

بررسی تجربی و تئوری رفتار دینامیکی زیرسطحی‌ها

حسن صیادی^{۱*}، مسعود رحیمیان^۲، محمد سعید سیف^۳

قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی، دانشگاه صنعتی شریف

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک - دریا، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از وسیله‌های بدون سرنشین به دلیل کاهش خطرات انسانی در بخش دریا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. پیش‌بینی رفتار دینامیکی یک وسیله زیر سطحی هوشمند در مرحله طراحی بسیار مهم است. به عبارت دیگر برای طراحی یک زیرسطحی هوشمند باید قابلیت کنترل و مانور آن توسط مدل‌های ریاضی دقیق مورد بررسی قرار گیرد. مدل ریاضی شامل نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی است که به صورت معادلات حرکت بیان می‌شوند. بنابراین ضروری است که پیش از ساخت به منظور بهینه کردن طراحی، قابلیت مانور و رفتار دینامیکی وسیله زیرسطحی پیش‌بینی شود که این امر با شبیه‌سازی کامپیوتری امکان پذیر است.

زیرسطحی SUT-2 یک زیرسطحی هوشمند است که در طی سال‌های اخیر طراحی و ساخته شده است. تست‌های آزمایشگاهی حرکت آن انجام گردیده و نتایج آن در بهینه کردن رفتار دینامیکی و طراحی زیرسطحی فوق مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله به بررسی رفتار دینامیکی زیرسطحی هوشمند SUT-2 و نتایج تست و شبیه سازی پرداخته شده و ویژگی‌های آن تحلیل گردیده است. این نتایج می‌توانند در بهبود قابلیت مانور زیرسطحی و طراحی کنترلر هوشمند مورد استفاده قرار گیرند. روش ارائه شده محدود به زیرسطحی SUT-2 نبوده و در بررسی و طراحی انواع وسایل و ربات‌های زیردریایی قابل استفاده خواهد بود.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی دینامیکی، ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی، زیرسطحی هوشمند، تست تجربی زیرسطحی

TECHNICAL NOTE

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON DYNAMICS BEHAVIOR OF UNDERWATER VEHICLE

H. Sayyaadi¹, M. Rahimian², M.S. Seif³

Center of Excellence in Hydrodynamics and Dynamics of Marine Vehicles,
Sharif University of Technology

1- Associate Professor, Mech. Eng. Department, Sharif University of Tech.

2- Master of Science in Mech. Eng., Mech. Eng. Department, Sharif University of Tech.

3- Professor, Mech. Eng. Dep., Sharif University of Tech.

* نویسنده مسوول مقاله sayyaadi@sharif.edu

Abstract

In recent years, unmanned vehicles have intensively been developed to reduce risk on human life for marine applications. Predicting the dynamics behavior of an autonomous underwater vehicle is important during the vehicle's design phase. In other words to design an AUV, one must clarify its maneuverability and controllability based on a mathematical model. The mathematical model contains various hydrodynamics forces and moments expressed collectively in terms of dynamics equations. Therefore, to optimize the AUV design it is necessary to predict maneuvering ability and dynamics behavior of AUV. This can be done by computational simulation.

SUT-2 is an AUV system, being developed by Marine Engineering Research Center, Sharif University of Technology in Iran. Primary dynamics test have been developed in marine engineering laboratory. In this paper dynamics behavior of this AUV is investigated by using experimental test and computational simulation. Results can be used to optimize the dynamics behavior and designing the autonomous controller of AUV.

Keywords: Dynamics Simulation, Autonomous Underwater Vehicles (AUV), Hydrodynamics Coefficients of AUV, Experimental Test for AUV

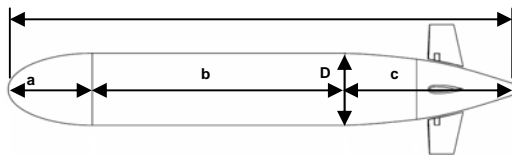
۱- مقدمه

کاربرد اصلی این صنعت نوپا را می‌توان عمدتاً صنایع عظیم نفت و گاز و صنایع نظامی دانست، اما دستاوردهای این صنعت به گونه ایست که همچون صنایع موفق دیگر رشد و شکوفایی این صنعت وابسته به دانشگاهها و محافل علمی است. اما به علت رشد تقاضا و هزینه‌های ساخت و تولید تجاری بسیار سنگین و سرسام آور AUV و ROV ها، کوچکترین دستاوردهای پژوهشی جدید تأثیرات محسوسی در شکوفایی هر چه بیشتر این صنعت داراست. به همین دلیل است که سرمایه‌گذاری قابل توجهی در جهان بر روی فعالیت‌های پژوهشی در این زمینه از طرق مختلف از جمله حمایت از هسته‌های پژوهشی، دانشگاهی و برگزاری مسابقات مرتبط در جریان است.

زیرسطحی C-SCOUT در سال ۲۰۰۱ به منظور کاربردهای فراساحل و تحقیقاتی در کانادا ساخته شده است. این ربات دارای طول ۴/۵ متر و سرعت طراحی ۱/۵ متر بر ثانیه است. تست در حوضچه کشش، تست‌های مانور و شبیه‌سازی دینامیکی روی این وسیله انجام شده است. در سال ۱۹۹۶ در دانشگاه توکیو یک شبیه‌ساز وسایل زیرسطحی بنام MVS طراحی شده است که قابلیت شبیه‌سازی مأموریت چند ربات زیرسطحی را همزمان دارد و همچنین می‌تواند بصورت آنلاین با عملیات ربات کار کند. تاکنون روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی ربات‌های زیرآبی ارائه شده

طی دهه‌های اخیر وسیله‌های بدون سرنشین به دلیل کاهش خطرات انسانی در بخش دریا بسیار مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. در مهندسی زیرسطحی و عملیات دریایی نیز این موضوع اهمیت ویژه‌ای یافته و بدلیل محدودیت در تأمین توان مورد نیاز برای رانش و تجهیزات جانبی وسیله زیرسطحی، تخمین دقیق نیروهای مورد نیاز برای انجام مأموریت امری ضروری است. بر این اساس پیش‌بینی رفتار دینامیکی یک وسیله زیرسطحی هوشمند^۱ در مرحله طراحی بسیار مهم می‌باشد. به عبارت دیگر برای طراحی یک زیرسطحی هوشمند باید قابلیت کنترل و مانور آن توسط مدل‌های ریاضی دقیق مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین ضروری است که پیش از ساخت به منظور بهینه‌سازی طراحی، قابلیت مانور و رفتار دینامیکی وسیله زیرسطحی پیش‌بینی شود که این امر با شبیه‌سازی کامپیوتری امکان پذیر است. مدل ریاضی شامل نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی می‌باشد که به صورت روابط حرکت بیان می‌شوند. و شبیه‌سازی دقیق حرکت زیرسطحی‌ها با حل این روابط و به کمک ضرایب هیدرودینامیکی بدنه امکان پذیر است.

در حال حاضر در حدود ۴۶ مدل AUV در سراسر جهان در وضعیت عملیاتی قرار دارند. تعدادی از آنها قادر به انجام مأموریت‌هایی در اعماق دریا، در زیر آبهای یخ‌زده و نیز در نیروگاه‌های هسته‌ای هستند.



شکل ۱- شماتیک بدنه SUT-2

جدول ۱- ابعاد SUT-2 (میلی‌متر)

۱۴۱۲	L	طول کل
۲۰۰	D	قطر
۲۳۵	a	طول دماغه
۷۰۶	b	طول استوانه میانی
۴۷۱	c	طول دم

جدول ۲- مشخصات سطوح کنترلی SUT-2

۴	تعداد
NACA0015	پروفیل
۸۰	وتر (mm)
۱۰۰	دهانه (mm)
۸۸۲۴	مساحت (mm ²)
۵۳۰	فاصله محورها تا مرکز شناوری (mm)

جدول ۳- مشخصات پروانه زیرسطحی SUT-2

گام ثابت (FPP)	نوع پروانه
تکی	
X482 (Octura)	سری
۲	تعداد پره
۸۲	قطر (میلی‌متر)
۴,۱	گام (میلی‌متر)

جدول ۴- جرم و اینرسی زیرسطحی SUT-2

۳۵/۷۶	M (kg)
۰/۱۸۲	I _{xx} (kg.m ²)
۱/۸۲۱	I _{xx} (kg.m ²)
۱/۸۲۱	I _{xx} (kg.m ²)
۰	I _{xy} , I _{xz} , I _{yz}

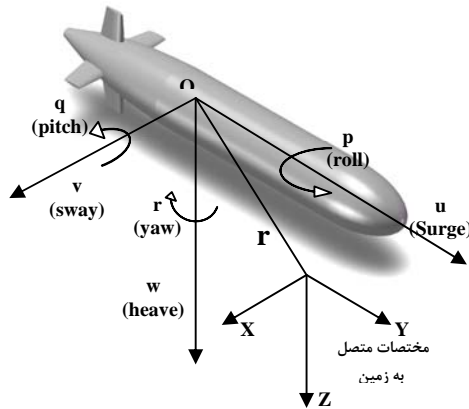
است که از آنها می‌توان به روش هیلری ۲، یو ۳ و فوسن ۴ اشاره کرد [۳-۱].

برای دسترسی به تکنولوژی‌های مرتبط با این وسایل وجود یک شبیه‌ساز کامل و جامع حرکات وسایل زیرسطحی در کشور برای بررسی دینامیک حرکت متحرک‌های مختلف زیرسطحی بسیار مفید خواهد بود. در این مقاله شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی با برنامه‌نویسی در نرم افزار MATLAB بر روی زیر سطحی SUT-2 انجام می‌شود. شبیه‌سازی در این تحقیق از طریق استخراج ضرایب هیدرودینامیکی که به روش تئوری و یا تجربی بدست آمده، انجام می‌شود. انجام تست تجربی روی وسیله بدین علت است که بتوان نتایج هر دو روش با یکدیگر مقایسه و اعتبارسنجی انجام شود و در نهایت با تکیه به روش ارائه شده شبیه‌ساز حرکات وسایل زیرسطحی دارای خطای ناچیزی بوده و می‌توان وسایل مختلف زیر سطحی را به این روش شبیه‌سازی کرد.

۲- کلیات طراحی SUT-2

در این قسمت روند طراحی فرم بدنه و تعیین ابعاد SUT-2 تشریح می‌شود. بدنه از نوع کروزینگ شکل انتخاب شده است. برای طراحی بدنه و تعیین ابعاد آن یک چرخه طراحی وجود دارد که با توجه به پارامترهای مختلف در طراحی با یک روند رفت و برگشتی طراحی انجام می‌شود. البته در صورتی که از بدنه‌های مشابه ساخته شده در دنیا برای طراحی استفاده شود، روند طراحی بسیار سریع تر و راحت تر انجام می‌گیرد [۴]. خطوط بدنه بدین شکل است که دماغه بیضی‌گون بوده، قسمت دم یک معادله درجه ۳ و قسمت میانی یک استوانه است. شکل ۱ ابعاد اصلی SUT-2 را نشان می‌دهد. ابعاد بدنه در جدول ۱، مشخصات سطوح کنترلی در جدول ۲ و مشخصات پروانه در جدول ۳ آورده شده است.

مختصات محلی منطبق بر مرکز شناوری^۶ انتخاب می‌شود. شکل ۳ مختصات محلی و کلی را نمایش می‌دهد [۷].



شکل ۳- مختصات متصل به بدنه و متصل به زمین

معادله حرکت بر اساس قانون نیوتن به صورت زیر نوشته می‌شود [۷]:

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB(v)}v = \tau_{RB} \quad (1)$$

که τ_{RB} مجموع نیروهای خارجی است که شامل بخش‌های زیر است:

$$\tau_{RB} = \tau - M_A\dot{v} - C_{A(v)}v - D_{(v)}v + g_{(\eta)} \quad (2)$$

که τ نیروهای پیشران و کنترلی، M_A ماتریس جرم افزوده، $C_{A(v)}$ ماتریس کریولیس افزوده، $D_{(v)}$ جمله میرایی هیدرودینامیکی و $g_{(\eta)}$ نیروها و گشتاورهای بازگرداننده است. در نهایت معادلات ۶ درجه آزادی به صورت زیر نوشته می‌شود [۸]:

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= \sum X \\ m[\dot{v} - wp + ur - y_G(p^2 + r^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})] &= \sum Y \\ m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= \sum Z \\ I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\ + m[x_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= \sum K \\ I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\ + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= \sum M \\ I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{yx} + (rq - \dot{p})I_{xz} \\ + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= \sum N \end{aligned} \quad (3)$$

جرم و اینرسی بدنه زیرسطحی در جدول ۴ ارائه شده است. جنس بدنه با توجه به ملاحظات چون عمق کاری، وزن و خنک کاری انتخاب شده است. بدین صورت که کلیه قسمت‌های بدنه دارای ضخامت ۱ سانتیمتر است. دماغه و دم از جنس PVC و استوانه میانی از آلومینیوم است [۵]. سیستم رانش زیرسطحی به صورت تک موتوری است که نیروی پیشرانش توسط یک موتور DC تامین می‌شود. هدایت و کنترل AUV بوسیله ۴ سکان با پروفیل NACA0015 انجام می‌شود که از ۳ سرو موتور برای حرکت سکان‌ها استفاده می‌شود.

شکل ۲ شکل ۲ زیرسطحی SUT-2 را در حال تست نمایش می‌دهد.



شکل ۲- زیرسطحی SUT-2 در شرایط تست

۳- شبیه‌سازی دینامیکی

برای شبیه‌سازی حرکت وسایل زیرسطحی روند کلی بدین شکل است که ابتدا بایستی معادلات حرکت که در واقع تبیین کننده حرکت هستند، تدوین شوند. در مرحله بعد ضرایب معادلات بدست آورده می‌شوند و سپس به حل معادلات پرداخته می‌شود تا مقادیر شتاب، سرعت و مکان در هر لحظه مشخص شود. روابط ۶ درجه آزادی حرکت با ساده‌سازی‌های انجام شده از نوع معادلات دیفرانسیل غیرخطی معمولی^۵ است که با استفاده از روش‌های محاسباتی استاندارد به سادگی قابل حل هستند [۶]. معادلات حرکت زیرسطحی در مختصات محلی (متصل به بدنه) نوشته می‌شود. به این ترتیب نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی با تغییر راستای زیرسطحی نسبت به مختصات کلی، تغییر نمی‌کند. معمولاً مرکز دستگاه

مرکز جرم در زیر مرکز بویانسی وسیله قرار می‌گیرد و با توجه به رابطه (۵) هرچه فاصله آن‌ها بیشتر باشد به علت افزایش بازوی بازگرداننده، زیرسطحی تعادل و پایداری بهتری خواهد داشت. جملات پیشران ناشی از دوران پروانه نصب شده در انتهای دم وسیله به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\tau = [\rho D^4 K_T n^2, 0, 0, \rho D^5 K_Q n^2, 0, 0]^T \quad (6)$$

ضرایب پروانه با استفاده از منحنی‌های هیدرودینامیکی مختص به آن بدست می‌آیند. بعد از مشخص شدن ضرایب معادله (۴) با جداسازی جملات شتاب، معادله به صورت ماتریسی زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = [M_t]^{-1} \begin{bmatrix} \sum X \\ \sum Y \\ \sum Z \\ \sum K \\ \sum M \\ \sum N \end{bmatrix} \quad (7)$$

به طوری که ماتریس Mt به صورت زیر است :

$$M_t = \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 & 0 & m z_G & 0 \\ 0 & m - Y_v & 0 & -m z_G & 0 & -Y_r \\ 0 & 0 & m - Z_w & 0 & -Z_q & 0 \\ 0 & -m z_G & 0 & I_x - K_p & 0 & 0 \\ m z_G & 0 & -M_w & 0 & I_y - M_q & 0 \\ 0 & -N_v & 0 & 0 & 0 & I_z - N_r \end{bmatrix}$$

بنابراین شتاب در لحظه t_0 بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{v}_{(t_0)} = M_t^{-1} C_{(t_0)} \quad (8)$$

C مجموع سایر جملات است که مقدار آنها در لحظه t_0 با توجه به سرعت اولیه و آنچه‌ان که توضیح داده شد، بدست می‌آید.

با انتگرال گیری در بازه زمانی (δt) سرعت در لحظه $(t_0 + \delta t)$ بدست می‌آید [۱]، [۷]:

$$v_{(t_0 + \delta t)} = v_{(t_0)} + (\delta t) \dot{v}_{(t_0)} \quad (9)$$

این مقادیر سرعت در دستگاه مختصات محلی است و برای امکان دستیابی به انتگرال این مقادیر، باید توسط

سمت راست معادلات بالا همان نیروها و گشتاورهای خارجی است که با رابطه (۴) قابل محاسبه هستند.

(۴)

$$\begin{aligned} \sum X &= X_{HS} + X_{u|u}|u| + X_{u\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq \\ &\quad + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{Thrust} \\ \sum Y &= Y_{HS} + Y_{v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + Y_v\dot{v} + Y_r\dot{r} + Y_{ur}ur \\ &\quad + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{\delta r}\delta r \\ \sum Z &= Z_{HS} + Z_{w|w}|w| + Z_{q|q}|q| + Z_w\dot{w} + Z_q\dot{q} \\ &\quad + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{\delta s}\delta s \\ \sum K &= K_{HS} + K_p\dot{p} + K_{Thrust} \\ \sum M &= M_{HS} + M_{w|w}|w| + M_{q|q}|q| + M_w\dot{w} + M_q\dot{q} \\ &\quad + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{\delta s}\delta s \\ \sum N &= N_{HS} + N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_v\dot{v} + N_r\dot{r} \\ &\quad + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{\delta r}\delta r \end{aligned}$$

معادله (۴) شامل ضرایب هیدرودینامیکی است که بایستی به روش تست و یا حل عددی و یا روش‌های تحلیلی و نیمه تجربی بدست آورده شوند [۹-۱۰]. ضرایب زیرسطحی SUT-2 با استفاده از این روش‌ها بدست آمده است که در نتیجه می‌توان با استفاده از آنها حرکت زیرسطحی را شبیه‌سازی کرد [۱۱]. ضرایب هیدرودینامیکی معادله (۴) نیز عبارتند از:

$$\begin{aligned} X \text{ direction} &: X_u, X_wq, X_{qq}, X_{vr}, X_{rr}, X_{u|u}| \\ Y \text{ direction} &: Y_v, Y_r, Y_{ur}, Y_{wp}, Y_{pq}, Y_{uv}, Y_{v|v}|, Y_{r|r}| \\ Z \text{ direction} &: Z_w, Z_q, Z_{uq}, Z_{vp}, Z_{rp}, Z_{uw}, Z_{w|w}|, Z_{q|q}| \\ K \text{ direction} &: K_p \\ M \text{ direction} &: M_q, M_w, M_{uq}, M_{vp}, M_{rp}, M_{uw}, M_{w|w}|, M_{q|q}| \\ N \text{ direction} &: N_r, N_v, N_{ur}, N_{wp}, N_{pq}, N_{uv}, N_{v|v}|, N_{r|r}| \\ \text{Control Surfaces} &: Y_{\delta r}, Z_{\delta s}, M_{\delta s}, N_{\delta r} \end{aligned}$$

اندیس HS در رابطه (۴) مربوط به نیرو و ممان هیدروستاتیکی یا همان نیروهای بازگرداننده است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

(۵)

$$\xi_{(n)} = \begin{bmatrix} (W - B)s\theta \\ -(W - B)c\theta s\phi \\ -(W - B)c\theta c\phi \\ -(y_G W - y_B B)c\theta c\phi + (z_G W - z_B B)c\theta s\phi \\ (z_G W - z_B B)s\theta + (x_G W - x_B B)c\theta c\phi \\ -(x_G W - x_B B)c\theta s\phi - (y_G W - y_B B)s\theta \end{bmatrix}$$

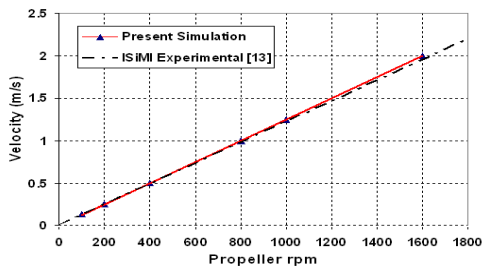
۴- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی دینامیکی در نرم‌افزار بایستی با نتایج تجربی معتبرسازی شود تا دقت آن مشخص و در صورت لزوم اشکالات نرم‌افزار مرتفع شود. بدین منظور زیرسطحی ISiMI که مشخصات بدنه و سکان و همچنین نتایج چند تست تجربی آن موجود است، مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳]. شکل ۴ زیرسطحی ISiMI به طول ۱/۲ متر و قطر ۰/۱۷ متر را نمایش می‌دهد.



شکل ۴- زیرسطحی ISiMI [۱۳]

اولین تست شبیه‌سازی شده مربوط به سرعت پیشروی است. در شکل ۵ نتایج تست تجربی سرعت زیرسطحی ISiMI همراه با نتایج شبیه‌سازی این مقاله در دور موتورهای مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج روش حاضر با نتایج تجربی تطابق قابل قبولی دارد.



شکل ۵- مقایسه نتایج تست سرعت و نتایج شبیه‌سازی در حرکت پیشروی در دورها مختلف موتور

تست شبیه‌سازی شده بعدی تست زیگزآگ است که قابلیت مانور افقی زیرسطحی را مشخص می‌کند، شکل ۶ نمودار مربوط به مقدار نرخ چرخش ($\dot{\theta}$) و شکل ۷ نمودار زاویه چرخش (θ) است. سرعت زیرسطحی هنگام تست برابر ۰/۸ متر بر ثانیه و زاویه سکان بین ۱۲/۶+ و ۱۲/۶- درجه تغییر می‌کند.

مفهوم ماتریس ژاکوبی به مختصات اصلی به صورت زیر تبدیل شوند:

$$\dot{\eta} = J^{-1}(\eta_2)v \quad (10)$$

$J(\eta_2)$ ماتریس ژاکوبی است:

$$J(\eta_2) = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0 \\ 0 & J_2(\eta_2) \end{bmatrix}$$

نهایتاً مکان در مختصات کلی در لحظه $(t_0 + \delta t)$ عبارتست از:

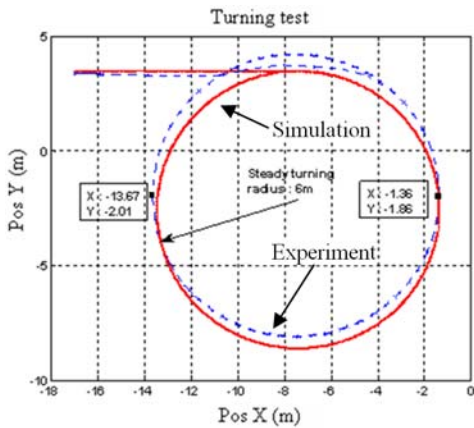
$$\eta_{(t_0 + \delta t)} = \eta_{(t_0)} + (\delta t) \dot{\eta}_{(t_0)} \quad (11)$$

مکان اولیه نیز از ورودیهای مساله است.

مبتنی بر روند ارائه شده در بالا یک برنامه در نرم‌افزار متلب^۷ تهیه شده است که حرکت زیرسطحی‌ها را شبیه‌سازی می‌کند. همچنین لازم به ذکر است این نرم‌افزار با فرض حرکت زیرسطحی در زیر آب و در عمق کاملاً مغروق نوشته شده است و حرکت سطحی را شبیه‌سازی نمی‌کند. مراحل شبیه‌سازی حرکات به ۳ مرحله تقسیم شده است [۱۲]:

در مرحله اول بایستی مشخصات بدنه، سطوح کنترلی و پروانه تعیین شود، در مرحله دوم ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی باید مشخص شود که این امر به دو روش امکان پذیر است، بدین صورت که یا کاربر خود ضرایب را وارد کند و یا نرم‌افزار با توجه به مشخصات زیرسطحی ضرایب را تخمین بزند، در روش دوم به علت آنکه ضرایب بصورت تخمینی محاسبه می‌شوند بنابراین دقت شبیه‌سازی کاهش می‌یابد. مرحله سوم شبیه‌سازی حرکات زیرسطحی است که نرم‌افزار با توجه به شرایط اولیه و ورودی‌ها حرکت زیرسطحی را پیش‌بینی می‌کند. شرایط اولیه عبارت است از وضعیت اولیه (مکان و زوایای اوایلر) و سرعت (خطی و دورانی) اولیه. ورودی‌ها نیز شامل دور موتور و زوایای باله‌ها و هم چنین مدت زمان شبیه‌سازی است.

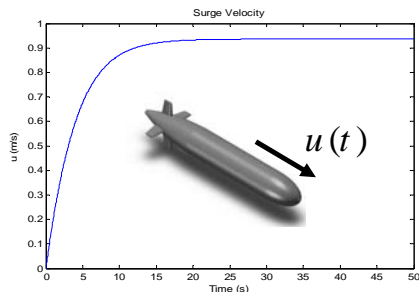
تجربی می‌توان گفت نتایج نرم‌افزار دارای دقت مناسبی است.



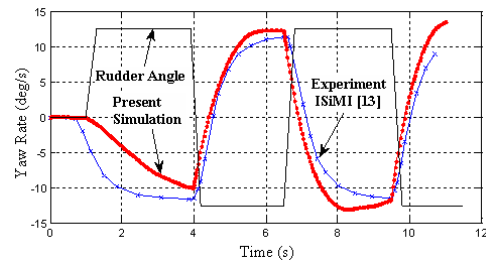
شکل ۸- مقایسه شبیه‌سازی دایره چرخش با تست تجربی

۵- شبیه‌سازی حرکت زیرسطحی SUT-2

حال برای بررسی کیفیت و دقت شبیه‌سازی دینامیک حرکت زیرسطحی SUT-2 چند تست مختلف برای این زیرسطحی تعریف شده و در نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌شود. تست سرعت پیشروی اولین تستی است که شبیه‌سازی شده است. شکل ۹ سرعت زیرسطحی را برای دور موتور ۱۰۰۰ rpm نمایش می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود ابتدا سرعت صفر بوده و بتدریج سرعت افزایش یافته و نهایتاً به مقدار ۰/۹۳ متر بر ثانیه می‌رسد که در این سرعت مقدار نیروی تراست پروانه و نیروی مقاومت بدنه باهم برابر شده است و در نتیجه سرعت زیرسطحی در این مقدار اشباع شده و ثابت می‌ماند.

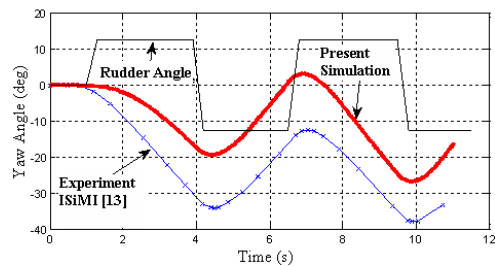


شکل ۹- سرعت پیشروی با دور موتور ۱۰۰۰ rpm



شکل ۶- مقایسه نرخ چرخش در تست تجربی و شبیه‌سازی کامپیوتری

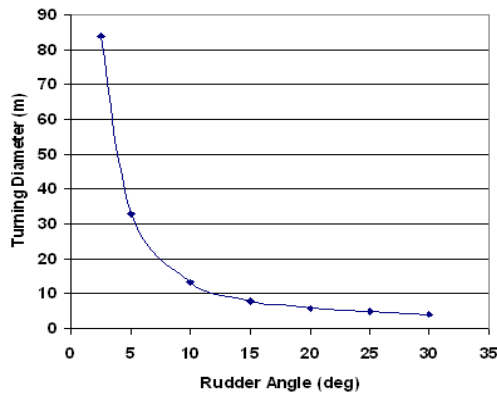
همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی حاضر مشابه نتایج تجربی زیرسطحی ISiMI است، لذا می‌توان به طور تقریبی نرخ چرخش را با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری پیش‌بینی کرد.



شکل ۷- مقایسه زاویه چرخش در تست تجربی و شبیه‌سازی کامپیوتری

با مقایسه نتایج زاویه چرخش دو روش، با وجود شباهت می‌توان گفت که نتایج شبیه‌سازی و نتایج تست تطابق مناسبی ندارند که این به دلیل پیچیدگی تست زیگزاگ است. از جمله علل خطا می‌توان به پیچیدگی تست زیگزاگ و تأثیرات غیرخطی این تست اشاره کرد. و مهمترین عامل، خطای انباشتگی است که بصورت متوالی ضمن انتگرالگیری اضافه می‌شود. در واقع رفتار یکسان است ولی مقداری خطای انباشتگی بصورت شیفت منحنی ظاهر شده است و می‌توان انتگرالگیری را کالیبره نمود.

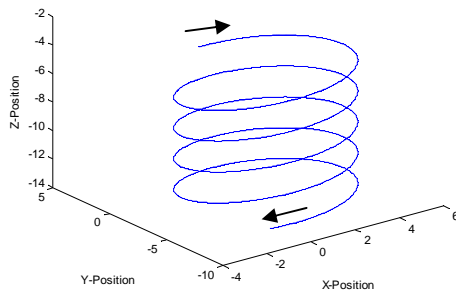
تست دایره چرخش برای تعیین شعاع گشت‌زنی وسیله زیرسطحی انجام می‌شود. شکل ۸ مربوط به تست دایره چرخش زیرسطحی ISiMI با زاویه سکان ۱۵ درجه است. با توجه به نتایج اعتبارسنجی شبیه‌سازی با تست



شکل ۱۲- قطر دایره چرخش SUT-2 در زوایای مختلف باله

شکل ۱۲ تغییرات قطر دایره چرخش SUT-2 را با دور 1000 rpm و در زوایای باله مختلف نشان می‌دهد. این نتایج با تکرار شبیه‌سازی‌هایی مانند نمونه نمایش داده شده در شکل ۱۱ بدست آمده است.

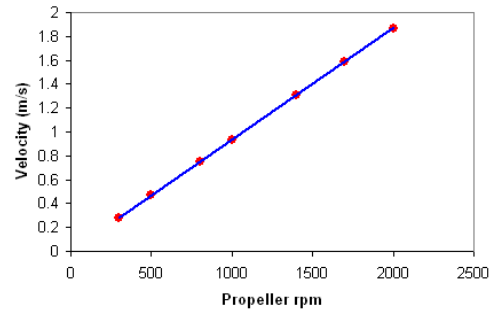
حرکت مارپیچ زیرسطحی برای زاویه باله 15° درجه شبیه‌سازی شده است بدین صورت که زیرسطحی با دور 1000 rpm حرکت میکند همزمان زاویه باله‌های افقی و عمودی به اندازه 15° درجه تغییر می‌کند. مسیر طی شده که بصورت مارپیچ است در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱۳- تست مارپیچ

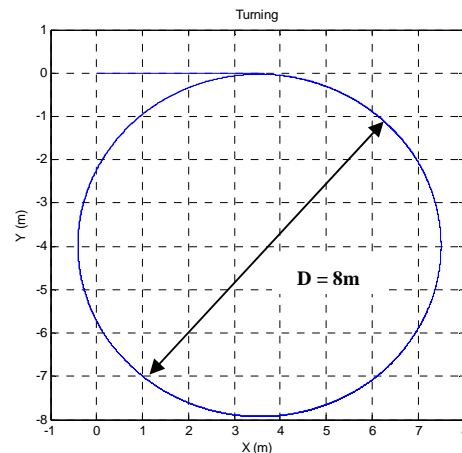
همانطور که در شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود، زیرسطحی با زاویه غوص $5/5^\circ$ درجه حرکت کرده و به میزان 10 متر غوص کرده است.

و شکل ۱۰ تغییرات سرعت نهایی SUT-2 را در دور موتورهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود تغییرات سرعت با دور موتور بصورت خطی است.



شکل ۱۰- سرعت اشباع شده در حرکت پیشروی SUT-2 برحسب دور موتور

جهت تعیین شعاع گشت‌زنی زیرسطحی تست دایره چرخش در زاویه باله 15° درجه و دور موتور 1000 rpm شبیه‌سازی شده است. شکل ۱۱ تست دایره چرخش را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۱- تست دایره چرخش SUT-2 با زاویه باله 15° درجه و دور موتور 1000 rpm

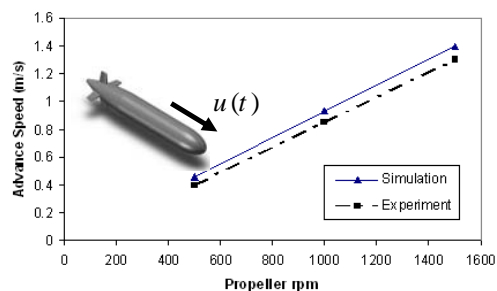
همانطور که ملاحظه می‌شود قطر دایره چرخش حدود 8 متر است، همچنین سرعت پیشروی حدود 0.7 m/s است و نرخ چرخش برابر 11 deg/s است.

۶- تست‌های تجربی زیرسطحی SUT-2

به منظور بررسی بهتر دینامیک حرکت زیرسطحی SUT-2 و همچنین مقایسه کاملتر نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری با نتایج تجربی تعدادی تست تجربی بر روی نمونه ساخته شده انجام شده است که در این قسمت به تشریح آنها پرداخته می‌شود. برای انجام تست‌ها نیاز به یک محل مناسب است تا تست‌ها بصورت دقیق انجام شود. محل انجام تست باید با توجه به شرایط تست‌ها انتخاب شود. جهت انجام تست باید آب ساکن باشد و جریان آب وجود نداشته باشد. با توجه به امکانات موجود تست‌ها در حوضچه آزمایشگاه مهندسی دریا دانشگاه صنعتی شریف انجام شده است. که ابعاد این حوضچه در جدول ۵ ارائه شده است.

طول	عرض	عمق
۲۵ متر	۲/۵ متر	۱/۲ متر

تست سرعت پیشروی در ۳ دور موتور مختلف انجام شده است و همزمان با استفاده از نرم‌افزار تهیه شده و برای اعتبارسنجی نرم‌افزار، شبیه‌سازی‌های متناظر در این ۳ دور صورت گرفته است که نتایج تست را همراه با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار در شکل ۱۴ مشاهده می‌کنید. جدول ۶ نیز نتایج و خطا در هر سرعت را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۴- نمودار سرعت پیشروی بر حسب دور پروانه زیرسطحی SUT-2

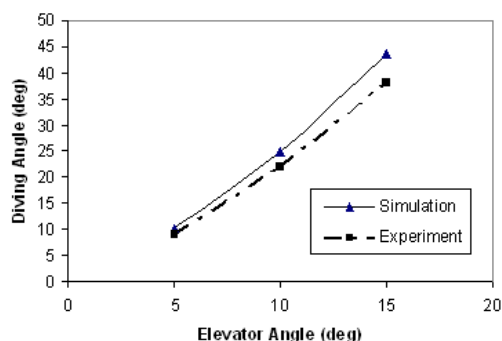
با توجه به نمودار شکل ۱۴، زیرسطحی SUT-2 در دور ۱۱۰۰ rpm به سرعت طراحی ۱ متر بر ثانیه (سرعت طراحی) رسیده است.

جدول ۶- مقایسه نتایج شبیه‌سازی سرعت اشباع شده در حرکت پیشروی SUT-2 با نتایج تست تجربی

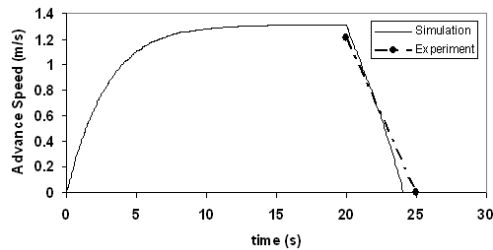
ردیف	دور موتور (rpm)	سرعت (m/s)		خطای
		شبیه‌سازی	تست تجربی	
۱	۵۰۰	۰/۴۶	۰/۴	٪۱۳
۲	۱۰۰۰	۰/۹۳	۰/۸۵	٪۸
۳	۱۵۰۰	۱/۴	۱/۳	٪۷

مقدار خطای متوسط در دوره‌های کاری زیرسطحی حدود ۹/۳٪ است که می‌تواند بعثت خطای اندازه‌گیری و همچنین خطای نرم‌افزار در محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی باشد. بطور کلی می‌توان گفت نتایج شبیه‌سازی به نتایج تجربی نزدیک است، بنابراین می‌توان بجای انجام تست تجربی و برای محاسبات اولیه از نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار با دقت خوبی استفاده کرد که بسیار سریع‌تر و ارزان‌تر است.

به منظور ارزیابی قابلیت زیرسطحی در حرکت غوص و تعیین زاویه غوص زیرسطحی در سرعت طراحی تست غوص بر روی زیرسطحی SUT-2 انجام شده است. تست به این صورت انجام شده است که زیرسطحی با دور موتور ۱۱۰۰ rpm شروع به حرکت می‌کند بعد از رسیدن زیرسطحی به یک سرعت ثابت، زاویه باله‌ها تغییر داده می‌شود. مقایسه زاویه غوص در حالت تست و شبیه‌سازی برای ۳ زاویه باله ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه در شکل ۱۵ نمایش داده شده است.



شکل ۱۵- زاویه غوص زیرسطحی SUT-2



شکل ۱۶- مقایسه نتیجه تست تجربی و شبیه‌سازی تست توقف زیرسطحی SUT-2

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار دینامیکی یک زیرسطحی هوشمند به روش شبیه‌سازی کامپیوتری و تست تجربی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. بدین منظور شبیه‌سازی حرکت زیرسطحی SUT-2 با رویکرد معادلات ۶ درجه آزادی غیر خطی محاسبه گردیده است. استفاده از این معادلات برای مرحله طراحی و همچنین برای ربات‌های هوشمندی که از سیستم تصحیح خطا^۸ استفاده می‌کنند پیشنهاد می‌شود.

روش شبیه‌سازی کامپیوتری حرکت، روشی سریع، دقیق و کم هزینه جهت پیش‌بینی رفتار دینامیکی و قابلیت مانور وسیله‌های زیرسطحی در مرحله طراحی می‌باشد. آنچه مسلم است استفاده از این روش ما را از تست تجربی بی‌نیاز نخواهد کرد و تنها روشی است که از آن برای بهینه کردن حرکت و پایداری دینامیکی زیرسطحی در مرحله طراحی استفاده می‌شود که این امر با تغییر مشخصات بدنه، سطوح کنترلی و سیستم رانش امکان پذیر است. از دیگر مزایای این تحقیق استفاده از نتایج شبیه‌سازی دینامیکی به‌عنوان ورودی‌های سیستم کنترلی در ربات‌های زیرسطحی هوشمند است بدین ترتیب که برای کنترل هوشمند و خودکار زیرسطحی بایستی از قبل رفتار دینامیکی وسیله مشخص باشد تا بتوان سیستم کنترل خودکار وسیله را بصورت مناسبی طراحی کرد.

با تحلیل نتایج بدست آمده می‌توان گفت که نرم‌افزار شبیه‌ساز حرکات، رفتار دینامیکی زیرسطحی‌های با فرم بدنه کروزینگ را با دقت مناسبی شبیه‌سازی می‌کند و بنابراین می‌توان از این نرم‌افزار در مرحله طراحی برای

با توجه به نمودار نتایج می‌توان گفت با افزایش زاویه سکان اختلاف نتایج تست تجربی و شبیه‌سازی افزایش یافته است، که این اختلاف ناشی از خطای وسایل اندازه‌گیری و همچنین خطای انسانی در هنگام آزمایش است. علاوه بر این، دقیق نبودن ضرایب هیدرودینامیکی که در نرم‌افزار تخمین زده شده‌اند نیز می‌تواند باعث بوجود آمدن اختلاف در نتایج باشد.

برای ارزیابی قابلیت توقف زیرسطحی SUT-2 و بررسی رفتار دینامیکی و پایداری آن، تست توقف نیز انجام شده است. بیشترین و معمولترین این تست، آزمایش توقف با ماکزیمم سرعت رو به جلو می‌باشد. توقف ناگهانی با بیشترین سرعت رو به جلو بطور ساده با عوض کردن جهت حرکت موتور انجام می‌شود. بسیاری از زیرسطحی‌ها در طول مانور توقف ناگهانی غیر قابل کنترل هستند.

تست بدین صورت انجام می‌گیرد که ابتدا زیرسطحی با دور 1400 rpm شروع به حرکت می‌کند، بعد از گذشت ۲۰ ثانیه و رسیدن به سرعت اشباع ثابت جهت چرخش موتور به طور ناگهانی عوض می‌شود. تست تا زمانی که زیرسطحی بطور کامل متوقف شود ادامه می‌یابد. نمودار شکل ۱۶ مقایسه بین نتیجه تست تجربی و شبیه‌سازی تست توقف را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشخص است که در شبیه‌سازی بعد از مدت ۱۵ ثانیه زیرسطحی به سرعت $1/3$ متر بر ثانیه رسیده است و با تغییر جهت چرخش موتور، زیرسطحی در مدت زمان ۴ ثانیه متوقف می‌شود. نتیجه تست تجربی بدین صورت است که زیرسطحی بعد از مدت زمان ۱۵ ثانیه به سرعت $1/2$ رسیده است و بعد از تغییر جهت دور موتور در مدت زمان ۵ ثانیه متوقف می‌شود. نمودار تست تجربی با فرض خطی بودن تغییرات سرعت در هنگام توقف رسم شده است که در واقعیت این‌گونه نیست. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی تطابق مناسبی دارد و رفتار دینامیکی زیرسطحی را با تقریب خوبی پیش‌بینی می‌کند.

مرکز شناوری	\overline{BG}_z	
وزن واقعی وسیله	N	W
نیروی وارد بر وسیله در حرکت شتاب‌دار	N	F_u
نیروی وارد بر وسیله در حرکت پایا	N	F_s
مؤلفه‌های شتاب خطی وسیله	$\frac{m}{s^2}$	w, v, u
ضرایب میرایی هیدرودینامیکی، به عنوان مثال $X_{u u}$ میرایی در جهت x به دلیل حرکت در جهت x با سرعت ثابت u است.	kg	$X_{u u}, X_{uv}, X_{uw}, X_{v v}, X_{w w}, Y_{uv}, Y_{v v}, Z_{uv}, Z_{w w}$
سطح مقطع عرضی وسیله، سطح رو به جریان	m^2	A
زاویه حمله	rad	α
ضرایب رگرسیون مرتبه دو ضریب درگ بر حسب زاویه حمله	-	a, b, c
ضریب درگ در حرکت عرضی	-	$(C_D)_{Transverse}$
ضریب لیفت در حرکت عرضی	-	$(C_L)_{Transverse}$
سطح رو به جریان در حرکت عرضی	m^2	$A_{Transverse}$

۸- مراجع

- 1-Donald P. Brutzman., "A Virtual World for an Autonomous Underwater Vehicle", chapter2, Naval Postgraduate School (NPS), Monterey California, December 1994.
- 2-Healey, Anthony J., "Dynamics of Marine Vehicle", Naval Postgraduate School, Monterey California, unpublished course notes 1993.
- 3-Yuh, J., "Modeling and Control of Underwater Robotic Vehicles", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 20 no. 6, 1990, pp. 1475-1483.
- 4-Anthony F. Molland, "The Maritime Engineering Reference Book", Elsevier Ltd, 2008.

پیش‌بینی مانور و تعیین رفتار دینامیکی این نوع زیرسطحی‌ها استفاده نمود. نتایج تست تجربی زیرسطحی SUT-2 بیانگر رفتار دینامیکی پایدار و مناسب این زیرسطحی است.

فهرست علائم و اختصارات

علامت	واحد	تعریف
Fn	-	عدد فرود
L	m	طول وسیله
D	m	قطر وسیله
Fn_{∇}	-	عدد فرود حجمی
∇	m^3	حجم وسیله (جابجایی)
ν	$\frac{m^2}{s}$	لزجت سینماتیکی
σ	-	عدد کایتاسیون
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	چگالی
γ	$\frac{kg}{s^2}$	کشش سطحی
X, Y, Z	N	مؤلفه نیرو در راستای محور محلی x, y, z
K, M, N	$N - m$	مؤلفه ممان حول محور محلی x, y, z
u, v, w	$\frac{m}{s}$	مؤلفه سرعت در راستای محور محلی x, y, z
p, q, r	$\frac{rad}{s}$	مؤلفه سرعت دورانی حول محور x, y, z محلی
x, y, z	m	مکان‌های اویلری
ψ, θ, ϕ	rad	زوایای اویلری
m	kg	جرم واقعی وسیله
$I_x, I_y, I_z, I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}$	$kg - m^2$	ممان‌های اینرسی
X_u, Y_v, Z_w	kg	ضرایب جرم افزوده، به عنوان مثال X_u جرم افزوده در راستای محور x به دلیل شتاب در راستای محور x یعنی u است.
K_p, M_q, N_r	kg/m	ضرایب میرایی هیدرودینامیکی، به عنوان مثال X_d میرایی در جهت x است.
$X_d, Y_d, Z_d, K_d, M_d, N_d$	N	ضرایب میرایی هیدرودینامیکی، به عنوان مثال X_d میرایی در جهت x است.
$\overline{BG}_y, \overline{BG}_x$	m	موقعیت مرکز جرم نسبت به

- 10-T.Sarkar, P.G. Sayer, and S.M. Fraser, "A Study of Autonomous Underwater Vehicle Hull Forms Using Computational Fluid Dynamics", International Journal For Numerical Methods in Fluids, 1997, pp.1301-1313.
- ۱۱- بهنام صادقزاده پراپری، حمید مهدیقلی، محمدسعید سیف، "مدل‌سازی عددی جریان اطراف بدنه AUV و ارزیابی نیروهای هیدرودینامیکی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، آذر ۱۳۸۸.
- ۱۲- مسعود رحیمیان، محمدسعید سیف، حسن صیادی، "شبه‌سازی دینامیکی متحرک‌های زیرسطحی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، دی ۱۳۸۸.
- 13-Jun, B.-H., et al, "Development of the AUV 'ISiMI' and a free running test in an Ocean Engineering Basin", Elsevier Ltd , International Journal of research and development in Ocean Engineering 2008.
- ۵- بهنام صادقزاده، مسعود رحیمیان، محمد سعید سیف، "طراحی زیرسطحی هوشمند"، یازدهمین همایش صنایع دریایی، جزیره کیش، ۱۳۸۸.
- 6-Lambert, J., "Computational Methods in Ordinary Differential Equations", Cambridge University Press, New York: Wiley. 1973
- 7-Fossen, Thor I., "Guidance and Control of Ocean Vehicles", John Wiley & Sons, Chichester England, 1994.
- 8-Prestero, T., "Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle", Masters Thesis, University of California at Davis, 2001
- 9-E.A. de Barros , A. Pascoal , E. de Sa, "Investigation of a method for predicting AUV derivatives", Ocean Engineering 35 - 1627-1636, 2008.

¹ Autonomous Underwater Vehicle

² Healey

³ Yuh

⁴ Fossen

⁵ Nonlinear Ordinary Differential Equation

⁶ Center of Bouyancy

⁷ Matlab

⁸ System identification and parameter estimation