بررسی هندسه بدنه و سطوح کنترلی برروی عملکرد هیدرودینامیکی ربات های AUV

محمد سعید سیف[۱]، علی حسنوند[۲*]

[۱] استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، Seif@sharif.edu
[۲] دکتری مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی شریف، Ali.hsnvd@gmail.com

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

چکیده

ربات‌های زیرسطحی مجموعه‌ای از وسایل دریایی هستند که برای مقاصدی از قبیل اکتشاف، حفاری، کابل گذاری زیردریا، نگهداری و تعمیرات سازه‌های دریایی و کاربردهای تحقیقاتی بکار می‌روند. در این پژوهش، سعی بر ارائه بستر مناسب جهت طراحی مفهومی کاربردی ربات‌های AUV با در نظر گرفتن هندسه‌های رایج برای طراحی بدنه می‌باشد. با استفاده از نرم افزار MATLAB برنامه ای تهیه شده است که با در نظر گرفتن اطلاعات اولیه‌ی کاربر، طراحی مفهومی کاربردی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. در این برنامه سری‌های بدنه پرکاربرد DARPA Suboff، Series 58، Myring و DRDC گنجانده شده است تا کاربر برای طراحی بتواند از بدنه‌های رایج بهره ببرد. خروجی‌های این برنامه، محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی غیرخطی و شبیه سازی مانورهای عملیاتی، طراحی سیستم رانش، بررسی استحکام سازه‌ای و محاسبات هندسی بدنه ربات زیرسطحی AUV هستند که براساس الگوریتم های طراحی شده سعی گردیده در محدوده‌ی مناسب و بهینه قرار داشته باشند. اساس این مطالعه دیدگاهی عملیاتی و کاربردی، باتوجه به خواسته‌ها و الویت‌های عملیاتی طراحان می‌باشد و با نتایجی که ارائه شده است، می‌توان برای شرایط مختلف هندسه‌ی مطلوب‌تری برای طراحی فرم هندسی بدنه انتخاب نمود.

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

Mohammad Saeed Seif[1], Ali Hasanvand[2*]

[1]Mechanical Engineering Department, Sharif University of technology, seif@sharif.edu
[2]ph.D of naval architecture, Sharif University of technology, Ali.hsnvd@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received 23 September 2020
Accepted 11 March 2021
Available online ….

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 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.5.5]

۱ - مقدمه

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 زیرسطحی، 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. ربات‌های AUV از سری وسایل زیرسطحی هستند که به منظور عملیات تحقیقاتی و بهره برداری توجهات بخش‌های تحقیقاتی و صنعتی در سراسر دنیا را به خود جلب کرده است. طراحی ربات‌های AUV شامل مراحل مختلف و پیچیده‌ای می باشد که همواره چالش‌هایی برای طراح ایجاد می‌نماید. روند طراحی ربات‌ها مانند کشتی‌های تجاری دارای نمودار حلزونی می‌باشد که زمان زیادی را در برمی‌گیرد. بعنوان بررسی کارهای انجام شده، کورتیس و همکاران در پژوهش خود پروسه طراحی، ساخت و تست‌های اولیه یک ربات زیر سطحی C-SCOUT با قابلیت انجام چند ماموریته را شرح داده‌اند[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 وممان های وارده به بدنه‌ی DRDC به صورت آزمایشگاهی و در تونل باد پرداخته است[۳]. جکسون در کتابچه خود براساس سابقه‌ی بیست ساله تحقیقات دانشگاه MIT در زمینه‌ی طراحی زیردریایی، خلاصه‌ای از طراحی زیردریایی را پیشنهاد داده است[۲]. نانسی و همکاران اطلاعات هندسی بدنه‌ی زیردریایی DARPA Suboff و ملحقات بدنه را ارائه داده‌اند[۳]. درانستیتوی ملی اقیانوس شناسی درگوا هند مراحل ساخت و تست عملیاتی یک AUV با نام MAYA پرداخته شده است[۴]. همچنین، در مراجع مختلفی بررسی پوسته‌ی تحت فشار ربات‌های AUV و حد کمانش پوسته پرداخته شده است[۵-۷]. همچنین فعالیت هایی در زمینه محاسبات مشتقات دینامیکی صورت گرفته است. جرم افزوده و ضرایب دمپینگ برای ربات‌های AUV از طریق تئوری نواری توسط محققین پیشین صورت گرفته است [۸و۹]. مونسان و همکاران به بررسی تاثیر نسبت طول به قطر بدنه و تاثیر آن بر ضریب درگ پرداخته اند[۱۰]. در پژوهش هونگ نرم افزار WAMITTM برای محاسبه ضرایب جرم افزوده و ضریب میرایی برای یک نمونه ROV توسعه شده است[۱۱]. در پژوهش [۱۲] سعی در مدلسازی دینامیکی یک ROV و طراحی یک کنترلر برای تعقیب مسیر بوده است. کارلتون درکتاب خود به بررسی پروانه‌ها و پارامترهای دارای اهمیت آن پرداخته است. هدف بررسی عملکرد پروانه در شرایط فیزیکی مختلف و تاثیرات محیط و جنس طراحی پروانه های مدرن از دیگر مباحثی می‌باشد که در این کتاب مورد بررسی قرار گرفته‌است[۱۳]. در[۱۴] تمرکز اصلی بر سیستم رانش زیرسطحی بوده است. ادوارد و فوسن روش‌هایی برای مدلسازی دینامیکی و محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی وسیله‌های دریایی ارائه داده‌اند[۱۵و۱۶]. حسنوند و همکاران به بررسی تاثیر پروفیل سکان بر عملکرد مانور کشتی به صورت مدلسازی مستقیم پرداخته‌اند[۱۷].

۲ - هندسه و استحکام

برای طراحی فرم بدنه ربات‌های AUV از سری‌های رایج و بهینه برای طراحی استفاده می‌شود. نمای دو بعدی فرم بدنه و معادله هرکدام در شکل ۱ تا ۴ ارائه شده است. این سری‌ها هرکدام دارای مزایا و معایب مختص خود می‌باشند که می‌تواند تاثیر بسزایی در عملکرد ربات در حین عملیات داشته باشد.

Myring

Nose Eq

$$R = \frac{D}{2}\left[1 - \left(\frac{x_f}{L_F}\right)^2\right]^{\frac{1}{n_f}}$$

L_F: Length of nose D: Hull diameter

$n_f = 2$ for elliptical form

Tail Eq

$$R = \frac{D}{2} - \left[\frac{3D}{2L_A^2} - \frac{\tan\alpha_t}{L_A}\right]x_a^2 + \left[\frac{D}{L_A^3} - \frac{\tan\alpha_t}{L_A^2}\right]x_a^3$$

L_A: Length of tail α_t: half tail cone angle

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

DARPA Suboff

$L/D=8.58$

Nose Eq

$$R = \frac{D}{2}\Big[1.126395101x_f(0.3x_f - 1)^4 + 0.442874707x_f^2\,(0.3x_f - 1)^4\,(1.2x_f + 1)\Big]^{1/2.1}$$

$L_F = 2D$ $D=0.508$

Tail Eq

$$R = \frac{D}{2}\Big[r_h^2 + r_h K_0 \xi^2 + \left(20 - 20r_h^2 - 4r_h K_0 - \frac{1}{3}K_1\right)\xi^3 + (-45 + 45r_h^2 + 6r_h K_0 + K_1)\xi^4 + (36 - 36r_h^2 - 4r_h K_0 - K_1)\xi^5 + \left(-10 + 10r_h^2 + r_h K_0 + \frac{1}{3}K_1\right)\xi^6\Big]^{1/2}$$

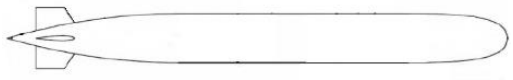
$r_h=0.1175$, $K_0=10$, $K_1=44.6244$, $\xi = \frac{13.979167 - x_a}{3.3333}$

$L_A = 2.19D$

شکل۲ نمای هندسی بدنه سابوف همراه با معادله بدنه [۲۱]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.5.5]



DRDC

L/D = 8.75

$\frac{R}{D} = 0.8685\sqrt{\frac{x_F}{D}} - 0.3978\frac{x_F}{D} + 0.006511\left(\frac{x_F}{D}\right)^2 + 0.005086\left(\frac{x_F}{D}\right)^3$ Nose Eq

The length of the fore body is 1.75D

$\frac{R}{D} = \frac{1}{3}\left(\frac{x_A}{D}\right) - \frac{1}{18}\left(\frac{x_A}{D}\right)^2$ Tail Eq

The aft body has a length of 3D

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

Series 58

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

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

۱-۲- بالک و سطوح کنترلی

مانورپذیری و تغییر جهت ربات های زیرسطحی مستلزم داشتن سطوح کنترلی است. سطوح کنترلی با قرارگیری تحت جریان باعث ایجاد اختلاف فشار بین دو طرف بالک شده و ممان لازم جهت مانورپذیری، غوص و صعود تامین می‌شود. ضریب منظری بالک، به عنوان اصلی ترین پارامتر در تعیین ضریب لیفت بالک به شکل معادله‌ی (۱) بیان می‌گردد.

$$a_e = \frac{b^2}{S} \qquad (۱)$$

که در اینجا b طول اسپن و S مساحت سطح بالک می‌باشد. ضریب لیفت بالک نیز به شکل رابطه‌ی (۲) تشریح میگردد.

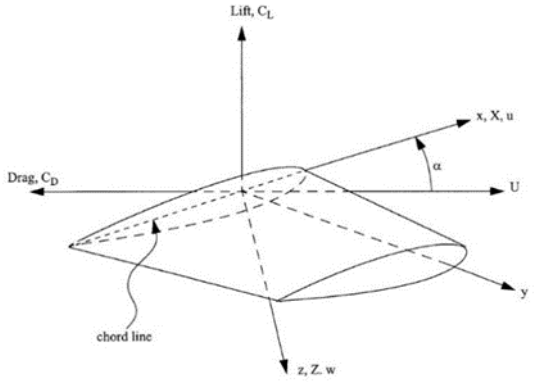
$$C_L = \frac{L}{0.5\rho SU^2} \qquad (۲)$$

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

$$\alpha = \delta + \frac{w - qx_{plane}}{U} + \alpha_{local} \qquad (۳)$$

$$\alpha = \delta + \frac{v - rx_{plane}}{U} + \alpha_{local} \qquad (۴)$$

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



شکل ۵ قراردادهای هندسی سطوح کنترلی

۲-۲- استحکام سازه

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

$$\sigma_l = \frac{pR}{2h} \qquad (۵)$$

$$\sigma_\theta = \frac{pR}{h} \qquad (۶)$$

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

$$q_{cr} = \frac{Eh}{R}\frac{1}{n^2 - 1 + \frac{\pi^2R^2}{2l^2}}\left[\frac{1}{\left(1 + \frac{n^2l^2}{\pi^2R^2}\right)^2} + \frac{h^2}{12R^2(1-\nu^2)}\left(n^2 + \frac{\pi^2R^2}{2l^2}\right)^2\right] \qquad (۷)$$

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

۳ – سیستم رانش

عملکرد کلی سیستم پیشرانه معمولاً از نظر کارآیی سیستم مشخص می‌شود، یعنی نسبت توان مصرفی مفید به توان ورودی مورد نیاز. محصول منبع تغذیه، ولتاژ و جریان است که توسط باتری‌ها تهیه می‌شود. توان خروجی پیشرانه‌ی تولید شده و سرعت حاصل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.5.5]

عملکرد وسایل مکانیکی ربات زیرسطحی است. گام اول طراحی سیستم رانش و پروانه بعد از مشخص شدن فرم بدنه، محاسبه درگ ربات زیر سطحی در زیرآب با سرعت مطلوب می‌باشد. به همین دلیل محاسبه دقیق این بخش کمک بسزایی در طراحی مناسب پروانه و سیستم رانش خواهد کرد. مولفه‌های مقاومت یک زیرسطحی به طور کلی به صورت رابطه‌ی (۸) بیان می‌گردد.

$$C_T = C_F + C_r + C_A + C_k \qquad (۸)$$

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 مناسبی توسط سایر محققین ارائه شده است که در این پژوهش برای کاهش میزان خطا از ۱۰ روش برای این موضوع استفاده شده است. برای ربات های زیرسطحی که سرعت چشم گیری ندارند هرچه قطر بزرگ‌تر باشد، عملکرد پروانه بهتر خواهد شد. رابطه (۹) قطر پروانه زیرسطحی‌های با بدنه مدرن را ارائه میکند.

$$D_p = 0.4 \sim 0.7\, D_h \qquad (۹)$$

که در اینجا D_h قطر ماکزیمم ربات AUV، D_p قطر پروانه سیستم رانش است. در این پژوهش برای طراحی سیستم رانش از پروانه‌ی سری B استفاده شده است. برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی پروانه می‌توان از چندجمله‌ای پیشنهاد شده برای محاسبه ضرایب پروانه استفاده کرد.

$$K_t = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \qquad (۱۰)$$

$$K_t = \sum_{n=1}^{39} C_n \times (J)^{s_n} \times \left(\frac{P}{D}\right)^{t_n} \times \left(\frac{A_E}{A_O}\right)^{u_n} \times (Z)^{v_n} \qquad (۱۱)$$

$$K_q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \qquad (۱۲)$$

$$K_q = \sum_{n=1}^{47} C_n \times (J)^{s_n} \times \left(\frac{P}{D}\right)^{t_n} \times \left(\frac{A_E}{A_O}\right)^{u_n} \times (Z)^{v_n} \qquad (۱۳)$$

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، v_n، u_n، t_n و s_n ضرایب ثابت می‌باشند. در روش انتخاب پروانه در سری B پروانه ای که بیشترین راندمان را داشته باشد پروانه بهینه با شرایط مدنظر می‌باشد. در الگوریتم پس از رسم نمودارهای هیدرودینامیکی پروانه، نمودار درجه ۲ ضریب تراست به ضریب پیشروی $(K_t = \alpha J^2)$ می‌تواند بهترین پروانه‌ی مورداستفاده از سری B را برای ربات AUV مدنظر مشخص سازد.

$$K_t = \left(\frac{T}{\rho V_a^2 D^2}\right) J^2 \qquad (۱۴)$$

V_a سرعت سیال در مقطع پروانه می‌باشد. براساس رابطه‌ی (۱۴) از طریق محل تلاقی نمودار K_t با نمودار ضرایب هیدرودینامیکی، پروانه مناسب برای ربات انتخاب می‌شود. راندمان کلی سیستم رانش از رابطه‌ی (۱۵) قابل محاسبه است.

$$QPC = \eta_O \eta_R \eta_H \qquad (۱۵)$$

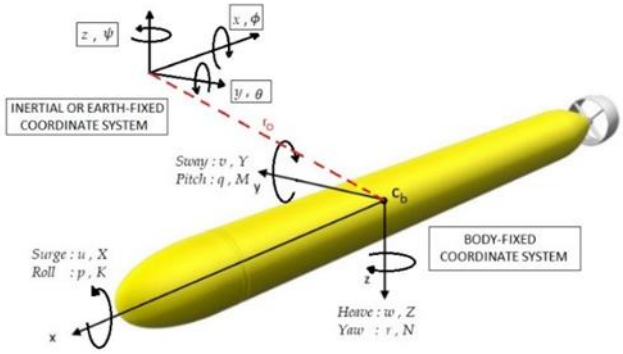
که در اینجا η_H راندمان بدنه، η_O راندمان آب آزاد پروانه، η_R راندمان چرخش نسبی (نسبت راندمان در پشت بدنه به آب آزاد) است که مقدار η_R برای زیرسطحی‌های بدنه مدرن حدود ۱/۰۱ تا ۱/۰۵ در نظر گرفته می‌شود.

۴- مدلسازی دینامیکی

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

- سینماتیک: جنبه‌های 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 می‌شود. اولی فیکس شده در قاب مرجع متصل به زمین و بی حرکت و دومی متصل به بدنه وسیله می‌باشد. شکل (۶) وضعیت نسبی دستگاه مختصات‌های در نظر گرفته شده برای شبیه سازی را نشان می دهد.



شکل ۶ دستگاه مختصات مرجع و متصل به بدنه

حرکت دستگاه مختصات متصل به بدنه نسبت به دستگاه مختصات قاب مرجع توصیف شده است. حرکت کلی وسیله در شش درجه آزادی را می‌توان با بردارهای (۱۷-۲۱) توصیف کرد.

$$\eta_1 = [\ x \quad y \quad z\ ]^T; \qquad (۱۶)$$

$$\eta_2 = [\ \phi \quad \theta \quad \psi\ ]^T \qquad (۱۷)$$

$$v_1 = [\ u \quad v \quad w\ ]^T \qquad (۱۸)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.5.5]

$$v_2 = [\ p \quad q \quad r\ ]^T \tag{۱۹}$$

$$\tau_1 = [\ X \quad Y \quad Z\ ]^T \tag{۲۰}$$

$$\tau_2 = [\ K \quad M \quad N\ ]^T \tag{۲۱}$$

در اینجا η موقعیت و جهت وسیله را با توجه به چارچوب مرجع ثابت توصیف می‌کند، v سرعت انتقالی و چرخشی را با توجه به دستگاه متصل به بدنه و τ کل نیروها و ممان‌ها با توجه به دستگاه متصل به بدنه را توصیف می‌کند.

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

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{z}\end{bmatrix} = J_1(\eta_2)\begin{bmatrix}u\\ v\\ w\end{bmatrix} \tag{۲۲}$$

از طرفی

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix}\cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\phi+\cos\psi\sin\theta\sin\phi & \sin\psi\sin\phi+\cos\psi\sin\theta\cos\phi\\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\phi+\sin\psi\sin\theta\sin\phi & -\cos\psi\sin\phi+\sin\psi\sin\theta\cos\phi\\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi\end{bmatrix} \tag{۲۳}$$

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

$$\big(J_1(\eta_2)\big)^{-1} = \big(J_1(\eta_2)\big)^T \tag{۲۴}$$

تبدیل مختصات سرعت‌های دورانی بین مختصات ثابت مرجع و مختصات بدنه وسیله با رابطه‌ی (۲۵) صورت میگیرد:

$$\begin{bmatrix}\dot{\phi}\\ \dot{\theta}\\ \dot{\psi}\end{bmatrix} = J_2(\eta_2)\begin{bmatrix}p\\ q\\ r\end{bmatrix} \tag{۲۵}$$

از طرفی که

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix}1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta\\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi\\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta\end{bmatrix} \tag{۲۶}$$

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

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

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v + M_A\dot{v} + C_A(v)v + D(v)v + G = \tau \tag{۲۷}$$

در اینجا M ماتریس جرم و اینرسی است، $C(v)$ ماتریس شتاب کریلیوس و گریز از مرکز، $D(v)$ ماتریس میرایی هیدرودینامیکی، G ماتریس شتاب گرانش و بویانسی، τ بردار نیرو وگشتاورهای خارجی است و v بردار سرعت وسیله می‌باشد. باید این را درنظر گرفت که در معادله (۲۵)، نیروهای محیطی 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 می توان با معادلات (۲۸) و (۲۹) بیان کرد:

$$F_j = -\dot{u}_i m_{ji} - \varepsilon_{ikl}u_i\Omega_k m_{li} \tag{۲۸}$$

$$M_j = -\dot{u}_i m_{j+3,i} - \varepsilon_{ikl}u_i\Omega_k m_{l+3,i} - \varepsilon_{ikl}u_k u_i m_{li} \tag{۲۹}$$

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 ۲۳۱ و ۱۲۳) باشد اما اگر این سیکل برابر با (۳۲۱ و ۲۱۳ و ۱۳۲) باشد این مقدار برابر با -1 خواهد بود اما درغیر 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 برش های دو بعدی داده می‌شود و ضرایب جرم افزوده و دمپینگ برای هر قطعه به صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. ضرایب جرم افزوده برای مقاطع دو بعدی بدنه که به شکل دایره است، محاسبه شده است. اما چون ضرایب 2-D به عنوان a_{ij} تشریح شده است جرم افزوده به ازای هر واحد طول یک قطعه استوانه ای به شرح معادله (۳۰) است.

$$m_a(x) = \pi\rho R(x)^2 \tag{۳۰}$$

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.

$$m_{ii} = k_{trans}\frac{\pi\rho c^2 b^3}{4} \tag{۳۱}$$

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.

$$k_{trans} = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{1}{a_e}}} \tag{۳۲}$$

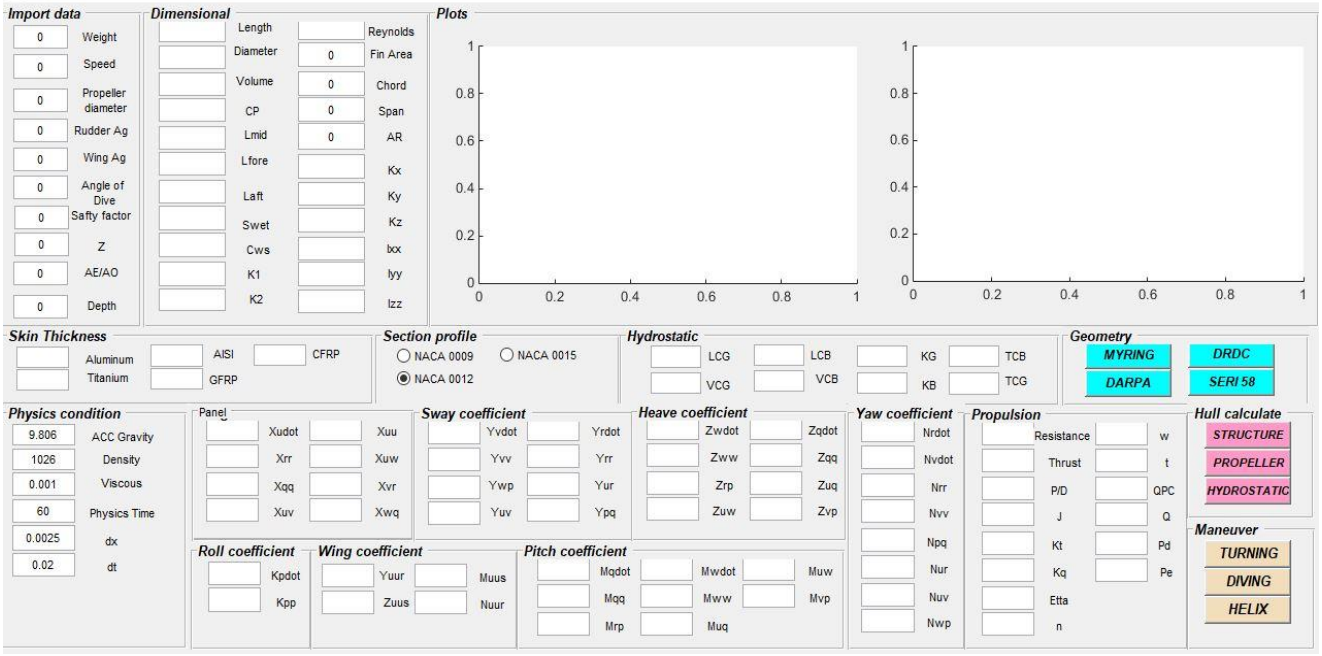
۵ – محیط برنامه

در نهایت با تدوین محیطی مناسب برای محاسبات هیدرودینامیکی ربات‌های AUV می‌توان بستری مناسب جهت سهولت و افزایش

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.5.5]

سرعت در بخش طراحی این ربات‌ها را متصور شد. تمرکز اصلی این برنامه، بر طراحی مفهومی ربات‌های AUV با درنظر گرفت شرایط عملیاتی کاربر است. این برنامه به گونه‌ای 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 تاثیر هر المان را بررسی نمود. نمایی از صفحه‌ی اصلی برنامه در شکل ۷ قابل مشاهده است.



شکل ۷ برنامه تولید شده

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

۶ – اعتبار سنجی

از علامتگذاری SNAME (1950) 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 $\dot{u}$ درجهت x به صورت معادله (۳۳) نوشته می‌شود.

$$Y_A = Y_{\dot{u}}\dot{u} \qquad where \qquad Y_{\dot{u}} = \frac{\partial Y}{\partial \dot{u}} \qquad (۳۳)$$

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

جدول ۱ مقایسه ضرایب هیدرودینامیکی محاسبه شده با مرجع [۹]

parameter	value	EXP	error%
X_{uu}	-3.78	-3.9	3.07
$X_{\dot{u}}$	-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
$K_{\dot{p}}$	-0.0148	-0.0141	4.96
M_{qq}	-7.2	-9.4	23.4
$M_{\dot{q}}$	-4.4	-4.88	9.8

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.5.5]

جدول ۲ مشتقات هیدرودینامیکی ربات AUV

parameter	definition
$X_{uu}, X_{\dot{u}}$	مشتقات نیرو در جهت X
$Y_{vv}, Y_{\dot{r}}, Y_{\dot{v}}, Y_{rr}$	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 جدول۱ تعداد زیادی از ضرایب دارای مقدار خطای قابل قبولی می‌باشند و می‌توان به مقادیر محاسبه شده اعتماد نمود. اما ضریب K_{pp} تنها ضریبی است که درصد خطای بالایی را نسبت به بقیه ضرایب ثبت نموده است. دلیل این امر را می‌توان ضعف تئوری نواری بیان نمود چرا که در تئوری نواری از ویسکوزیته‌ی سیال صرف نظر می‌شود و قادر به محاسبه ضریب دمپینگ رول بدنه نمی باشد. ضریب دمپینگ رول محاسبه شده در جدول(۱) مربوط به سطوح کنترلی ربات می‌باشد و از ضریب دمپینگ بدنه صرفه نظر می‌شود.

۷ – تجزیه تحلیل نمونه ها

درنهایت پس از تهیه برنامه و اعتبارسنجی، میتوان مقایسه‌ای در زمینه عملکرد هیدرودینامیکی هندسه‌های موجود در بانک اطلاعاتی الگوریتم انجام داد و با توجه به نیاز عملیاتی مدنظر، هندسه و فرم بدنه‌ی کارآمدتر را انتخاب نمود. داشتن چنین اطلاعاتی دید مناسبی جهت طراحی مفهومی این ربات‌ها را برای طراح و مهندسین فراهم می‌کند.

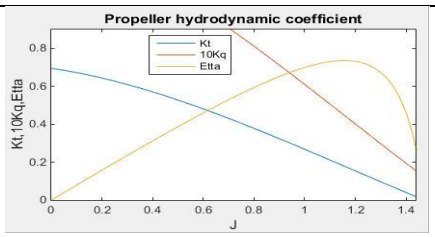
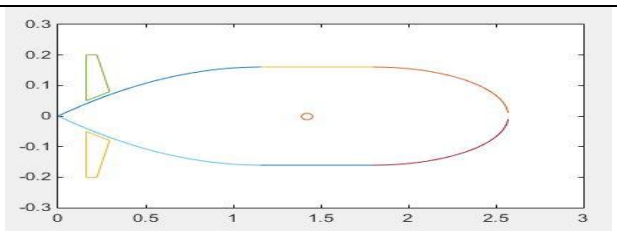
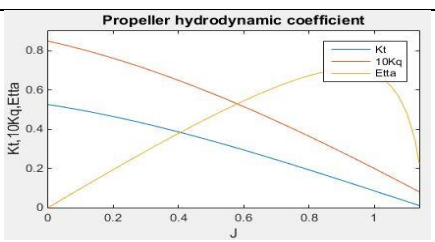
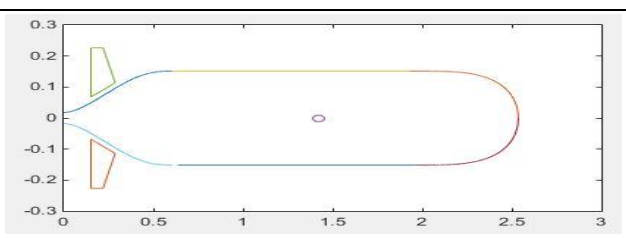
برای این منظور در این پژوهش برای مقایسه هیدرودینامیکی فرم بدنه‌ها، ورودی به صورت یکسان برای سری‌های بدنه‌ی نامبرده شده انتخاب شده است تا براساس آن بتوان هندسه‌های موجود را مورد سنجش قرار داد تا تفاوت عملکردهای هیدرودینامیکی آن‌ها بهتر مشخص گردد. این کار تصمیم گیری در مورد طراحی را تا حد ممکن بهینه می‌کند. 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

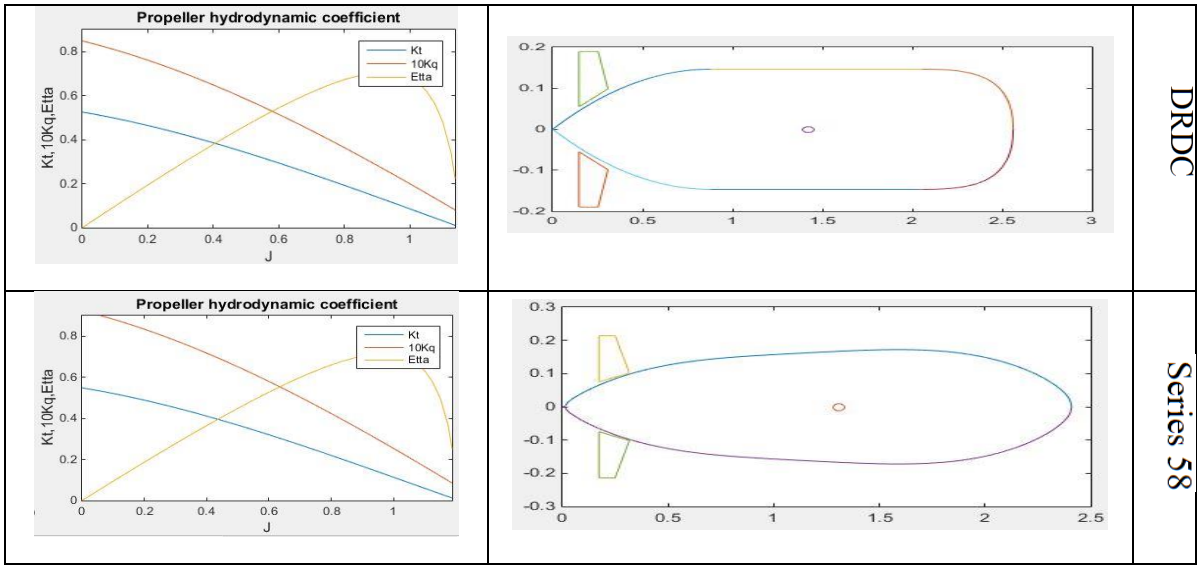
پس از محاسبات توسط الگوریتم نتایج برای فرم بدنه‌های نامبرده شده محاسبه می‌گردد. در جدول ۴ برخی از نتایج ارائه شده است. تمامی روند طراحی بدنه و بالک در برنامه‌ی تهیه شده صورت می‌پذیرد.

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

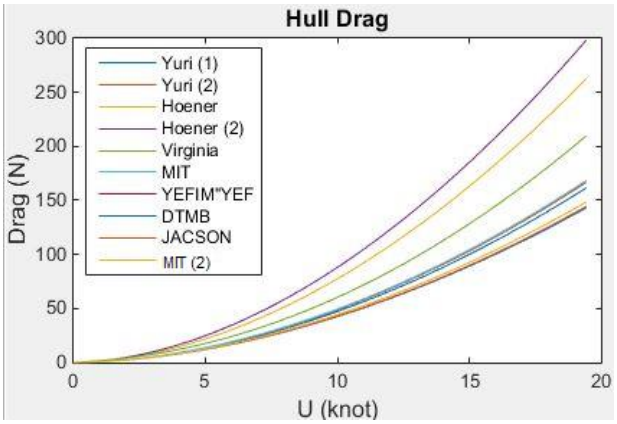
Propeller hydrodynamic coefficient plot	*Hull form*	
		Myring
		DARPA

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.5.5]



همانطور که درشکل ۷ قابل مشاهده است، مقاومت بدنه به ۱۰ روش مختلف محاسبه شده است که مرجع هرکدام در شکل قابل مشاهده است. اختلاف تمامی روش‌ها در نوع محاسبه ضریب درگ شکل سه بعدی بدنه است. برای ارائه نتایج بهتر، از نتایج مقاومت بدنه در سرعت طراحی میانگین‌گیری شده است.



شکل ۷ نمودار مقاومت- سرعت بدنه‌ی Myring

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

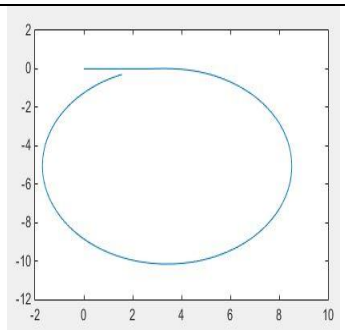
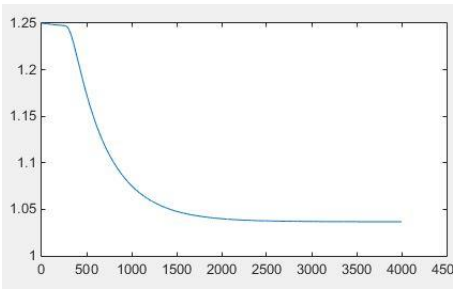
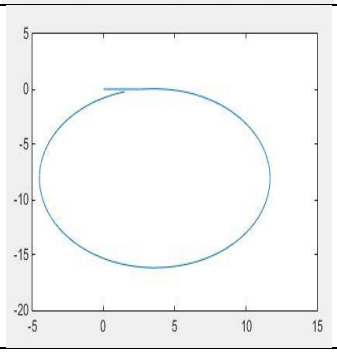
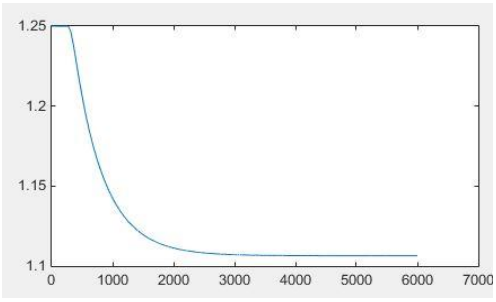
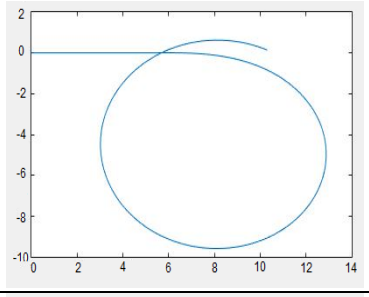
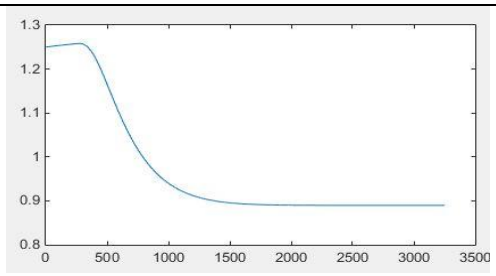
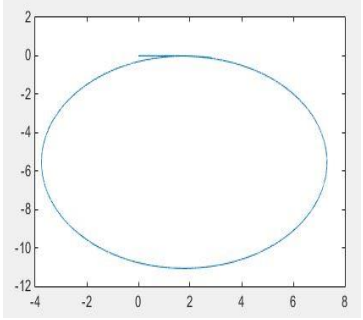
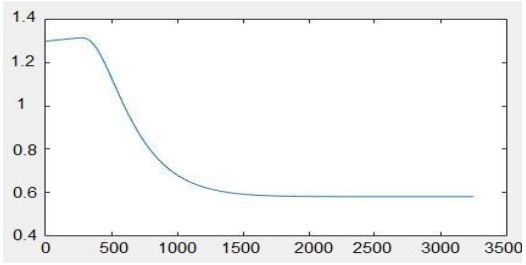
مانورپذیری یک ربات ارتباط مستقیمی با توان مصرفی حین عملیات دارد. مانورپذیری ضعیف و توانایی پایین ربات در حفظ مسیر و پایداری مسیر سبب استفاده‌ی مداوم از سطوح کنترلی و افزایش زمان عملیات می‌گردد. به همین منظور رابطه‌ی مستقیمی بین مانورپذیری و مصرف انرژی در حین عملیات وجود دارد. در جدول ۶ و ۵ نتایج تست دورزدن، در جدول ۷ نتایج تست تغییرعمق و مانور حلزونی ارائه شده است.

جدول ۵ نتایج تست دورزدن

Advance speed (m/s)	*Trajectory (X/L,Y/L)*	

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.5.5]

Myring		
DARPA		
DRDC		
Series 58		

جدول ۶ پارامترهای مانور دورزدن با ابعاد بالک یکسان

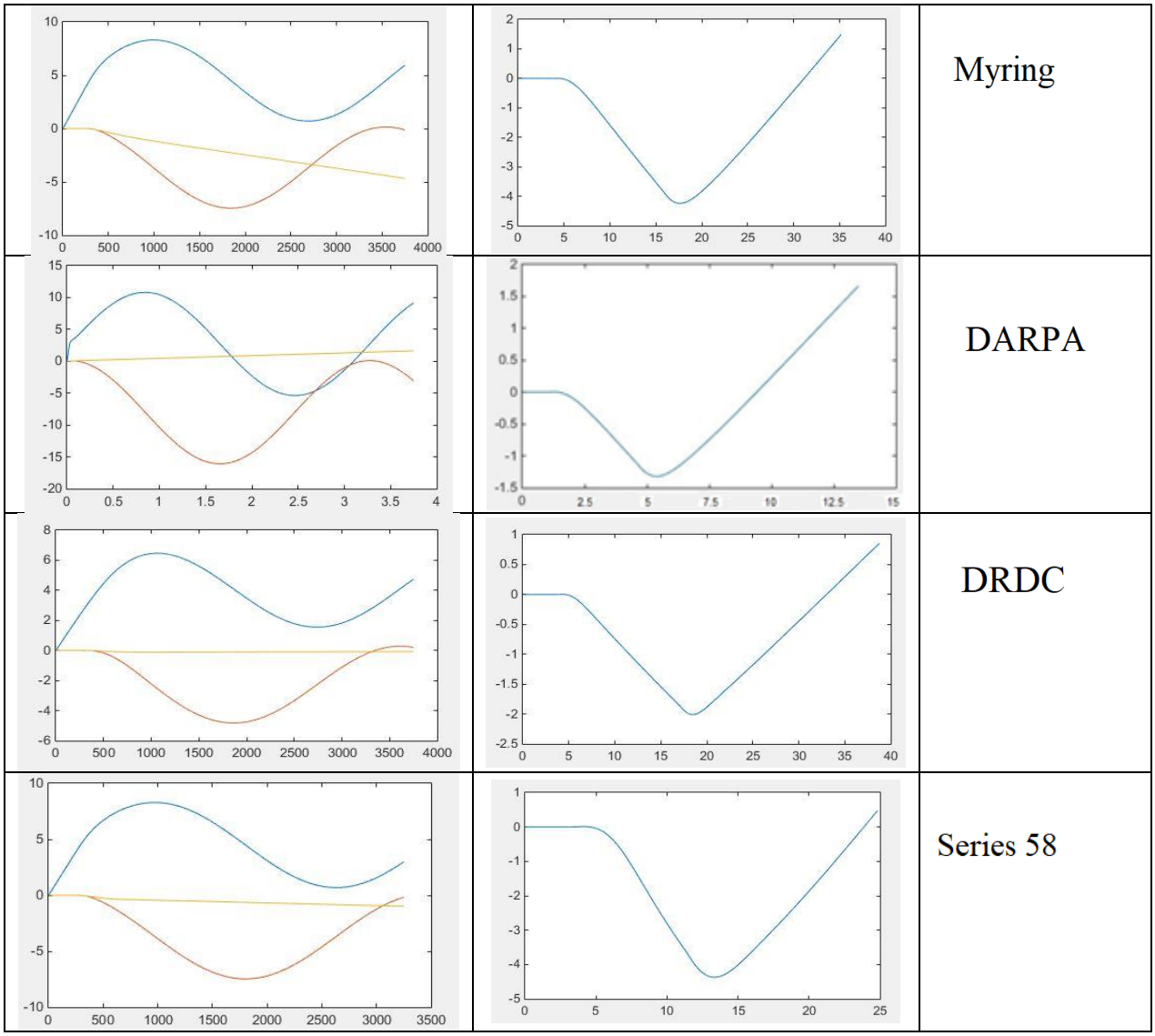
سری بدنه	وزن (kg)	سرعت طراحی (m/s)	قطر بدنه (m)	طول بدنه (m)	قطر تاکتیکی (m/L)	طول پیشروی (m/L)	طول عرضی (m/L)
Myring	۱۵۰	۱.۲۵	۰.۳۲	۲.۵۷	۱۰.۱	۶.۲	۴.۹
DARPA	۱۵۰	۱.۲۵	۰.۳	۲.۵۹	۱۵.۸	۱۱.۰۵	۷.۵
DRDC	۱۵۰	۱.۲۵	۰.۲۹	۲.۵۶	۱۰.۲	۶.۲	۵.۸۵
Series 58	۱۵۰	۱.۲۵	۰.۳۴۴	۲.۴۱	۱۱.۲۵	۶.۳	۵.۷۵

جدول ۷ نتایج تست تغییر عمق و حلزونی

	Trajectory in dive test (X/L,Z/L)	*Trajectory in spiral test (X,Y,Z)/L*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.5.5]



یکی از مسائل مهم در طراحی وسایل زیرسطحی و دریایی، رانش و توان مورد نیاز جهت حرکت و مانورپذیری با سرعت طراحی وسیله می‌باشد. سیستم رانش درنظر 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 باشد. پس با این تفاسیر مصرف انرژی کمتر باعث کاهش حجم و اندازه باتری و منبع تغذیه ربات می‌گردد. بنابراین محاسبات مرتبط به سیستم رانش امری حیاتی و مهم در زمینه طراحی ربات های زیرسطحی می باشد. درجدول ۸ نتایج مرتبط به توان و سیستم رانش با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۸ نتایج مرتبط به سیستم رانش با سرعت طراحی یکسان

سری 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.5.5]

مباحث مهم دیگری که در طراحی ربات‌های AUV می‌توان درنظر 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 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 را نشان می‌دهد.

جدول۹ 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	۱.۶۱	۶.۱۳	۱۲.۳۵	۲.۸۷

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 درنظر گرفتن مزایا و معایب هریک از سری هندسه-های نامبرده شده می توان براساس نیاز عملیاتی کاربر برای طراحی ربات‌های AUV هندسه‌ای کارآمدتر با قابلیت‌های بهتر طراحی نمود. با بررسی دقیق نتایج حاصل از خروجی‌های الگوریتم 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 ربات-های 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.

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

ردیف	دیدگاه های عملیاتی	Myring	DARPA	DRDC	Series 58	معیار سنجش
۱	عملیات در عمق های بالا	۳	۲	۱	۴	استحکام پوسته و میزان ضخامت پوسته
۲	ماموریت های 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

همانطور که در جدول ۱۰ قابل مشاهده است، معیارهایی برای مقایسه‌ی هندسه‌ها درنظر 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، تجزیه و تحلیل هیدرودینامیکی صورت گرفته است. با استفاده از این مطالعه می-توان 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 می-باشد که کمک شایانی در صرفه جویی زمان با توجه به مجهول بودن بسیاری از پارامترهای هیدرودینامیکی می‌کند که این امر می‌تواند امتیاز مثبت و ارزشمندی باشد. مزیت دوم این برنامه بررسی فرم بدنه‌های رایج جهت طراحی AUV می‌باشد. این برنامه کاربردهای مفیدی در جهت تجزیه و تحلیل پارامترهای مجهول برای طراح را می‌تواند آشکار سازد. بدنه‌ی Myring و DRDC بهترین عملکرد و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.5.5]

به ترتیب بعد از این دو series 58 و DARPA در بخش مانورپذیری داشته‌اند. در بخش سیستم رانش، بدنه Myring و series 58 - بیشترین راندمان آب آزاد برای پروانه را دارا می‌باشند. در صورتی که اگر راندمان کلی سیستم رانش را بسنجیم بدنه‌ی DARPA بیشترین راندمان را به خود اختصاص می‌دهد. در بخش استحکام سازه‌ای نیز می‌توان نتیجه گرفت بدنه DARPA و DRDC کمترین ضخامت پوسته را در شرایط عملیاتی یکسان داشته اند، که این امر می‌تواند دست طراح را برای افزایش وزن تجهیزات قابل حمل توسط ربات بازتر کند. خروجی‌های این کار را می‌توان در چند مورد زیر نیز خلاصه نمود:

- شناخت هندسه‌ی مطلوب‌تر با دیدگاه عملیاتی کاربر
- طراحی فرم بدنه و سطوح کنترلی در بازه‌ی بهینه
- کاهش زمان طراحی مفهومی برای طراح
- تجزیه و تحلیل پارامترهای هیدرودینامیکی بدنه‌ی 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 Bandodkar, S.N., 2007. The small Maya AUV–Initial field results.

[7] Błachut, J. and Smith, P., 2008. Buckling of multi-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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.5.5]