



## تجهیز یک شناور زیر سطحی هوشمند نوع هاورینگ به مخازن بالاست و بررسی اثر آن بر درجات آزادی

عبداله کریمی<sup>1</sup>، رضا حسنزاده قاسمی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار  
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار  
\*سبزواری، صندوق پستی 397، r.hasanzadeh@hsu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 10 فروردین 1396  
پذیرش: 16 خرداد 1396  
ارائه در سایت: 13 مرداد 1396

کلید واژگان:

شناورهای زیرسطحی هوشمند نوع هاورینگ  
مدل سازی دینامیکی  
مخازن بالاست

### چکیده

شناورهای زیرسطحی هوشمند نوع هاورینگ، با توجه به قابلیت‌ها و ویژگی‌های منحصر به فردشان، امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های این نوع شناورها نسبت به سایر ربات‌های زیر سطحی هوشمند، قابلیت مانور و کنترل پذیری مناسب آن‌هاست. جهت افزایش پایداری و کنترل پذیری یک ربات هوشمند زیرسطحی نوع هاورینگ، مخازن بالاست، به عنوان یک ابزار کنترلی متفاوت مورد استفاده قرار گرفته است. پیش از این استفاده از مخازن بالاست برای شناورهای هوشمند زیرسطحی نوع هاورینگ مرسوم نبوده است. در این مقاله یک شناور زیرسطحی جدید ارائه شده که دارای سه مخزن بالاست و سه تراستر است که نسبت به نمونه اصلی تراسترهای کمتری دارد. در ادامه مدل سازی این شناور زیرسطحی جدید و کنترل آن مسیرهای مشخص مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد مجهز کردن شناور زیرسطحی نوع هاورینگ به مخازن بالاست می‌تواند درجات آزادی هیو و پیچ را قابل دسترس کند و ربات را از استفاده از تراستر برای این درجات آزادی بی‌نیاز کند.

## Equipping of a Hovering Type Autonomous Underwater Vehicle with Ballast Tanks and its effect on Degrees of Freedom

Abdollah Karimi<sup>1</sup>, Reza Hasanzadeh Ghasemi<sup>1\*</sup>

1- Department of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.  
\*P.O.B. 397, Sabzevar, Iran, r.hasanzadeh@hsu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 30 March 2017  
Accepted 06 June 2017  
Available Online 04 August 2017

#### Keywords:

Hovering Type Autonomous Underwater Vehicle  
Dynamic modeling  
Ballast tank

### ABSTRACT

Hovering type autonomous underwater vehicles (HAUV's) are quite remarkable due to their unique capabilities and features. Appropriate maneuverability and controllability is the most important feature for a HAUV that make it better than other AUV's. In order to increase stability and controllability of robot, the ballast tank is applied for a HAUV. Use of ballast tank in HAUV was not common before. In this paper a new underwater vehicle is presented, including three ballast tanks and three thrusters. In this underwater vehicle, the number of thrusters is less than the original robot. In this paper, dynamics modeling and tracking control of this new underwater vehicle is investigated. The results show that the heave and pitch DOF's can be reached by using the ballast tanks and it is not necessary to use extra thrusters for these degrees of freedoms.

### 1- مقدمه

ابعاد نظامی و دفاعی قلمرو زیر دریا به عنوان یک مکان استراتژیک در تأمین امنیت پایدار محسوب می‌شود. در این راستا فناوری‌های پیشرفته زیر دریا مانند استفاده از شناورهای زیرسطحی بدون سرنشین که سبب حذف محدودیت‌های انسانی در زیر دریاست نقش کلیدی در این صنعت ایفا می‌کند. در سال‌های اخیر شناورهای زیرسطحی بدون سرنشین خود کنترل جایگاه خود را به عنوان مهم‌ترین ابزار جستجو و کشف در اعماق دریاها بیش از گذشته نشان داده است، به طوری که امروزه مراکز صنعتی و تحقیقاتی دنیا در زمینه هیدرودینامیک نگاه ممتازی به طراحی، تولید و توسعه شناورهای زیرسطحی خودکنترل دارند.

در حالی که بیش از 70% از سطح زمین توسط آب پوشیده شده و این سطح معادل بیش از 10 برابر سطح ماه است، امروزه تنها کمتر از 10% اقیانوس‌ها و دریاها مورد جستجو قرار گرفته است. در دهه‌های اخیر با رشد روز افزون جمعیت نیاز به منابع جدید انرژی بیش از پیش احساس می‌شود و این در حالی است که دریاها سرشار از منابع انرژی و معدنی است. اکنون سرمایه‌گذاری‌های گسترده در صنایع دریایی این صنعت را به عنوان صنایع پیشرو در توسعه اقتصادی بسیاری از کشورها تبدیل کرده، همچنین تنوع فعالیت‌های زیر سطحی در بعد صنعت مواردی نظیر نصب تأسیسات، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری تجهیزات زیر سطحی را در بر گرفته و از نظر

Please cite this article using:

A. Karimi, R. Hasanzadeh Ghasemi, Equipping of a Hovering Type Autonomous Underwater Vehicle with Ballast Tanks and its effect on Degrees of Freedom, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 397-404, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

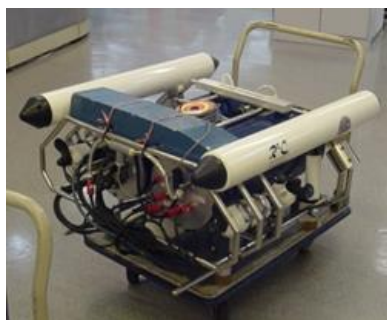


Fig. 2 RRC II underwater vehicle

شکل 2 شناور زیر سطحی RRC II

مشاهده هستند، در نظر گرفته شده‌اند. به طوری که مخازن اصلی ربات را به دو بخش تقسیم کرده‌ایم و دو نیمه جلویی مخازن 1 و 2 است و دو نیمه انتهایی با هم مخزن 3 را تشکیل می‌دهند که می‌توانند با یک لوله یا شلنگ منعطف به یکدیگر متصل شوند. جای‌گیری و نام‌گذاری نیز مخازن در شکل 3 قابل مشاهده است.

پیش‌بینی می‌شود با این تعداد و چینش مخازن ربات قادر به تغییر عمق و پیچ زدن صرفاً با استفاده از مخازن باشد. البته دستیابی به درجات آزادی یاد شده با دو مخزن هم ممکن است، اما همان طور که در ادامه بحث خواهد شد درجه آزادی رول برای این ربات خود پایدار است و در صورت نیاز به کنترل درجه آزادی پیچ حتماً باید حداقل از سه مخزن استفاده کرد. پس در این‌جا برای داشتن مدل کامل‌تر از سه مخزن بالاست بهره گرفته شده است. ساختار داخلی مخازن برای جلوگیری از تلاطم و همچنین سهولت در یافتن موقعیت مرکز جرم در هر لحظه به صورت پیوسته فرض شده که شماتیکی از آن در شکل 4 قابل مشاهده است.

نیروها، سرعت‌ها و موقعیت ربات طبق قرارداد براساس جدول 1 خواهد بود.

از آن جایی که جرم خشک سازه و متعلقات ربات برابر 115 کیلوگرم است، مخازن بالاست به گونه‌ای طراحی شده‌اند که اختلاف نیروی وزن و بویانسی را

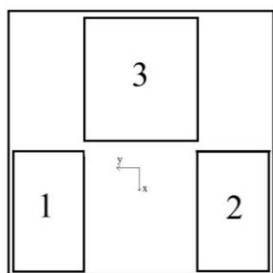


Fig. 3 The naming and placement of ballast tank

شکل 3 قرارگیری و نام‌گذاری مخازن

جدول 1 نام‌گذاری متغیرها

Table 1 Variables name			
درجه آزادی	تغییر مکان / زوایای اولر	سرعت خطی / زوایای	نیرو / گشتاور
سرج	$x$	$v$	$X$
اسوی	$y$	$u$	$Y$
هیو	$z$	$w$	$Z$
رول	$\phi$	$p$	$K$
پیچ	$\theta$	$q$	$M$
یاء	$\psi$	$r$	$N$

یک شناور زیر سطحی هوشمند کارآمد باید قادر باشد در کمترین زمان ممکن مانور مورد نظر را انجام دهد و این امر به تجهیزات قدرتمند برای اعمال نیرو به شناور نیاز دارد و همچنین مستلزم وجود مدل دینامیکی نسبتاً دقیق و کنترلر مناسب است. در این مقاله برای بهبود کارایی تجهیزات و کمتر کردن تعداد تراسترها و دستیابی به شناوری چالاک با قابلیت مانور بالا از مخازن بالاست استفاده شده است. پیش از این استفاده از این تجهیزات برای شناورهای هاورینگ مرسوم نبوده است.

روش‌های کنترلی متنوعی برای شناورهای زیر سطحی مورد استفاده قرار گرفته است. مرسوم‌ترین روش استفاده از کنترلر PID روی است. از جمله استفاده‌کنندگان و پیشگامان در زمینه کنترل PID روی شناور زیر سطحی هوشمند می‌توان به جالوینگ [11]، پرسترو [2]، پیو [3] و چوی [4] اشاره کرد. کیم و همکاران نیز در سال‌های اخیر این کنترلر را بر یک شناور هوشمند هاورینگ اعمال کرده‌اند [5]. اثر تأخیر زمانی برای این کنترلر بر یک شناور نوع هاورینگ توسط کیم و همکاران اعمال شده است [6]. کدخدایی و حسن‌زاده‌قاسمی کنترلر PD را بر یک شناور هوشمند هاورینگ با بردار رانش متغیر اعمال کرده‌اند [7]. دیگر روش‌های کنترلی نیز در مقالات محققین به کار برده شده است که به عنوان نمونه می‌توان به استفاده از روش کنترل فیدبک حالت اشاره کرد [8]. در زمینه کنترلر شناورهای زیر سطحی هوشمند هاورینگ داری مخزن بالاست نیز پیش از این کریمی و حسن‌زاده‌قاسمی کنترل عمق شناور را با مخزن بالاست انجام داده‌اند [9]. پیش از این استفاده از مخازن بالاست در زیردریایی‌های حامل انسان بسیار رایج بوده و معمولاً نحوه قرارگیری به فرم شکل 1 است. در شناورهای زیر سطحی هوشمند نوع اژدرگون نیز پیش از این در مواردی از این ساز و کار بهره گرفته شده است. ریدل و همکاران در شناورهای هوشمند نوع اژدرگون از مخازن بالاست استفاده کرده‌اند [10]. پراسد و همکاران یک ربات زیر سطحی هوشمند کروی با مخازن بالاست طراحی کرده‌اند [11].

در این مقاله شناور RRC II انتخاب شده است که مانند شناور نسل پیشین یعنی RRC I توسط مرکز تحقیقات رباتیک دانشگاه نایانگ طراحی و ساخته شده است [12]. این شناور در واقع به منظور بازرسی بدنه کشتی طراحی و ساخته شده که با اعمال تغییراتی در زمینه‌های دیگری نیز قابل استفاده خواهد بود و این ربات در شکل 2 قابل مشاهده است.

2- مدل‌سازی

ربات RRCII دارای سازه‌ای تقریباً متقارن و مجهز به 4 تراستر که ساختار اصلی این ربات فاقد مخزن بالاست است. برای طراحی مخزن بالاست برای ربات و به جهت عدم تغییر زیاد ضرایب هیدرو دینامیک و سایر ثوابت مؤثر در روابط حرکت، دو مخزن از مخازن در نظر گرفته شده در بالای ربات و جایگزین مخازن ایجاد کننده شناوری که به رنگ سفید در شکل 2 قابل

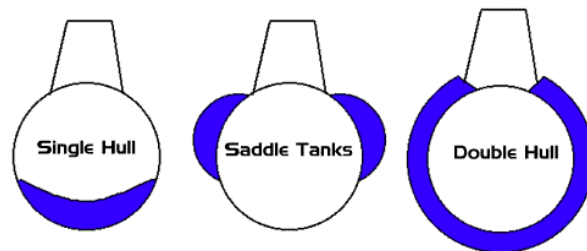


Fig. 1 Ballast tank's placement in submarines

شکل 1 شیوه قرارگیری مخازن بالاست در زیردریایی‌ها

ماتریس جرم افزوده نیز در رابطه (3) آمده است.

$$M_{ADD} = - \begin{pmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{pmatrix} \quad (3)$$

از عناصر غیرقطری ماتریس جرم افزوده به دلیل مقدار کم آن‌ها معمولاً در روابط صرف نظر می‌شود، در این‌جا نیز از ترم‌های غیرقطری ماتریس جرم افزوده صرف نظر شده است [19].

ماتریس کریولیس در روابط (4) آورده شده است.

$$C_{RB}(v) = \begin{pmatrix} 0_{3 \times 3} & C_{12}(v) \\ -C_{12}^T(v) & C_{22}(v) \end{pmatrix}$$

$$c_{12}(v) = m \begin{pmatrix} (y_G q + z_G r) & -(x_G q - w) & -(x_G r + v) \\ -(y_G q + w) & (z_G r + x_G p) & -(y_G r - u) \\ -(z_G p - v) & -(z_G q + u) & (x_G p + y_G q) \end{pmatrix}$$

$$C_{22}(v) = \begin{pmatrix} 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_z r & I_{yz}r + I_{xy}p - I_y q \\ 0 & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_x p \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

ماتریس کریولیس جرم افزوده به صورت رابطه (5) است.

$$C_{ADD}(v) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} a_1 = X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r \\ a_2 = Y_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r \\ a_3 = Z_{\dot{u}}u + Z_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r \\ b_1 = K_{\dot{u}}u + K_{\dot{v}}v + K_{\dot{w}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r \\ b_2 = M_{\dot{u}}u + M_{\dot{v}}v + M_{\dot{w}}w + M_{\dot{p}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r \\ b_3 = N_{\dot{u}}u + N_{\dot{v}}v + N_{\dot{w}}w + N_{\dot{p}}p + N_{\dot{q}}q + N_{\dot{r}}r \end{cases} \quad (5)$$

ماتریس میرایی هیدرودینامیکی طبق رابطه (6) قابل تعریف است.

$$D(v) = -diag\{X_u + X_{u|u}|u|, Y_v + Y_{v|v}|v|, Z_w + Z_{w|w}|w|, K_p + K_{p|p}|p|, M_q + M_{q|q}|q|, N_r + N_{r|r}|r|\} \quad (6)$$

ماتریس نیروی وزن و شناوری مانند رابطه (7) خواهد بود.

$$G(\eta) = \begin{pmatrix} (W - B) s \theta \\ -(W - B) c \theta s \varphi \\ -(W - B) c \theta c \varphi \\ -(y_G W - y_B B) c \theta c \varphi + (z_G W - z_B B) c \theta s \varphi \\ (z_G W - z_B B) s \theta + (x_G W - x_B B) c \theta c \varphi \\ -(x_G W - x_B B) c \theta s \varphi - (y_G W - y_B B) s \theta \end{pmatrix} \quad (7)$$

نیروی کنترلی  $\tau_f$  که حاصل از تراسترهاست مطابق رابطه (8) خواهد بود.

$$\tau_f = \begin{bmatrix} T1 + T2 \\ T3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.4(T1 - T2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

برای اعمال اثر مخازن بر روابط مربوط به شناور از دو دیدگاه می‌توان وارد شد؛ نخست این‌که افزودن مخزن به ربات، سیستم را به یک سیستم بویانسی

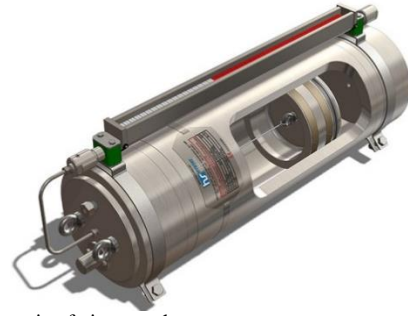


Fig. 4 Schematic of piston tank

شکل 4 شماتیک مخزن پیستونی

در حالت نیمه پر صفر کنند. از این‌رو ربات قادر خواهد بود تغییر مکان‌های هیو و پیچ را در جهت مثبت و منفی فقط با تغییر در جرم مخازن انجام دهد. با در نظر گرفتن سه تراستر برای ربات درجات آزادی اسوی، سرچ و یاو نیز قابل دستیابی خواهند بود؛ دو تراستر در انتهای ربات قرار داده شده که حرکت رو به جلو و درجه آزادی یاو را قابل دستیابی خواهند کرد. درجه آزادی اسوی نیز با تراستر سوم که در راستای مرکز جرم و زیر ربات فرض شده صورت می‌گیرد. تراسترهای در نظر گرفته شده ثابت است و بردار نیروی حاصل از آن‌ها راستای ثابتی نسبت به دستگاه بدنی ربات خواهد داشت. شماتیکی از چینش تراسترها در ربات شکل 5 قابل مشاهده است.

معادلات حرکت شناورهای زیرسطحی نخستین بار توسط هاگن در سال 1967 به دست آمد [13]. سپس توسط لوگان [14]، زاو و همکاران [15] و چن [16] نیز ارائه شد. بعدها این معادلات توسط مک اوین و استریتلین [17] و رزداک و ارشد [18] خطی‌سازی شد. در حالت کلی معادله حرکت شناور زیرسطحی خطی‌سازی شده به صورت رابطه (1) خواهد بود.

$$M\dot{v} + Cv + Dv + G\eta = \tau_f \quad (1)$$

در رابطه (1) M نشان‌دهنده مجموع ماتریس اینرسی و جرم افزوده، C ماتریس کریولیس، D ماتریس میرایی و G بیانگر اختلاف نیروی وزن و شناوری است. در سمت دیگر  $\tau_f$  نماینده نیروهای خارجی وارد بر ربات که در این‌جا نیرو سه تراستر در نظر گرفته شده برای ربات است. بخش مربوط به اینرسی ماتریس M طبق رابطه (2) تعریف می‌شود.

$$M_{RB} = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{xy} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{xz} & -I_{yz} & I_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

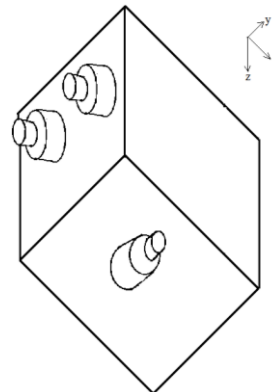


Fig. 5 The placement of the thrusters

شکل 5 محل قرارگیری تراسترها

جدول 2 جرم مخازن به منظور افزایش عمق

Table 2 Mass of ballast tanks in order to depth increasing

جرم	شماره مخزن
5	1
5	2
10	3

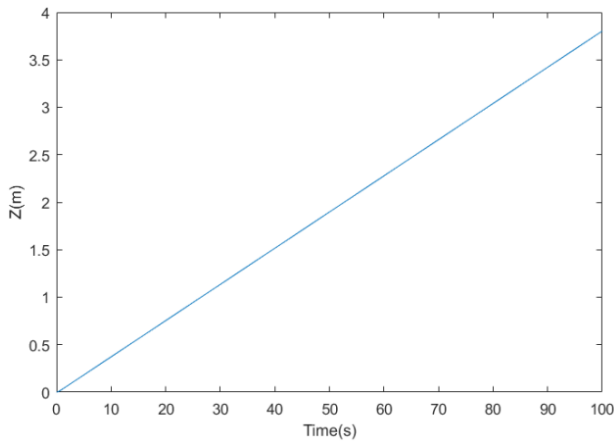


Fig. 6 Underwater depth with respect to time based on the table 2

شکل 6 تغییر عمق ربات بر حسب زمان براساس داده‌های جدول 2

درجه آزادی پیچ یکی دیگر از درجات آزادی قابل دستیابی توسط مخازن بالاست با چینش یادشده است که برای روشن شدن صحت عملکرد مخازن در دستیابی به این درجه آزادی جرم مخازن مطابق جدول 3 تنظیم شد و درجات آزادی بر حسب زمان در این حالت مطابق شکل 7 تغییر خواهد کرد. با توجه به شکل‌های 6 و 7 می‌توان اظهار داشت تعبیه کردن مخازن بالاست با چینش یادشده برای یک ربات زیرسطحی هوشمند نوع هاورینگ امکان دستیابی به درجات آزادی هیو و پیچ را امکان‌پذیر می‌کند و می‌تواند جایگزین تراسترهایی شود که برای رسیدن به این درجات آزادی طراحی شده‌اند.

درجه آزادی رول به دلیل بالاتر بودن محل مرکز شناوری از مرکز جرم در همه شرایط خودپایدار است و همچنین کنترل آن برای ربات مورد نظر اهمیتی ندارد. سایر درجات آزادی توسط تراسترها قابل دستیابی است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند. اکنون قصد داریم تا ربات مسیره‌های مشخصی را با تراستر طی کند و اثر مخازن را نیز هم‌زمان بر ربات اعمال کنیم. به عنوان نخستین آزمایش یک مسیر سینوسی روی محور X در نظر گرفته شده است در این حالت با افزایش جرم مخازن قصد افزایش عمق را نیز داریم. جرم مخازن در این حالت نیز مطابق جدول 2 تنظیم شده است. برای این شرایط نمودار X-Z مطابق شکل 8 به‌دست آمده و ربات مطابق شکل 9 مسیر از پیش تعیین شده را می‌پیماید، همچنین نیروی اعمالی از جانب دو تراستر انتهایی شناور مانند شکل 10 خواهد بود.

جدول 3 جرم مخازن به منظور پیچ زدن ربات

Table 3 Mass of ballast tanks in order to change of robot pitch angle

جرم	شماره مخزن
3	1
3	2
10	3

متغیر تبدیل می‌کند، دیدگاه دوم بررسی سیستم به صورت جرم متغیر است. البته نتیجه هر دو دیدگاه یکسان، اما در این‌جا سیستم از دیدگاه دوم یعنی جرم متغیر مورد بررسی قرار گرفته است.

عمده تأثیر جرم مخازن در روابط مربوط به ماتریس G است، ولی ممان‌های اینرسی شناور هم از تغییر جرم مخازن متأثر خواهند شد. برای محاسبه دقیق ممان‌های اینرسی ربات در هر لحظه با توجه به مشخص بودن محل مرکز جرم مخازن از قانون محوره‌های موازی استفاده شده است [20]. حال اگر چینش و نام‌گذاری مخازن مانند شکل (3) باشد. با علم بر این امر که مختصات مرکز جرم سازه بدون در نظر گرفتن جرم مخازن در (0 و 0) است، می‌توان ممان‌های اینرسی ربات را حول مرکز شناوری به‌دست آورد.

مختصات مرکز جرم مخازن 1 و 2 در (0.35- و y و x) قرار دارد. مقدار x برای این مخازن با توجه به جرم درونشان به شکل  $x = 0.02829m$  محاسبه خواهد شد.

مقدار x برای مخزن 3 منفی و دو برابر مقدار بالا خواهد بود و مرکز جرم مخزن سوم همواره بر روی محور x خواهد بود. مقدار y برای مخازن 1 و 2 به ترتیب 0.43- و 0.43 خواهد بود؛ بنابراین به عنوان نمونه  $I_{xy}$  از رابطه (9) محاسبه خواهد شد.

$$I_{xy} = I_{xy_f} - (m_1x_1 + m_2x_2)0.43 \quad (9)$$

در رابطه (9) عبارت  $I_{xy_f}$  نشان‌دهنده ممان اینرسی سازه و تجهیزات ربات بدون در نظر گرفتن جرم مخازن است.

به منظور بررسی اثر مخازن بر ماتریس G لازم است محل مرکز جرم ربات مشخص شود که بدین منظور از روابط (10, 11) استفاده شده است.

$$x_G = \frac{(m_1 + m_2)x_f + m_3x_3}{m} + \frac{m_3x_3}{m} \quad (10)$$

$$z_G = \frac{-m_t \times 0.35 + 115 \times 0.123}{m} \quad (11)$$

در روابط بالا m مجموع جرم مخازن و سازه،  $m_t$  بیانگر مجموع جرم آب درون مخازن و مقدار  $x_f$  نیز از رابطه (12) قابل محاسبه است.

$$x_f = \frac{x_1m_1 + x_2m_2}{m_2 + m_2} \quad (12)$$

### 3- کنترل

برای کنترل ربات مورد نظر از سه کنترلر مجزا برای هر یک از درجات آزادی قابل دستیابی با تراسترها استفاده شده است. با توجه به غیرخطی بودن سیستم و پرهیز از پیچیدگی‌های مربوط به خطی‌سازی مدل از یک کنترلر PID مجزا برای هر یک از درجات آزادی استفاده شده است. با اعمال اثر کنترلر بر تراسترها، نیروی تراسترها می‌تواند مقداری بین 70 و -70 نیوتون اختیار کند. برای تنظیم جرم مخازن کنترلر اعمال نشده و به صورت حلقه باز جرم مخازن تغییر پیدا می‌کند.

### 4- نتایج و بحث

ابتدا برای بررسی صحت مدل‌سازی و اثر مخازن بر حرکت ربات، خروجی‌های حلقه بازی از مدل با تغییر جرم مخازن گرفته شده است. بدین منظور پیش از هر چیز با افزایش جرم آب درون مخازن نسبت به حالت تعادل سعی داریم تا عمق را افزایش دهیم؛ بنابراین توزیع جرم در مخازن را مطابق جدول 2 تنظیم می‌کنیم. نمودار مربوط به تغییر عمق بر حسب زمان برای این حالت در شکل 6 قابل مشاهده است. سایر درجات آزادی در این حالت بدون تغییر و در مقدار صفر باقی می‌ماند.

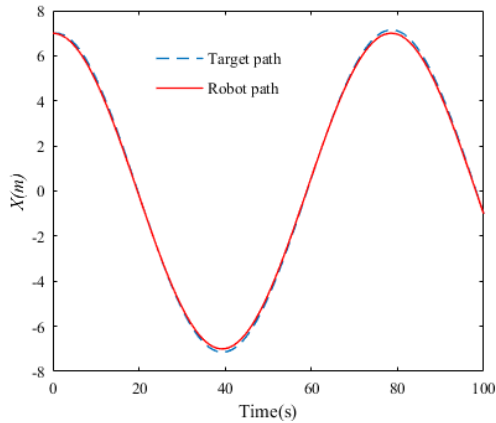


Fig. 9 Trajectory tracking by the robot on X axis

شکل 9 دنبال کردن مسیر روی محور X توسط ربات

تغییرات درجات آزادی برحسب زمان نیز به صورت جداگانه در شکل 11 قابل مشاهده است.

اکنون انجام حرکت سینوسی با تغییر همزمان عمق در محور Y مورد نظر است که نمودار Y-Z مربوط به این شرایط در شکل 12 قابل مشاهده است.

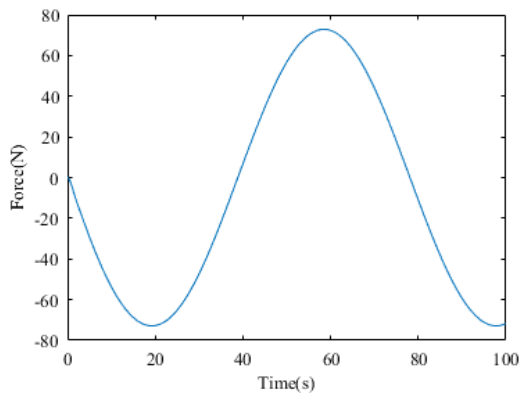


Fig. 10 Thruster force with respect to time

شکل 10 تغییر نیروی تراستر برحسب زمان

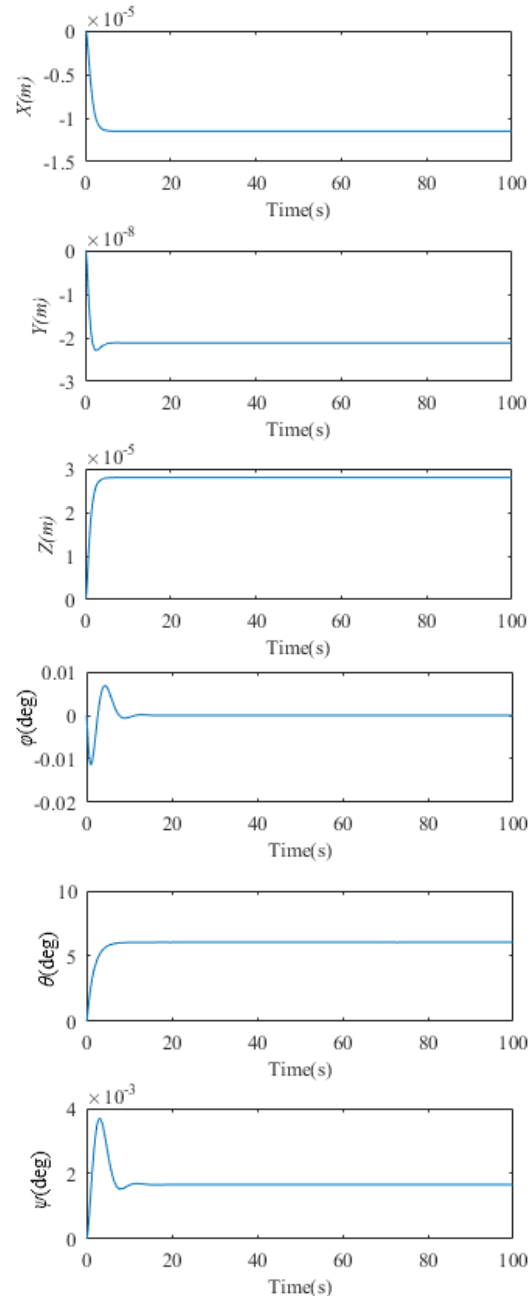
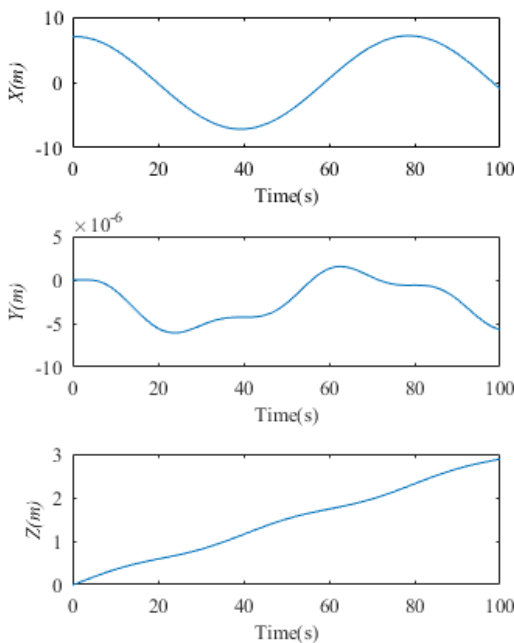


Fig. 7 The plot of six degrees of freedom with respect to time based on the table 3

شکل 7 تغییرات درجات آزادی برحسب زمان براساس داده‌های جدول 3

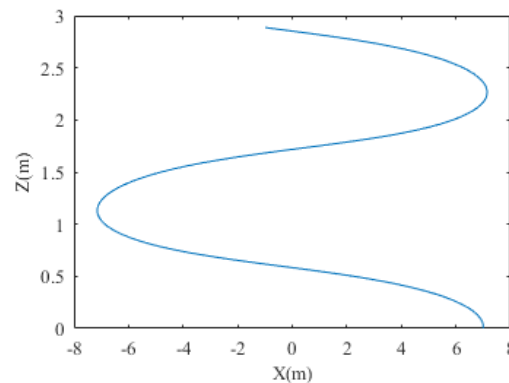
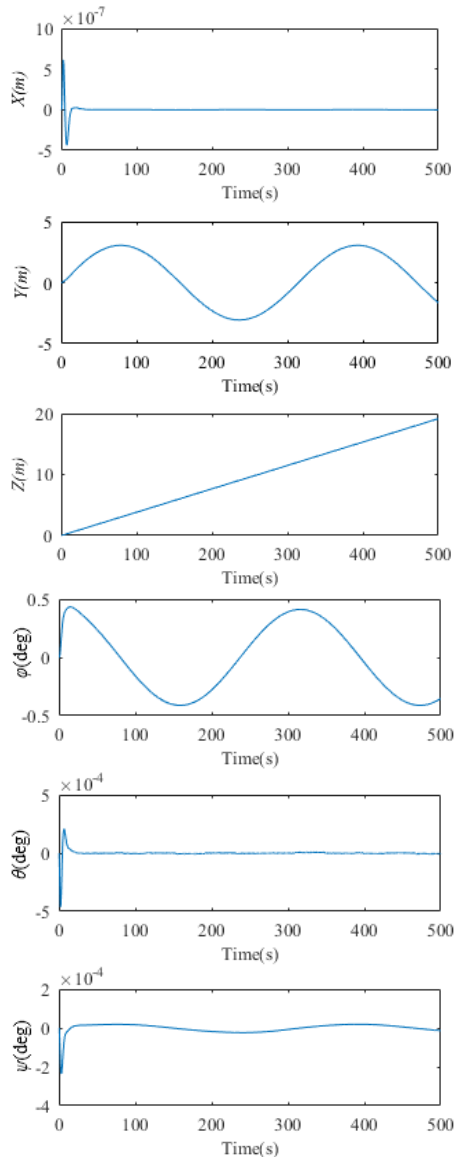


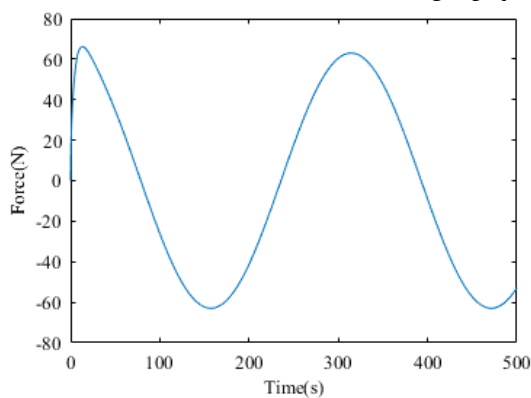
Fig. 8 X-Z graph while increasing the depth with sinusoidal path

شکل 8 نمودار X-Z با مسیر سینوسی حین افزایش عمق



**Fig. 13** The plot of six degrees of freedom with respect to time for sinusoidal path on Y axis and increasing the robot depth

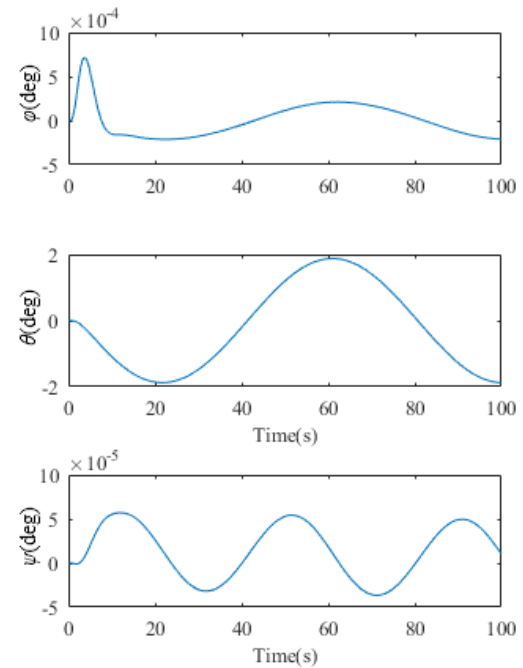
شکل 13 تغییرات درجات آزادی برحسب زمان برای مسیر سینوسی روی محور Y و با هدف افزایش عمق



**Fig. 14** Thruster force with respect to time for sinusoidal path on Y axis

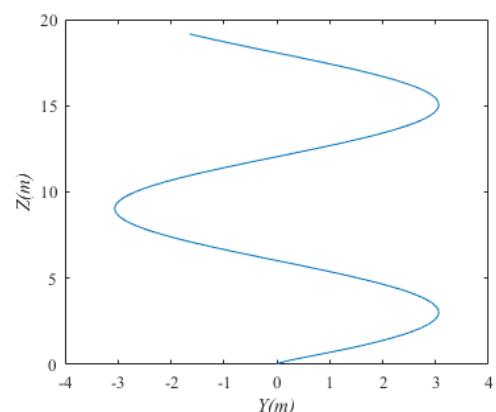
شکل 14 تغییر نیروی تراستر برحسب زمان با مسیر سینوسی روی محور Y

است. در این شرایط تغییرات درجات آزادی برحسب زمان مطابق شکل 17 خواهد بود.



**Fig. 11** The plot of six degrees of freedom with respect to time for sinusoidal path on X axis and increasing of robot depth

شکل 11 تغییرات درجات آزادی برحسب زمان برای مسیر سینوسی روی محور X و با هدف افزایش عمق



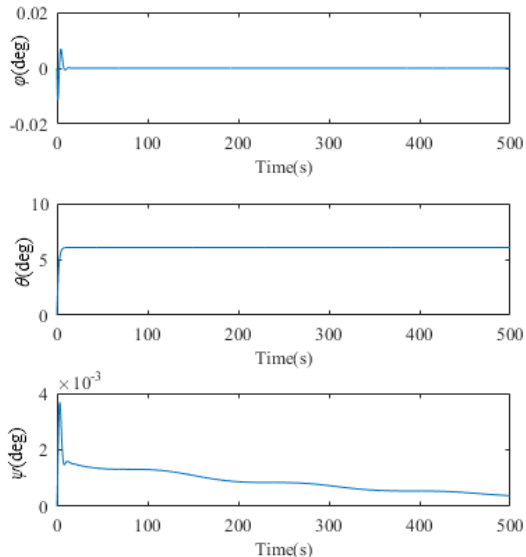
**Fig. 12** Y-Z graph while increasing the depth with sinusoidal path

شکل 12 نمودار Y-Z با مسیر سینوسی حین افزایش عمق

تغییرات مجزای درجات آزادی برحسب زمان نیز در شکل 13 آورده شده است. نیروی کنترلی تراستر سوم هم مطابق شکل 14 خواهد بود. در این شرایط شناور مطابق شکل 15 سعی دارد تا خود را در مسیر تعیین شده حفظ کند.

اکنون قصد داریم یکی از مانورهای بسیار مفید برای یک ربات زیرسطحی هوشمند را بررسی کنیم که شامل طی کردن یک مسیر دلخواه، در این جا همان حرکت سینوسی در نظر گرفته شده، روی محور Y و رسیدن به یک زاویه پیچ دلخواه و حفظ آن است. این حرکت را می توان به نوعی شبیه سازی عمل جوش کاری زیر آب دانست. برای انجام این حرکت جرم مخازن مطابق جدول 3 تنظیم شده است. برای دستیابی به این مهم، مشخصه های مکان شناور مانند شکل 16 برحسب زمان تغییر می کنند.

هدف بعدی کامل تر کردن حرکت ترکیبی پیشین و افزودن تغییر عمق به آن است؛ بنابراین برای دستیابی به ترکیبی از حرکات تغییر عمق، پیچ زدن و حرکت سینوسی روی محور Y جرم مخازن مطابق جدول 4 تنظیم شده



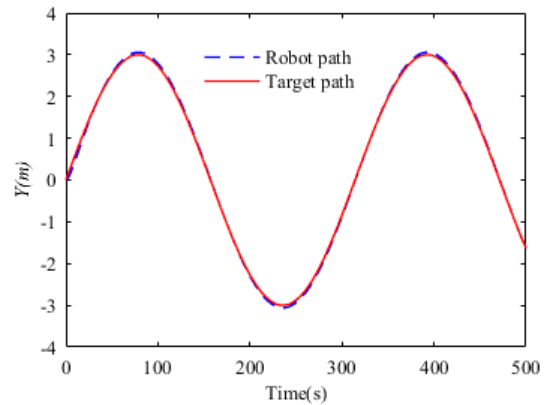
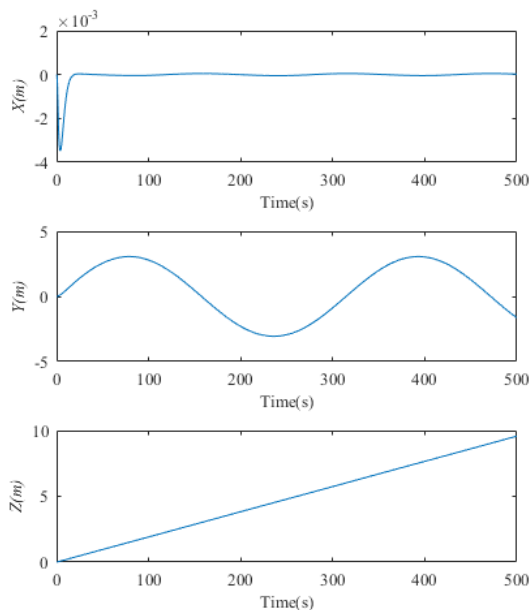
**Fig. 16** The plot of six degrees of freedom with respect to time for sinusoidal path on Y axis and changing the pitch angle

شکل 16 تغییرات درجات آزادی برحسب زمان برای مسیر سینوسی روی محور Y و با هدف پیچ زدن

بالاست برای اعمال نیرو به ربات استفاده شده، حداکثر 20% درصد از ظرفیت مخازن مورد استفاده قرار گرفته است؛ که این امر نشان دهنده قابلیت بالای مخازن در اعمال نیرو به شناور است که افزایش قدرت مانورپذیری و پایداری را به دنبال خواهد داشت.

کنترلر عملی برای تراسترها نیز عملکرد مناسب داشته و هرگز نیروی عملی به حداکثر مقدار نرسیده است که این امر میتواند برای کاهش مصرف انرژی در ربات بسیار مفید باشد. نکته جالب دیگر در این رابطه کاهش یکی از تراسترهای طراحی اصلی ربات است که با این حال ربات بخاطر وجود مخازن بالاست قادر است تا به 5 درجه آزادی مهم دست پیدا کند و درجه آزادی رول نیز خود پایدار است.

با این حال شاید بتوان جالبترین و مفیدترین جنبه استفاده از مخازن بالاست را هنگام استفاده ترکیبی از تراستر و مخازن مانند شکل‌های 16 و 17 مشاهده کرد. حداقل 3 تراستر فعال برای انجام چنین حرکاتی با تراستر



**Fig. 15** Trajectory tracking by the robot on Y axis

شکل 15 دنبال کردن مسیر روی محور Y توسط ربات

جدول 4 جرم مخازن با هدف افزایش عمق و پیچ زدن هم‌زمان ربات

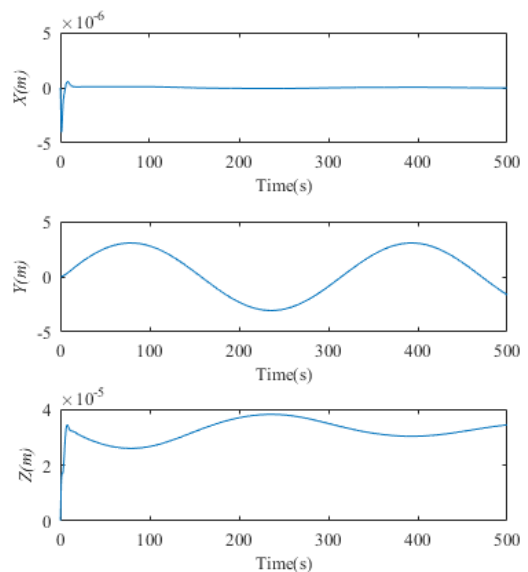
**Table 4** Mass of ballast tanks in order to change of robot pitch and increasing of robot depth

جرم مخزن	شماره مخزن
2	1
2	2
12	3

درجه آزادی یاء نیز توسط تراسترها قابل دستیابی است که مسیری سینوسی برای آن انتخاب شده و نتیجه تعقیب مسیر در شکل 18 قابل مشاهده است. در این حالت نیروی تراسترهای 1 و 2 برابر و خلاف جهت هم اعمال می‌شوند که تغییرات نیروی تراستر 1 برحسب زمان مطابق شکل 19 خواهد بود.

### 5- نتیجه گیری

با توجه به نتایج بخش پیشین این نکته قابل استنباط است که استفاده از سیستم مخازن بالاست برای یک ربات زیرسطحی هوشمند خواهد توانست در مواردی تعداد تراسترها را کاهش دهد و اثر مطلوبی بر حرکت ربات بگذارد. طراحی مخازن برای ربات RRC II طوری است که درجات آزادی در جهت منفی هم قابل دستیابی است که برای جلوگیری از اطاله مطلب نتایج این عملکرد ربات آورده نشده است، همچنین در تمامی حالت‌هایی که از مخازن



نیاز است، اما با وجود مخازن بالاست و یکبار تنظیم جرم مخازن ربات قادر خواهد بود که این حرکات را انجام دهد. این موضوع برای طراحی یک ربات زیرسطحی هوشمند که فاقد منبع انرژی خارجی است می‌تواند دغدغه طراح برای انرژی مصرفی را تا حدود زیادی مرتفع کند.

#### 6- مراجع

- [1] B. Jalving, The NDRE-AUV flight control system, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 19, No. 4, pp. 497-501, 1994.
- [2] T. Prester, Development of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle, *OCEANS, MTS/IEEE Conference*, Honolulu, HI, USA, Nov 5-8, 2001.
- [3] J. Pyo, H. G. Joe, J. H. Kim, A. Elibol, S. C. Yu, Development of hovering-type AUV cyclops for precision observation, *Oceans*, San Diego, CA, USA, Sept 23-27, 2013.
- [4] H. T. Choi, A. Hanai, S. K. Choi, J. Yuh, Development of an underwater robot, *IEEE/RSJ International Conference*, Las Vegas, NV, USA, Vol. 1, IEEE, pp. 836-841, 2003.
- [5] M. J. Kim, W. K. Baek, K. N. Ha, M. G. Joo, Way-point tracking for a hovering AUV by PID controller, *Control, Automation and Systems (ICCAS), 15th International Conference*, IEE, Oct 13-16, 2015.
- [6] J. Kim, H. Joe, S. C. Yu, J. S. Lee, M. Kim, Time-delay controller design for position control of autonomous underwater vehicle under disturbances, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 63, No. 2, pp. 1052-1061, 2016.
- [7] A. Kadkhodaei, R. H. Ghasemi, Inspection of undersea oil and gas pipelines by new variable thrust vector underwater robotic platform, *Marine Engineering*, Vol. 12, No. 24, pp. 127-133, 2017. (in Persian فارسی)
- [8] A. F. Sh, R. H. Ghasemi, Representation of an autonomous underwater vehicle and trajectory controller design for in-water ship hull inspection, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 10, 2015. (in Persian فارسی)
- [9] A. Karimi, R. H. Ghasemi, Depth control of a HAUV with ballast tank, *18th Marine Industries Conference*, Oct 18-21, 2016. (in Persian فارسی)
- [10] J. S. Riedel, A. J. Healey, D. B. Marco, B. Beyazay, Design and development of low cost variable buoyancy system for the soft grounding of autonomous underwater vehicles, *Defense Technical Information Center Document*, Washington, pp 1-13, 2005.
- [11] B. Prasad, A. Agrawal, V. Viswanathan, A. R. Chowdhury, R. Kumar, S. Panda, A visually guided spherical underwater robot, *Proceeding of IEEE*, Chennai, India, Feb 23-25, 2015.
- [12] M. W. S. Laua, E. Lowa, G. G. L. Seeta, *Dynamic Modelling and Cascaded Controller Design Of A Low-Speed Maneuvering ROV*, Chapter book, pp. 1-36, 2006.
- [13] M. Gertler, G. R. Hagen, *Standard equations of motion for submarine simulation*, DTIC Document, pp. 1-42, 1967.
- [14] C. L. Logan, A comparison between H-infinity/mu-synthesis control and sliding-mode control for robust control of a small autonomous underwater vehicle, *Autonomous Underwater Vehicle Technology Proceedings of the 1994 Symposium*, Cambridge, MA, USA, July 19-20, 1995.
- [15] X. Liang, J. Zhang, Y. Qin, H. Yang, Dynamic modeling and computer simulation for autonomous underwater vehicles with fins, *Computers*, Vol. 8, No. 4, pp. 1058-1064, 2013.
- [16] C. Yang, *Modular Modeling and Control for Autonomous Underwater Vehicle (AUV)*, PhD Thesis, National University of Singapore, 2008.
- [17] R. McEwen, K. Streitlien, Modeling and control of a variable-length auv, *Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST) Conference*, University of New Hampshire, Durham, Aug, 2001.
- [18] M. R. Arshad, M. Y. Radzak, Design and development of an autonomous underwater vehicle test-bed (USM-AUV I), *Control, Automation, Robotics and Vision Conference*, Kunming, China, Dec 6-9, 2004.
- [19] A. F. D'Souza, V. K. Garg, *Advanced Dynamics: Modeling and Analysis*, Prentice Hall, pp. 91-95, 1984.

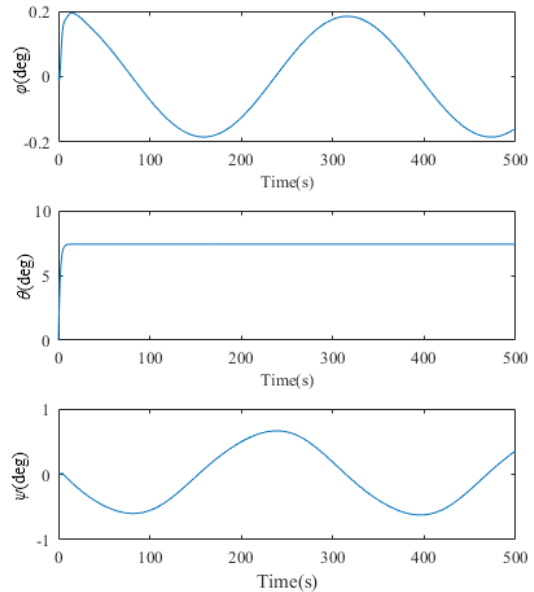


Fig. 17 The plot of six degrees of freedom with respect to time for sinusoidal path on Y axis and simultaneously increasing the robot depth and pitch

شکل 17 تغییرات درجات آزادی برحسب زمان برای مسیر سینوسی روی محور Y و با هدف پیچ زدن و افزایش هم‌زمان عمق

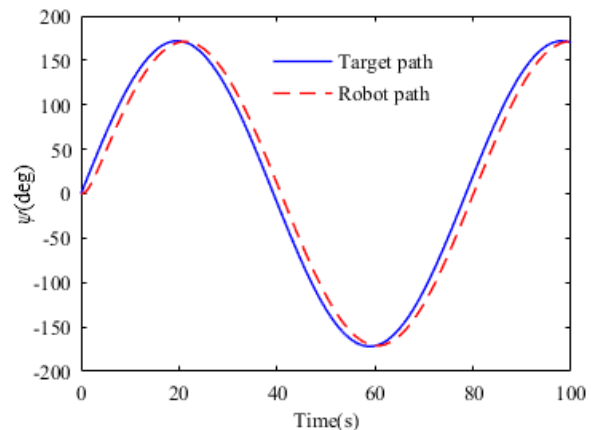


Fig. 18 Yaw trajectory tracking by the underwater robot

شکل 18 دنبال کردن مسیر برای یاء زدن توسط ربات

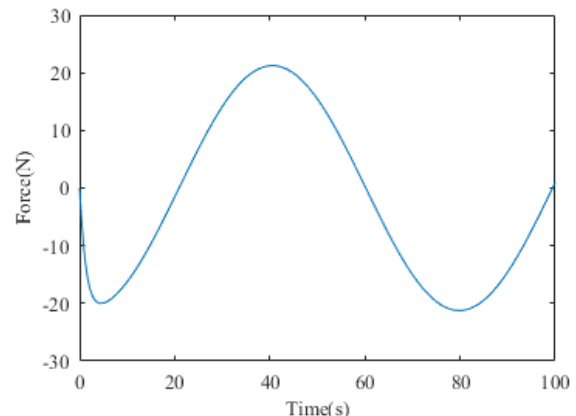


Fig. 19 Thruster 1 force with respect to time for sinusoidal yaw path

شکل 19 تغییر نیروی تراستر یک برحسب زمان با مسیر سینوسی یاء