سطح گسترش یافته به سطح دایره محاط شده به پروانه، $\frac{P}{D}$ نسبت گام به قطر، J ضریب پیشروی، T نیروی تراست، Q گشتاور پروانه، n دور پروانه و C_n, t_n, u_n, v_n, s_n ضرایب ثابت می باشند. در روش انتخاب پروانه در سری B پروانه ای که بیشترین راندمان را داشته باشد پروانه بهینه با شرایط مدنظر ما می باشد. پس از رسم نمودار های هیدرودینامیکی پروانه، نمودار درجه ۲ ضریب تراست به ضریب پیشروی می تواند بهترین پروانه ی مورد استفاده از سری B را برای ربات AUV مدنظر مشخص سازد.

در اینجا M ماتریس جرم و اینرسی است، $C(v)$ ماتریس شتاب کریلیوس و گریز از مرکز، $D(v)$ ماتریس دمپ هیدرودینامیکی، G ماتریس شتاب گرانش و بویانسی وسیله، τ بردار نیروی وگشتاورهای خارجی است و v بردار سرعت وسیله می‌باشد. باید این را در نظر گرفت که در معادله (۲۵)، نیروهای محیطی را در نظر گرفته نشده است. جرم افزوده در واقع اندازه گیری میزان جرم آب شتاب گرفته در هنگام حرکت شتاب دار وسیله است. نیروها و ممان‌های سیال ایده آل را می‌توان با معادلات (۲۸) و (۲۹) بیان کرد:

$$F_j = -\dot{u}_i m_{ji} - \varepsilon_{ikl} u_i \Omega_k m_{li} \quad (28)$$

$$M_j = -\dot{u}_i m_{j+3,i} - \varepsilon_{ikl} u_i \Omega_k m_{l+3,i} - \varepsilon_{ikl} u_k u_i m_{li} \quad (29)$$

Where $i = 1,2,3,4,5,6$

And $jkl = 1,2,3$

در جایی که تانسور ε_{ikl} متناوب است برابر 1+ است اگر شاخص چرخه برابر با (۳۱۲ و ۳۳۱ و ۱۲۳) باشد اما اگر این سیکل برابر با (۳۲۱ و ۲۱۳ و ۱۳۲) باشد این مقدار برابر با 1- خواهد بود اما در غیر این صورت مقدار این تانسور برابر با صفر خواهد بود. جرم افزوده ربات با استفاده از تئوری نواری در هر قسمت سطح مقطع استوانه ای، بیضوی بدنه و بالک‌ها قابل محاسبه است. در این تئوری بدنه وسیله برش‌های دو بعدی داده می‌شود و ضرایب جرم افزوده و دمپینگ برای هر قطعه به صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. ضرایب جرم افزوده برای اشکال ساده و دو بعدی ساده ترین شکل یک سیلندر دایره ای است ضرایب 2-D به عنوان a_{ij} تشریح شده است جرم افزوده به ازای هر واحد طول یک قطعه استوانه ای به شرح معادلات (۳۰) است.

$$m_{ii} = k_{trans} \frac{\pi \rho c^2 b^3}{4} \quad (30)$$

که در اینجا ρ چگالی سیال و $R(x)$ معادله شعاع بدنه وسیله در راستای طول است. جرم افزوده محوری بالک از رابطه (۳۱) بدست می‌آید.

$$m_a(x) = \pi \rho R(x)^2 \quad (31)$$

که در اینجا c طول کورد بالک یا سطوح کنترلی، b طول اسپن بالک، k_{trans} نیز ضریب سه بعدی سطوح کنترلی می‌باشد و تابعی از نسبت ضریب منظری بالک می‌باشد. برای محاسبه این ضریب از رابطه (۳۲) استفاده می‌شود.

$$k_{trans} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{a_e}}} \quad (32)$$

$$v_1 = [u \ v \ w]^T \quad (18)$$

$$v_2 = [p \ q \ r]^T \quad (19)$$

$$\tau_1 = [X \ Y \ Z]^T \quad (20)$$

$$\tau_2 = [K \ M \ N]^T \quad (21)$$

در اینجا η موقعیت و جهت وسیله نقلیه را با توجه به چارچوب مرجع ثابت توصیف می‌کند، v سرعت انتقالی و چرخشی وسیله را با توجه به دستگاه متصل به بدنه و τ کل نیروها و ممان‌های که بر وسیله زیرسطحی با توجه به دستگاه متصل به بدنه اعمال می‌شود را توصیف می‌کند.

برای تبدیل مختصات اولیه سرعت‌های انتقالی بین دستگاه مختصات متصل به وسیله با دستگاه مختصات ثابت در مرجع زمین از رابطه (۲۲) استفاده می‌شود.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J_1(\eta_2) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (22)$$

از طرفی

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \sin \phi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (23)$$

که در رابطه (۲۲) $J_1(\eta_2)$ متعادل است پس:

$$(J_1(\eta_2))^{-1} = (J_1(\eta_2))^T \quad (24)$$

تبدیل مختصات دوم سرعت‌های دورانی بین مختصات ثابت مرجع و دستگاه ثابت در بدنه وسیله با رابطه‌ی (۲۵) بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2(\eta_2) \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (25)$$

از طرفی که

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \quad (26)$$

باید این را در نظر گرفت که $J_2(\eta_2)$ برای زاویه پیچ $\theta = \pm 90$ تعریف نمی‌شود. این مسئله نمی‌تواند مشکلی در روند حل مسئله ایجاد کند چون حرکت وسیله نقلیه معمولاً به نزدیکی این زاویه در حین عملیات نمی‌رسد.

مدل دینامیکی ارائه شده در این بخش براساس مدل‌سازی دینامیکی ربات‌های زیرسطحی ارائه شده توسط فوسن [۱۷] و یو [۲۰] است. مدل دینامیکی از معادله حرکتی نیوتن-اولر را می‌توان بصورت معادله (۲۷) درآورد:

$$M_{RB} \dot{v} + C_{RB}(v)v + M_A \dot{v} + C_A(v)v + D(v)v + G = \tau \quad (27)$$

۶- محیط برنامه

عملیاتی کاربر است. این برنامه به گونه ای تهیه شده است که با وارد نمودن تعدادی از نیازهای عملیاتی مانند وزن، سرعت، عمق، زاویه بالک، قطر پروانه و ضریب ایمنی به راحتی بتوان اعمال نمود. نمایی از صفحه ی اصلی برنامه در شکل ۷ قابل مشاهده است.

در نهایت با تدوین محیطی مناسب برای محاسبات هیدرودینامیکی ربات های AUV می توان بستری مناسب جهت سهولت و افزایش سرعت در بخش طراحی این ربات ها را متصور شد. تمرکز اصلی این برنامه، بر طراحی مفهومی ربات های AUV با در نظر گرفتن شرایط

The screenshot displays a comprehensive software interface for AUV design. It is organized into several functional sections:

- Import data:** Fields for Weight, Speed, Propeller diameter, Rudder Ag, Wing Ag, Angle of Dive, Safty factor, Z, AE/AO, and Depth.
- Dimensional:** Fields for Length, Diameter, Volume, CP, Lmid, Lfore, Laft, Swet, Cws, K1, K2, Reynolds, and Fin Area.
- Plots:** Two empty coordinate systems for plotting data.
- Skin Thickness:** Options for Aluminum, Titanium, AISI, GFRP, and CFRP.
- Section profile:** Selections for NACA 0009, NACA 0015, and NACA 0012.
- Hydrostatic:** Fields for LCG, LCB, VCG, VCB, KG, KB, TCB, and TCG.
- Geometry:** Buttons for MYRING, DRDC, DARPA, and SERI 58.
- Physics condition:** Inputs for ACC Gravity, Density, Viscous, Physics Time, dx, and dt.
- Panel:** A grid of input fields for various coefficients like Xudot, Xrr, Xqq, Xuv, Xuu, Xuuv, Xvr, Xwq, Yvdot, Yrr, Ywp, Yuv, Yvdot, Yrr, Ywp, Yuv, Yvdot, Yrr, Ywp, Yuv.
- Sway coefficient:** Fields for Yvdot, Yrr, Ywp, Yuv.
- Heave coefficient:** Fields for Zwdot, Zww, Zqp, Zvp, Zrp, Zuv.
- Yaw coefficient:** Fields for Nrdot, Nvdot, Nrr, Nvv, Npq, Nur, Nuv, Nwp.
- Propulsion:** Fields for Resistance, Thrust, P/D, J, Kt, Kq, Etta, and n.
- Hull calculate:** Buttons for STRUCTURE, PROPELLER, and HYDROSTATIC.
- Maneuver:** Buttons for TURNING, DIVING, and HELIX.

شکل ۷ نمایی از برنامه تولید شده

ضرایب هیدرودینامیکی را با روش مرجع سنجید. نتایج خروجی الگوریتم با نتایج پژوهش پرسترو در جدول (۱) مورد مقایسه قرار گرفته است [۹].

در این بخش برای شروع به کار برنامه نیاز می باشد تا بخش Import data و Section profile (بخش مرتبط با ابعاد بالک اختیاری) را تکمیل نمود. سپس با کلیک بر بخش های geometry و Hull calculate و maneuver اطلاعات مختص به هر بخش محاسبه می گردد.

۷- اعتبار سنجی

از علامتگذاری (1950) SNAME برای نامگذاری مشتقات هیدرودینامیکی در اینجا استفاده شده است. به عنوان نمونه نیروی جرم افزوده هیدرودینامیکی Y_A در راستای محور Y ناشی از شتاب $\ddot{u}$ در جهت X به صورت معادله (۳۳) نوشته می شود.

$$Y_A = Y_{ii} \ddot{u} \quad \text{where} \quad Y_{ii} = \frac{\partial Y}{\partial \ddot{u}} \quad (33)$$

برای اعتبار سنجی از پژوهش انجام شده توسط پرسترو استفاده شده است [۹]. در این پژوهش ضرایب هیدرودینامیکی یک مدل بدنه ربات AUV به نام Remus100 از سری بدنه مایرینگ محاسبه شده است. برای صحت انجام کار الگوریتم مشخصات هندسی بدنه Remus100 به عنوان ورودی الگوریتم لحاظ شده است تا بتوان

parameter	value	EXP	error%
X_{uu}	-3.78	-3.9	3.07
$X_{\ddot{u}}$	-0.968	-0.93	4.086
Y_{vv}	-131	-130	0.76
Y_{rr}	0.598	0.632	5.4
$Y_{\dot{v}}$	-37.54	-35.5	5.75
$Y_{\dot{r}}$	2.78	1.93	14
$Z_{\dot{w}}$	-37.54	-35.5	5.75
K_{pp}	-0.022	-0.013	69
M_{ww}	2.5	3.18	21.4
$M_{\dot{w}}$	-1.9	-1.93	1.55
N_{vv}	-2.5	-3.18	21.4
$N_{\dot{r}}$	-4.4	-4.88	9.8
N_{rr}	-7.2	-9.4	23.4
$N_{\dot{v}}$	1.9	1.93	1.55
Z_{ww}	-131	-126.3	3.72
Z_{qq}	-0.598	-0.632	5.4
$Z_{\dot{q}}$	-2.2	-1.93	14
K_p	-0.0148	-0.0141	4.96
M_{qq}	-7.2	-9.4	23.4
$M_{\dot{q}}$	-4.4	-4.88	9.8

موجود مورد سنجش قرار بگیرند تا تفاوت عملکردهای هیدرودینامیکی آنها بهتر مشخص گردد که در ادامه می توان تصمیم گیری و در نتیجه طراحی تا حد ممکن بهینه ای را متصور بود. ورودی به الگوریتم در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳ ورودی برنامه		
	dimensional	Import data
Weight	Kg	150
Speed	m/s	1.25
Safety factor	-	4
Rudder angle	deg	10
Wing angle	deg	7
Angle of dive	deg	30
Propeller diameter to Hull diameter ratio	D_p/D_H	0.7
AE/AO	-	1
Number of propeller blade	-	7
Depth endurance	m	250
Section profile of surface control	-	NACA 0012

پس از محاسبات توسط الگوریتم نتایج برای فرم بدنه های نامبرده شده محاسبه می گردد. در جدول ۴ برخی از نتایج ارائه شده است. تمامی روند طراحی بدنه و بالک توجه برنامه ی تهیه شده صورت می پذیرد.

جدول ۲ مشتقات هیدرودینامیکی ربات AUV

parameter	definition
$X_{uu}, X_{\dot{u}}$	مشتقات نیرو در جهت X
$Y_{vv}, Y_{\dot{v}}, Y_{rr}, Y_{\dot{r}}$	مشتقات نیرو در جهت Y
$Z_{\dot{w}}, Z_{ww}, Z_{\dot{q}}, Z_{qq}$	مشتقات نیرو در جهت Z
$K_{pp}, K_{\dot{p}}$	مشتقات ممان در جهت K
$M_{ww}, M_{\dot{w}}, M_{\dot{q}}, M_{qq}$	مشتقات ممان در جهت M
$N_{vv}, N_{\dot{v}}, N_{rr}, N_{\dot{r}}$	مشتقات ممان در جهت N

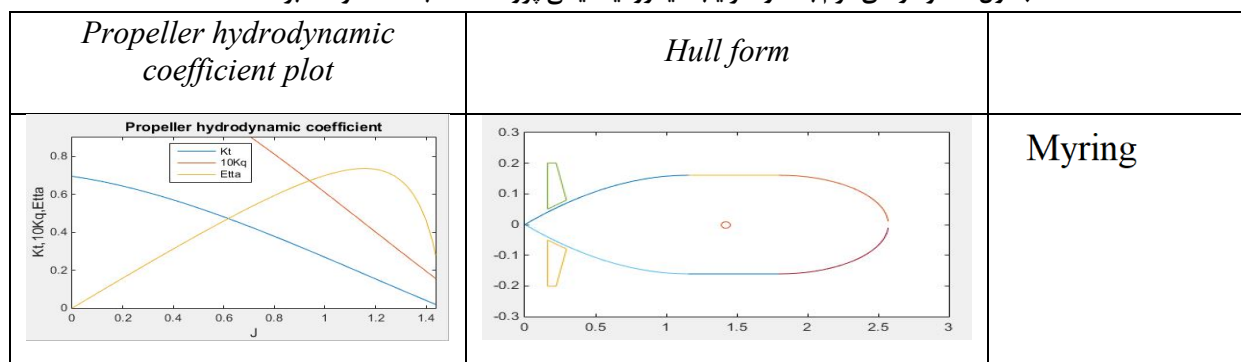
باتوجه به جدول ۱ تعداد زیادی از ضرایب دارای مقدار خطای قابل قبولی می باشند و می توان به مقادیر محاسبه شده اعتماد نمود. اما ضریب K_{pp} تنها ضربی ایست که درصد خطای بالایی را نسبت به بقیه ضرایب ثبت نموده است. دلیل این امر را می توان ضعف تئوری نواری (تئوری استفاده شده در این پژوهش) بیان نمود چرا که در تئوری نواری از ویسکوزیته ی سیال صرف نظر می شود و قادر به محاسبه ضریب دمپینگ رول بدنه نمی باشد. ضریب دمپینگ رول محاسبه شده در جدول (۱) مربوط به سطوح کنترلی ربات می باشد و از ضریب دمپینگ بدنه صرفه نظر می شود.

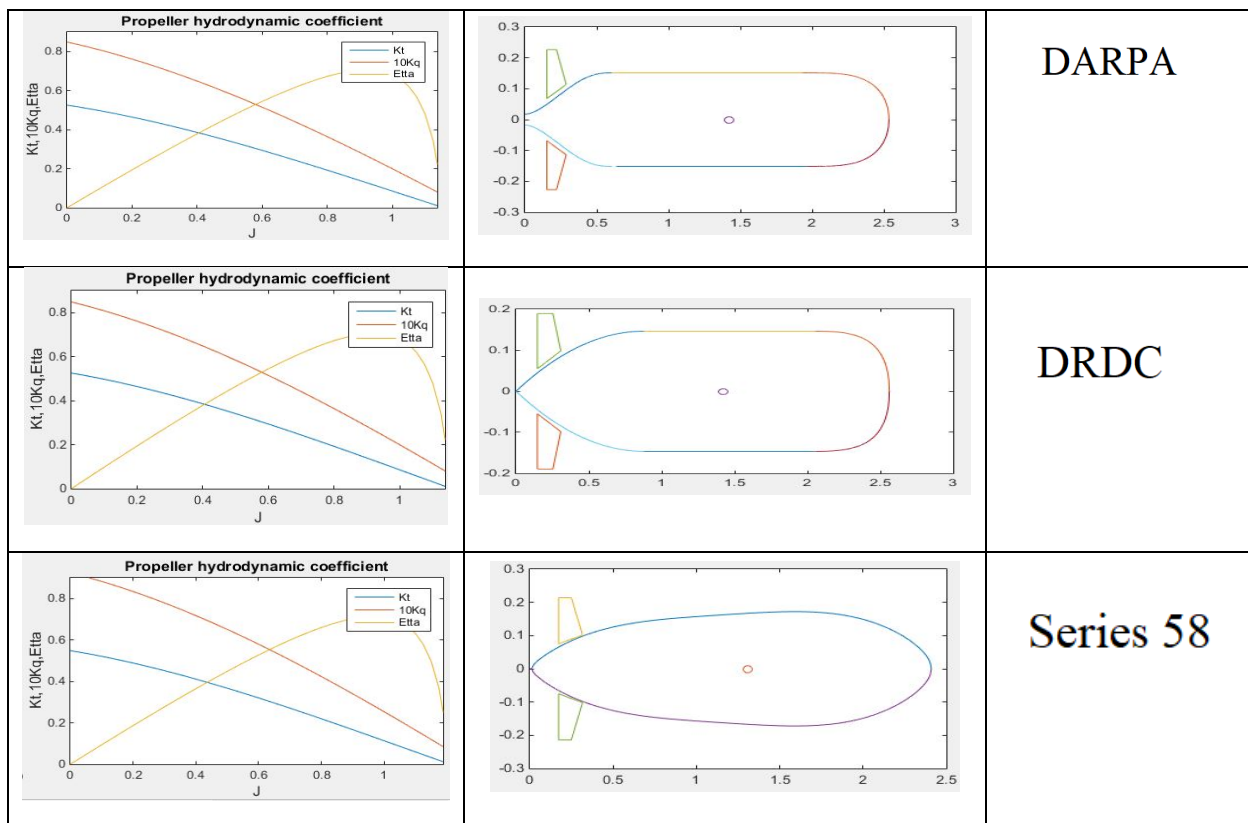
۸- تجزیه تحلیل نمونه ها

در نهایت پس از تهیه برنامه و اعتبارسنجی نتایج خروجی از الگوریتم می توان زمینه ای مطلوب برای طراحی مفهومی ربات ها را در نظر گرفت. همچنین مقایسه ای در زمینه عملکرد هیدرودینامیکی هندسه های موجود در بانک اطلاعاتی الگوریتم را بهتر نمایان ساخت و با توجه به نیاز عملیاتی مدنظر، هندسه و فرم بدنه ی کارآمدتر را انتخاب نمود. داشتن چنین اطلاعاتی دید مناسبی جهت طراحی مفهومی این ربات ها را برای طراح و مهندسین فراهم می کند.

برای این منظور در این پژوهش برای مقایسه هیدرودینامیکی فرم بدنه ها، ورودی به صورت رندوم اما یکسان برای سری های بدنه ی نامبرده شده انتخاب شده است تا براساس آن بتوان هندسه های

جدول ۴ نمودارهای فرم بدنه و ضرایب هیدرودینامیکی پروانه محاسبه شده توسط برنامه

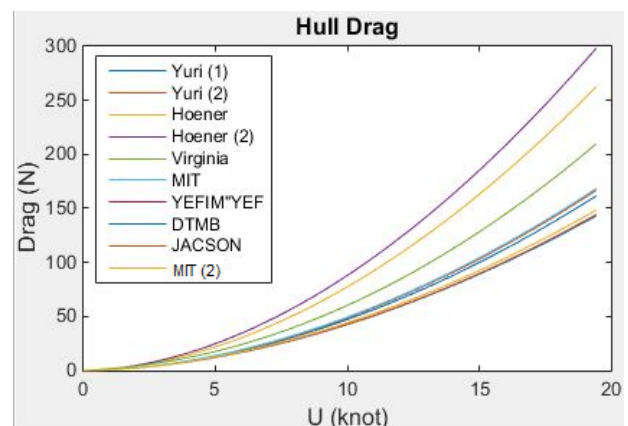




پس از محاسبات مرتبط به هندسه و نتایج مرتبط به مقاومت و ضریب هیدرودینامیکی می توان مانور وسیله را شبیه سازی نمود. در عملکرد ربات های AUV سه مانور دورزدن، تغییر عمق و حلزونی از مهمترین مانورهای عملیاتی به حساب می آیند.

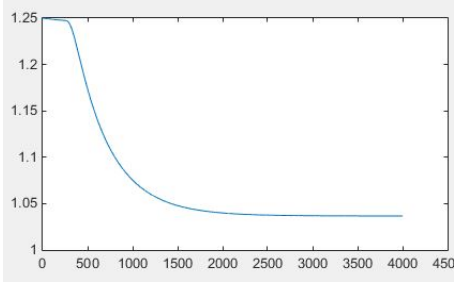
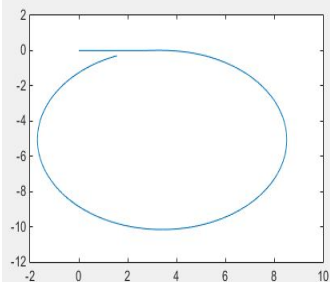
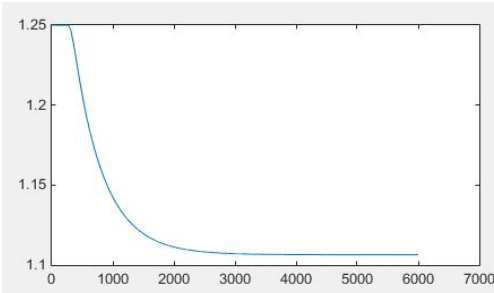
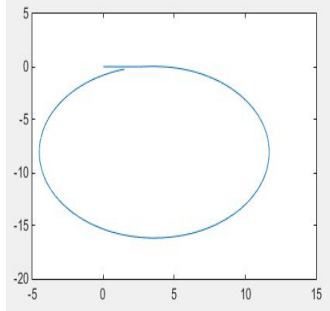
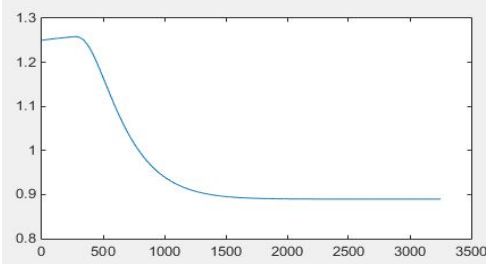
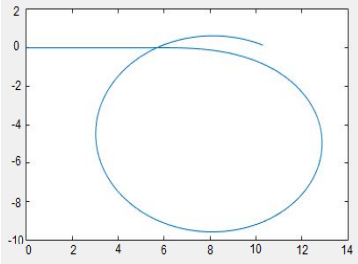
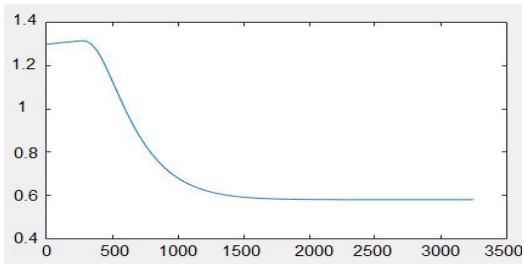
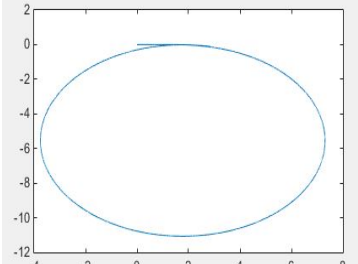
مانورپذیری یک ربات ارتباط مستقیمی با توان مصرفی حین عملیات دارد. مانورپذیری ضعیف و توانایی پایین ربات در حفظ مسیر و پایداری مسیر سبب استفاده ی مداوم از سطوح کنترلی و افزایش زمان عملیات می گردد به همین منظور رابطه ی مستقیمی بین مانورپذیری و مصرف انرژی و توان در حین عملیات ربات دارد. به همین منظور از اهمیت بالایی مخصوصا در این دسته از ربات ها برخوردار است. در جدول ۶ و ۵ نتایج تست دورزدن، در جدول ۷ نتایج تست تغییر عمق و مانور حلزونی ارائه شده است.

همانطور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، مقاومت بدنه به ۱۰ روش مختلف محاسبه شده است که مرجع هر کدام در شکل قابل مشاهده است. اختلاف تمامی روش ها در نوع محاسبه ضریب درگ شکل سه بعدی بدنه است. برای ارائه نتایج بهتر، از نتایج مقاومت بدنه در سرعت طراحی میانگین گیری شده است.



شکل ۷ نمودار مقاومت - سرعت بدنه ی Myrnig

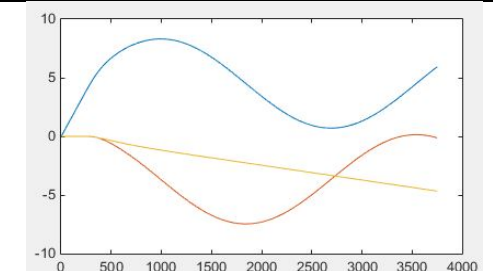
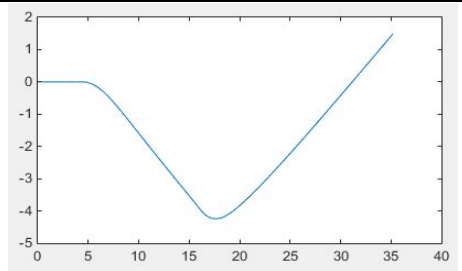
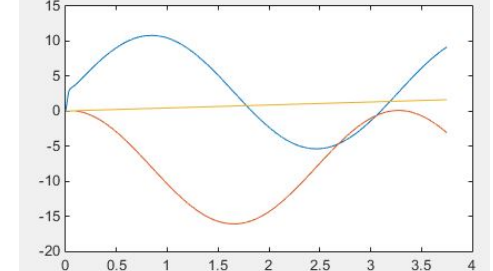
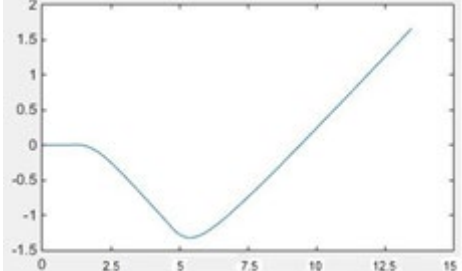
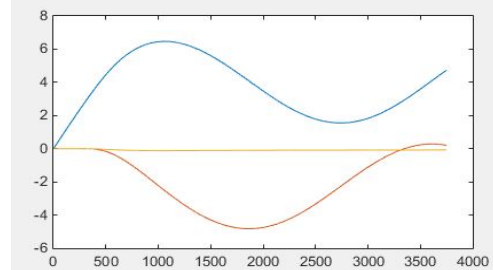
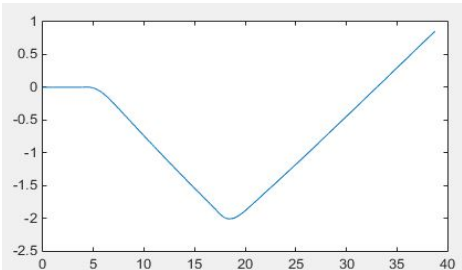
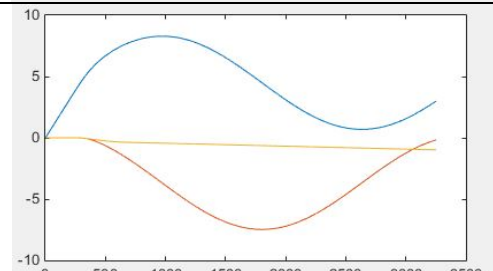
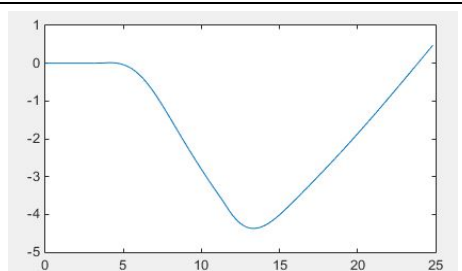
جدول ۵ نتایج تست دورزدن

<i>Advance speed (m/s)</i>	<i>Trajectory (X/L,Y/L)</i>	
		Myring
		DARPA
		DRDC
		Series 58

جدول ۶ پارامترهای مانور دورزدن با ابعاد بالک یکسان

سری بدنه	وزن (kg)	سرعت طراحی (m/s)	قطر بدنه (m)	طول بدنه (m)	قطر تاکتیکی (m/L)	طول پیشروی (m/L)	طول عرضی (m/L)
Myring	۱۵۰	۱.۲۵	۰.۳۲	۲.۵۷	۱۰.۱	۶.۲	۴.۹
DARPA	۱۵۰	۱.۲۵	۰.۳	۲.۵۹	۱۵.۸	۱۱.۰۵	۷.۵
DRDC	۱۵۰	۱.۲۵	۰.۲۹	۲.۵۶	۱۰.۲	۶.۲	۵.۸۵
Series 58	۱۵۰	۱.۲۵	۰.۳۴۴	۲.۴۱	۱۱.۲۵	۶.۳	۵.۷۵

جدول ۷ نتایج تست تغییر عمق و حلزونی

<i>Trajectory in spiral test (X,Y,Z)/L</i>	<i>Trajectory in dive test (X/L,Z/L)</i>	
		Myring
		DARPA
		DRDC
		Series 58

باشد پس با این تفاسیر مصرف انرژی کمتر باعث کاهش حجم و اندازه باتری و منبع تغذیه ربات می گردد. بنابراین محاسبات مرتبط به سیستم رانش امری حیاتی و مهم در زمینه طراحی ربات های زیرسطحی می باشد. در جدول ۸ نتایج مرتبط به توان و سیستم رانش با یکدیگر مقایسه شده است.

یکی از مسائل مهم در طراحی وسایل زیرسطحی و دریایی، رانش و توان مورد نیاز جهت حرکت و مانورپذیری با سرعت طراحی وسیله می باشد. سیستم رانش در نظر گرفته شده در این پژوهش سیستم شفت و پروانه می باشد که برای رسیدن به سرعت طراحی نیاز به انرژی و توان ذخیره در باتری های حمل شونده درون بدنه ربات می

جدول ۸ نتایج مرتبط به سیستم رانش با سرعت طراحی یکسان

سرری بدنه	D_p/D_H	QPC	توان تحویلی (Pd) (W)	توان مفید (Pe) (W)	دور پروانه (rps)	راندمان پروانه (η_o)
Myring	۰.۷	۰.۹۲۸	۱۴.۵	۱۳.۵	۳.۷۳	۰.۷۲۵
DARPA	۰.۷	۰.۹۳۹	۱۲.۵۲۸	۱۱.۷۸۳	۴.۳۱۲۴	۰.۷۱۸
DRDC	۰.۷	۰.۹۱۸	۱۴.۴	۱۳.۲۳	۴.۷۲	۰.۷
Series 58	۰.۷	۰.۹۲۸	۱۶.۴۱۷	۱۵.۲۴	۳.۸۸	۰.۷۳۱

پوسته و در حالت بحرانی سبب شکست پوسته‌ی مقاوم می‌گردد. جدول ۹ نتایج خروجی الگوریتم را برای ضخامت پوسته مقاوم ربات برای عمق ۲۵۰ متری زیرسطح آب با ضریب اطمینان ۴ نشان می‌دهد.

مباحث مهم دیگری که در طراحی ربات‌های AUV می‌توان در نظر گرفت محاسبه ضخامت پوسته مقاوم بدنه است. بدنه این ربات‌ها تحت فشار هیدرواستاتیکی آب می‌باشد و محاسبات در این زمینه از اهمیت بالایی برخوردار است. عدم استحکام بدنه باعث اعوجاج در

جدول ۹ ضخامت پوسته مقاوم در عمق ۲۵۰ متری (ابعاد تمامی مقادیر به میلی متر می باشد)

سری بدنه	قطر بدنه (m)	طول بدنه (m)	آلومینیوم	تیتانیوم	AISI	GFRP	CFRP
Myring	۰.۳۲	۲.۵۷	۷.۱	۱.۸۵	۶.۵۳	۱۳.۶	۲.۸۱۵
DARPA	۰.۳	۲.۵۹	۶.۸۲	۱.۷۸	۶.۲۷	۱۳.۰۷	۲.۷
DRDC	۰.۲۹	۲.۵۶	۶.۵	۱.۶۹	۵.۹۷	۱۲.۴۴	۲.۵۷
Series 58	۰.۳۴۴	۲.۴۱	۱.۲۳	۳.۲۱	۱.۱۳	۱۲.۳۵	۴.۸۷

طراحی شده می‌توان بررسی دقیق‌تر و کارآمدتری در زمینه بررسی خصوصیات هندسه‌های رایج برای ساخت ربات زیرسطحی AUV انجام نمود. در جدول ۱۰ برخی از دیدگاه‌های مهم در طراحی ربات‌های زیرسطحی AUV بیان گردیده است که با توجه به تجزیه و تحلیل صورت گرفته در الگوریتم طراحی شده در این پژوهش با یکدیگر مقایسه گردیده است.

در جدول ۹ میزان کمترین ضخامت پیشنهادی الگوریتم برای پوسته‌ی مقاوم را در شرایط طراحی مدنظر برای ۵ مواد مختلف پرکاربرد در ساخت پوسته ارائه شده است. براین اساس با در نظر گرفتن مزایا و معایب هریک از سری هندسه‌های نامبرده شده می‌توان براساس نیاز عملیاتی کاربر برای طراحی ربات‌های AUV هندسه‌ای کارآمدتر با قابلیت‌های بهتر طراحی نمود. با بررسی دقیق نتایج حاصل از خروجی‌های الگوریتم

جدول ۱۰ اولویت بندی طراحی هندسه بدنه با توجه به نیازهای عملیاتی

ردیف	دیدگاه‌های عملیاتی	Myring	DARPA	DRDC	Series 58	معیار سنجش
۱	عملیات در عمق‌های بالا	۳	۲	۱	۴	استحکام پوسته و میزان ضخامت پوسته
۲	ماموریت‌های طولانی	۳	۲	۴	۱	راندمان سیستم رانش
۳	مانورپذیری و تثبیت موقعیت	۱	۳	۲	۴	پارامترهای مانور
۴	حمل بار	۴	۱	۲	۳	وزن منبع تغذیه و بدنه مقاوم
۵	نویز و هیدروآکوستیک	۲	۳	۴	۱	دورپروانه و راندمان بدنه
۶	جانمایی	۳	۲	۱	۴	شکل همگن بدنه
۷	هزینه	۲	۱	۳	۴	میزان توان، استحکام پوسته، مانورپذیری، مصرف انرژی و سهولت ساخت

گرفته است. با استفاده از این مطالعه می‌توان فرم هندسی کارآمدتر و راه حل کم هزینه‌تری برای بدنه‌ی اصلی ربات را تشخیص داد. چرا که اساس این مطالعه دیدگاهی عملیاتی و کاربردی، باتوجه به خواسته‌ها و الویت‌های عملیاتی کاربر دارد. پس شناخت هندسه‌ای که عملیات را مطلوب‌تر عملی سازی کند، از دیدگاه‌های اصلی این پژوهش است. این مطالعه دو ویژگی دیگر را شامل می‌شود. اولی طراحی مفهومی ربات‌های AUV می‌باشد که کمک شایانی در صرفه جویی زمان با توجه به مجهول بودن بسیاری از پارامترهای هیدرودینامیکی می‌کند که این امر می‌تواند امتیاز مثبت و

همانطور که در جدول ۱۰ قابل مشاهده است، باتوجه به خروجی‌های الگوریتم معیارهایی برای مقایسه‌ی هندسه‌ها در نظر گرفته شده است که بتوان براساس نیاز عملیاتی، قابلیت‌های هندسه‌ها را شناخت و مقایسه‌ای کاربردی را اعمال نمود. به همین منظور انتخاب هندسه‌ی کارآمدتر برای طراح ربات ملموس‌تر خواهد بود.

۹ - جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش با بهره‌گیری از معادلات تحلیلی هندسه‌های رایج و پرکاربرد در طراحی ربات‌های AUV، مورد تجزیه و تحلیل قرار

segment underwater pressure hull. Ocean Engineering, 35(2), pp.247-260.

[8] de Freitas, A.S.N. and de Barros, E.A., MECHANICAL DESIGN OF AN EXTERNAL PRESSURE VESSEL OF AN AUV.

[9] Prestero, T.T.J., 2001. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle (Doctoral dissertation, Massachusetts institute of technology).

[10] Idrees, Q., Liangtian, G., Bo, L. and Yiran, M., 2018. Study on Optimization Design of Pressure Hull for Underwater Vehicle. International Journal of Transport and Vehicle Engineering, 12(3), pp.268-273.

[11] Eng, Y.H., Chin, C.S. and Lau, M.W.S., 2014. Added mass computation for control of an open-frame remotely operated vehicle: Application using WAMIT and MATLAB. Journal of Marine Science and Technology, 22(4), pp.405-416.

[12] Moonesun, M., Mahdian, A., Korol, Y.M., Dadkhah, M., Javadi, M.M. and Brazhko, A., 2016. Optimum L/D for submarine shape.

[13] Zhang, Y., Stansby, P. and Li, G., 2020. Non-causal linear optimal control with adaptive sliding mode observer for multi-body wave energy converters. IEEE Transactions on Sustainable Energy.

[14] Vervoort, J.H.A.M., 2009. Modeling and control of an unmanned underwater vehicle. Master Traineesh. Rep, pp.5-15.

[15] Carlton, J., 2018. Marine propellers and propulsion. Butterworth-Heinemann.

[16] Allotta, B., Pugi, L., Bartolini, F., Ridolfi, A., Costanzi, R., Monni, N. and Gelli, J., 2015. Preliminary design and fast prototyping of an autonomous underwater vehicle propulsion system. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 229(3), pp.248-272.

[17] Fossen, T.I., 2011. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons.

[18] EDWARD M. LEWANDOWSKI, The Dynamics Of Marine Craft, Manoeuvring and Seakeeping, World Scientific, Vol 22, 2004, pp. 35-54.

[19] Hasanvand, A. and Hajivand, A., 2019. Investigating the effect of rudder profile on 6DOF ship turning performance. Applied Ocean Research, 92, p.101918.

[20] J. Yuh. Modeling and control of underwater robot vehicles. In IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, volume 20, pages 1475–1483, 1990.

[21] Renilson, M., 2015. Submarine hydrodynamics (pp. 45-89). New York: Springer.

ارزشمندی باشد. مزیت دوم این برنامه بررسی فرم بدنه های رایج جهت طراحی AUV می باشد. این برنامه کاربردهای مفیدی در جهت تجزیه و تحلیل پارامترهای مجهول برای طراح را می تواند آشکار و نمایان سازد. بدنه های Myring و DRDC بهترین عملکرد و به ترتیب بعد از این دو series 58 و DARPA در بخش مانورپذیری داشته اند. در بخش سیستم رانش، بدنه Myring و series 58 - بیشترین راندمان آب آزاد برای پروانه را دارا می باشند. در صورتی که اگر راندمان کلی سیستم رانش را بسنجیم بدنه های DARPA بیشترین راندمان را به خود اختصاص می دهد. در بخش استحکام سازه ای نیز بدلیل فرم های متنوعی که در شکل بدنه ها استفاده می - شود اما می توان نتیجه گرفت برای بدنه DARPA و DRDC کمترین ضخامت پوسته را در شرایط عملیاتی یکسان، نسبت به بقیه هندسه ها را دارا می باشد که این امر می تواند دست طراح را برای افزایش وزن تجهیزات قابل حمل توسط ربات بازتر کند. خروجی - های این کار را می توان در چند مورد زیر نیز خلاصه نمود:

- شناخت هندسه ی مطلوب تر با دیدگاه عملیاتی کاربر
- طراحی فرم بدنه و سطوح کنترلی در بازه ی بهینه
- کاهش زمان طراحی مفهومی برای طراح
- تجزیه و تحلیل پارامترهای هیدرودینامیکی بدنه ی ربات AUV
- تحلیل مانورپذیری ربات به صورت ۶ درجه آزادی

۱۰- مراجع

- [1] Curtis, T., 2001. The design, construction, outfitting, and preliminary testing of the C-SCOUT autonomous underwater vehicle (AUV) (Doctoral dissertation, Memorial University of Newfoundland).
- [2] Myring, D.F., 1981. A theoretical study of the effects of body shape and Mach number on the drag of bodies of revolution in subcritical axisymmetric flow (No. RAE-TR-81005). ROYAL AIRCRAFT ESTABLISHMENT FARNBOROUGH (UNITED KINGDOM).
- [3] Mackay, M. and Defence, R., 2003. The standard submarine model: a survey of static hydrodynamic experiments and semiempirical predictions. Defence R&D Canada-Atlantic.
- [4] Jackson, H.A., 1992. Fundamentals of submarine concept design.
- [5] Groves, N.C., Huang, T.T. and Chang, M.S., 1989. Geometric characteristics of DARPA suboff models : (DTRC Model Nos. 5470 and 5471). David Taylor Research Center.
- [6] Desa, E., Madhan, R., Maurya, P., Navelkar, G., Mascarenhas, A.A.M.Q., Prabhudesai, S., Afzulpurkar, S. and Bhandodkar, S.N., 2007. The small Maya AUV-Initial field results.
- [7] Błachut, J. and Smith, P., 2008. Buckling of multi-