

# استخراج ضرایب کنترلر PID برای زیرسطحی AUV با بهینه‌سازی

## فراجش و زمان فراجش

امین محمدزاده ثانی<sup>۱</sup>، سیدرضا عبداللهی<sup>۲</sup>، کاظم گیلک<sup>۳</sup>

۱- مربی گروه زیرسطحی دانشگاه علوم و فنون دریایی امام خمینه‌ای (مدظله‌العالی)، amin.mohammadzade2013@gmail.com

۲- مربی گروه زیرسطحی دانشگاه علوم و فنون دریایی امام خمینه‌ای (مدظله‌العالی)

۳- مربی گروه برق، دانشگاه علوم و فنون دریایی امام خمینه‌ای (مدظله‌العالی)

### چکیده:

در حرکت زیگزاگ سامانه‌های زیرسطحی که یکی از مهمترین حرکات مانور نیز به حساب می‌آید از کوپل حرکات سوای و یاو بهره می‌گیرند. طراحی یک سیستم کنترلی تعقیب<sup>۱</sup> که در آن فرکانس سوای بتواند فرکانس یاو را دنبال نماید می‌تواند یک کاندیدای مناسب جهت برآوردن مطلوب مساله باشد. در پژوهش حاضر، یک زیرسطحی هوشمند که در مراحل اولیه طراحی و ساخت بصورت رادیوکنترلی و صرفاً با سکان حرکات صفحه XY را انجام می‌داده مورد مطالعه قرار گرفته است. فاز ارتقای سامانه شامل طراحی یک سامانه کنترلی است که عملگرهای آن متشکل هستند از تراسترهای جلو و عقب<sup>۲</sup> جهت پیاده‌سازی حرکت سوای و دو سکان بالا و پایین جهت پیاده‌سازی حرکت یاو. مسیر طی شده در راستای طراحی سامانه کنترلی عبارتست از استخراج معادلات حرکت، استخراج توابع تبدیل مدار باز و مدار بسته، بررسی و تعیین معیارها و کران‌های پایداری. پس از تعیین اولیه کران‌های پایداری، جاگذاری این مقادیر در حلقه کنترلی منجر به آن گردید که در برخی محدوده‌ها، فراجش کم و زمان رسیدن به فراجش زیاد می‌شود و در برخی دیگر از محدوده‌ها عکس این حالت اتفاق می‌افتد. با سعی و خطا و اعمال نسبت مناسب دو فراجش متوالی، یک مصالحه مناسب بین فراجش و زمان رسیدن به فراجش ایجاد شده و کران‌های بهینه‌ی پایداری مشخص گردید.

### واژه‌های کلیدی:

زیرسطحی AUV، کنترلر PID، مانور زیگزاگ، تعقیب و تنظیم، فراجش، زمان فراجش

## Derivation of PID Controller Coefficients for an AUV System Using Overshoot and Peak Time Optimization

Amin Mohammadzadeh Sani<sup>1</sup>, Seyed Reza Abdullahi<sup>2</sup>, Kazem Gilak<sup>3</sup>

1- Imam Khamenei University of Marine Science and Technology, Faculty of Sub-Surface Group, amin.mohammadzade2013@gmail.com

2- Assistant Professor, Faculty of Sub-Surface Group, Imam Khamenei University of Marine Science and Technology

3- Assistant Professor, Faculty of Electrical Engineering, Imam Khamenei University of Marine Science and Technology

### Abstract

In the zigzag maneuver of underwater vehicles – which is considered one of the most critical maneuvering motions – the coupling between sway and yaw motions is utilized. Designing a pursuit control system where the sway frequency can track the yaw frequency may present a suitable candidate to optimally address the problem. In the present research, an intelligent underwater vehicle in its initial design and construction phases – which was initially radio-controlled and relied solely on rudders for XY-plane motions – has been studied. The system upgrade phase involves designing a control system whose actuators consist of forward and aft thrusters (to implement sway motion) and upper and lower rudders (to implement yaw motion). The developed approach for the control system design includes: Deriving motion equations, Extracting open-loop and closed-loop transfer functions, Evaluating and determining stability criteria and boundaries, after preliminary determination of stability boundaries, implementing these values in the control loop revealed that: In some ranges, low overshoot was achieved but with long settling time in other ranges, the opposite behavior occurred. Through trial and error and applying an appropriate ratio between two consecutive overshoots, an optimal compromise between overshoot and settling time was established, leading to the determination of optimized stability boundaries.

### Keywords

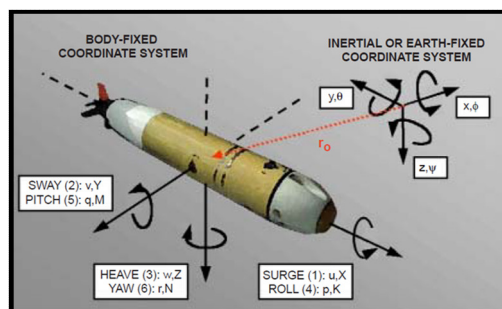
Autonomous Underwater Vehicle, PID Controller, Zigzag Maneuvering, Track and regulation, Overshoot and peak time.

<sup>1</sup> Track

<sup>2</sup> Bow and Aft Thruster

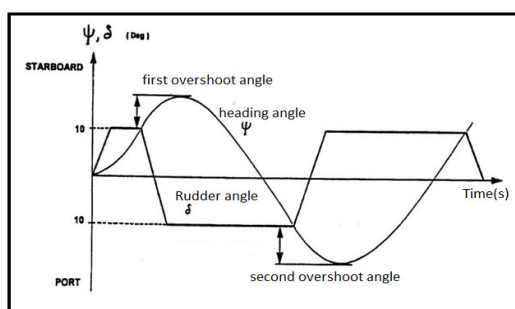
## ۱- مقدمه

تعدد درجات آزادی در زیرسطحی‌ها منجر شده تا کنترل آنها جزو پیچیده ترین سامانه های دریایی به حساب آید. سه درجه آزادی خطی و سه درجه آزادی دورانی هر یک دارای عملگری خاص جهت پیدایش می باشند. درجات آزادی زیرسطحی در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل ۱ - معرفی درجات آزادی زیرسطحی

هر سامانه به کمک این درجات آزادی می تواند تعدادی حرکت مانور داشته باشد. یکی از مانورهای مهم سامانه های زیرسطحی، حرکت زیگزاگ می باشد. در حرکت زیگزاگ زیرسطحی ها، همواره بین زاویه چرخش سکان و زاویه پیشروی زیرسطحی یک اختلاف فاز وجود دارد که به زاویه اورشوت<sup>۴</sup> معروف است. زاویه اورشوت کمتر به معنی پاسخ سریع سامانه به تغییرات سکان می باشد که مطلوب است [1]. شماتیک زوایای اورشوت اول و دوم در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل ۲- معرفی زوایای اورشوت اول و دوم

در زیرسطحی‌های بزرگ و با سرنشین، اختلاف زیاد زاویه اورشوت نمی تواند به عنوان یک چالش اساسی به شمار آید زیرا ناپور می تواند با مهارت خود تا حدودی از اختلاف زاویه چرخش سکان و زاویه پیشروی بکاهد اما این اختلاف در زیرسطحی‌های هوشمند و بدون سرنشین

چالش آفرین خواهد بود. به همین دلیل طراحان در سامانه های کوچک زیرسطحی، درجات آزادی را زیاد نموده و بر تعداد عملگرها می افزایند. به عنوان مثال در صفحه XY زیرسطحی‌های بزرگ صرفا سکان ها نقش آفرین بوده و حرکت یاو ایجاد می کنند اما در زیرسطحی‌های هوشمند، عملگرهای تراستر افقی نیز در دم و دماغه زیرسطحی اضافه شده و درجه آزادی سوای نیز به سایر درجات آزادی اضافه می گردد. در صفحه XZ نیز مشابه همین وضعیت وجود دارد به طوری که در زیرسطحی‌های بزرگ صرفا بالک ها درجه آزادی پیچ را تامین می کنند در حالی که در زیرسطحی‌های کوچک تراسترهای عمودی در دماغه و دم اضافه گشته و به سامانه، درجه آزادی هیو را می افزایند [2]. در کنترل زیرسطحی‌ها، دو مقوله تعقیب و تنظیم<sup>۵</sup> همواره در دستور کار قرار دارد. به عنوان مثال، ثابت کردن عمق روی یک مقدار مشخص در مقوله تنظیم گنجانده می شود و دنبال نمودن فرکانس حرکت یاو توسط حرکت سوای در مانور زیگزاگ جزو مقوله تعقیب به شمار می آید [3]. با این تعاریف، در ادامه تاریخچه مختصری در حوزه کنترل زیرسطحی ارائه می گردد.

وانگ و همکاران [4] در مقاله ای با عنوان تعیین کنترلر تطبیقی جهت دنبال نمودن مسیر وسیله نقلیه زیرآبی خودکار بر اساس روش آنتروپی بیشینه با بکار گیری الگوی یادگیری عمیق که از شاخه های یادگیری ماشین می باشد توانستند ضرایب  $k_p$ ,  $k_l$ ,  $k_d$  را به صورت لحظه ای تغییر و منطبق با شرایط کار سامانه نمایند و به یک تیونینگ موفق دست یابند. در این روش از هوش مصنوعی تقویتی بهره گرفته شد. در روش تقویتی بر خلاف روش های نظارتی که داده به اندازه کافی به کنترلر دستگاه خورانده میشود دیتا اولیه بسیار محدود است و در برخی مواقع سامانه در بدو حرکت فاقد دیتا میباشد و با شروع کار، لحظه به لحظه خود را با شرایط جدید وفق داده و داده های خود را تقویت می سازد. مک لین و همکاران [1] در مقالی با عنوان مدلسازی، شبیه سازی کنترلر مانور پذیری به دنبال کردن دو سناریو پرداختند. سناریو اول شامل: پیاده سازی یک الگوریتم حرکتی در یک لوپ بسته کنترلی بود. و سناریو دوم شامل: تعقیب خط اثر به وجود آمده در اثر الگوریتم حرکتی سناریو اول می باشد.

<sup>5</sup> Regulation

<sup>3</sup> Heading Angle

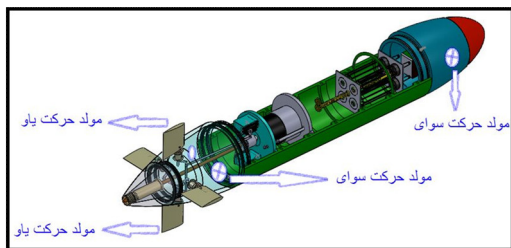
<sup>4</sup> Overshoot Angle

پژوهشگران در این تحقیق، به کمک کنترلر PID تطبیقی به این هدف نایل آمدند. این کنترلر شرایطی را مهیا می‌سازد که زیرسطحی بتواند خط اثرهای دو بعد و سه‌بعدی را به خوبی تعقیب نماید. در این پژوهش از دینامیک سیالات محاسباتی جهت صحت‌سنجی وابستگی کنترلر به عمق و بررسی تأثیر امواج بر کنترلر نیز بهره گرفته شد تا میزان موفقیت این کنترلر در شرایط حساس نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. بینگل و همکاران [3] درمقالی با عنوان کنترل وسایل خودکار زیر آبی به کمک کنترلر تعقیبی مسیر با بهره‌گیری از روش‌های پیشخور و PID هوشمند به تلفیق و ادغام روش‌های کنترل پیشخور و کنترل PID هوشمند پرداختند. این تلفیق منجر به بالابردن دقت در تعقیب مسیر و حذف نویزها و تشخیص صحیح کنترلر در تفکیک اغتشاشات از نویزها گردید که منجر میشد تا عملگرها بتوانند در مواقع ضروری (و نه در هر زمانی) اقدام متناسب جهت خنثی‌سازی اغتشاشات را اجرا نمایند. سیانگ و همکاران [5] درمقالی با عنوان کنترل حرکت بهینه‌سازی مسیر AUV هوشمند با استفاده از کنترلر PID تطبیقی و الگوریتم ژنتیک ارتقا یافته به بررسی کنترل حرکات کوپل در زیردریایی پرداختند. در این تحقیق پایداری سیستم هنگام دور زدن، غوص و صعود و مغروق‌سازی در حضور و عدم حضور کنترلر بررسی گردید. نتایج حاکی از همگرایی سامانه به سمت دستورات از پیش تعریف شده در حضور کنترلر و پاس نمودن مسیرهای از قبل تعیین شده داشته‌است. جهت بالا بردن دقت نتایج و صحت‌سنجی شبیه‌سازی کنترلی، تست‌های تجربی نیز تأثیر کنترلر بر انتخاب بهینه‌سازی را مورد بررسی قرار دادند. جرارد و همکاران [6] درمقالی به طراحی، خطی‌سازی معادلات حرکت زیردریایی و سپس کنترل آن پرداختند. معادلات غیر خطی در ابتدا وارد نرم‌افزار متلب شده و به کمک جعبه ابزار خطی‌سازی، این مهم صورت پذیرفت. معادلات حرکت زیردریایی و سپس کنترل آن پرداختند. سپس دیگرام بلوکی سیستم توسط سیمولینک، رسم و تابع تبدیل سیستم استخراج گردید. با بهره‌گیری از جعبه ابزار تیونینگ، تنظیمات کنترلر PID انجام شده و پاسخ گذرا و دائم سیستم در حضور کنترلر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که ROV در حضور کنترلر و با اعمال محدودیت‌های مناسب ضرایب PID به خوبی

می‌تواند یک مسیر مارپیچ سه‌بعدی را طی نماید. فوشن رن و کوئینگ هو [7] درمقالی با عنوان طراحی و شبیه‌سازی کنترلر لغزشی برای ROV به آنالیز سینماتیک و دینامیک ROV و مقایسه کنترلر لغزشی با کنترلرهای PID سنتی و کنترلر با منطق فازی پرداختند. پودو فادوا [8] درمقالی با عنوان طراحی کنترلر عمق زیردریایی با استفاده از PID و روش جابجایی قطب به بررسی تغییرات ضرایب PID و قطب‌ها در تابع تبدیل حلقه بسته روی پاسخ گذرا و حالت دائم سیستم پرداختند. نوع کنترل تنظیم بوده و ورودی و خروجی‌ها و اثرات اغتشاش در قالب یک بلوک دیگرام به کمک سیمونیک مطلب ارائه گردید. پس از تعیین محدوده ضرایب PID به کمک کنترل کلاسیک، محدوده ضرایب به کمک سعی و خطا باریکتر گردید به طوری که در میان فراجش و زمان فراجش یک بالانس برقرار شد.

## ۲- طرح مسأله

در قسمت مقدمه بیان شد که در کنترل زیرسطحی‌ها، دو مقوله تعقیب و تنظیم همواره در دستور کار قرار دارد و تأکید شد دنبال نمودن فرکانس حرکت یا توسط حرکت سوای در مانور زیگزآگ جزو مقوله تعقیب به شمار می‌آید و این مهم، مستلزم کنترل می‌باشد [9]. مولد حرکات سوای و یاو در زیرسطحی مطالعه حاضر در شکل زیر نمایش داده شده‌است.



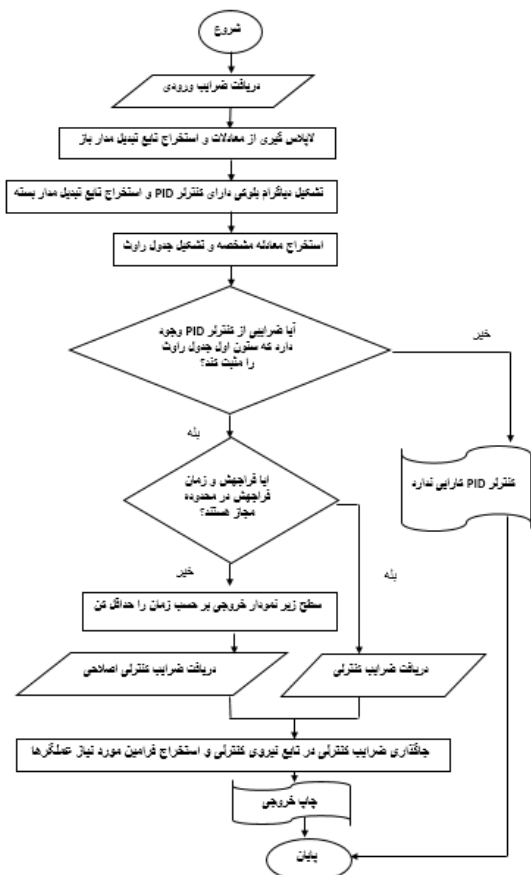
شکل ۳- معرفی عملگرهای مولد حرکات سوای و یاو در پژوهش حاضر

در هر لحظه که وضعیت کنترل نامطلوب باشد، این کوپل حرکات سوای و یاو از بین رفته و زیرسطحی حرکات خالص را بصورت مجزا خواهد داشت که منجر به وارد آمدن نیروهای غیر قابل پیشبینی به سامانه و پاس نکردن نقاط خواهد شد [10]. جهت روشن شدن موضوع، تمایز حرکات دی کوپله در شکل زیر نمایش داده شده‌است.

### ۳- حل مسأله

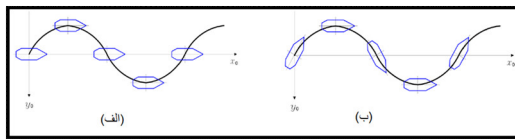
در مسائل کنترلی تعقیب و تنظیم، یک مسیر جهت رسیدن به کنترلر مناسب طی می‌شود که عبارتند از: استخراج معادلات حاکم بر مسأله، اعمال ضرایب ورودی، لاپلاس‌گیری از معادلات حاکم و استخراج تابع تبدیل مدار باز سیستم، تشکیل دیاگرام بلوکی با اعمال کنترلر و استخراج تابع تبدیل مدار بسته سیستم، استخراج معادله مشخصه و بررسی پایداری، استخراج محدوده پایداری ضرایب کنترلی، بهینه‌سازی ضرایب، جاگذاری ضرایب در تابع نیروی کنترلی و استخراج فرامین مورد نیاز عملگرها. تقدم و تاخر این مراحل در فلوجارت زیر نمایش داده شده‌است. این فلوجارت فضای کلی مسیر پیموده شده را ترسیم می‌نماید. با توجه به نقشه راه تعریف شده، گام به گام به هریک از مراحل می‌پردازیم.

جاگذاری ضرایب در تابع نیروی کنترلی و استخراج فرامین مورد نیاز عملگرها.



شکل ۷- فلوجارت کنترل AUV در پژوهش حاضر

رفتار دینامیکی یک وسیله زیرسطحی بوسیله معادلات حرکت خطی و زاوی بر اساس قانون دوم نیوتون و به روش نیوتون-اولر بیان می‌شوند. این قانون در



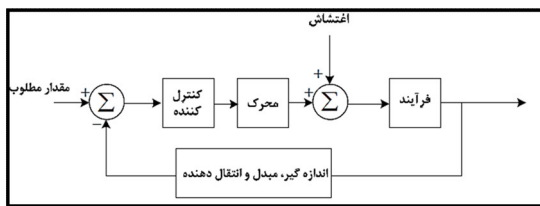
شکل ۴- (الف) سوای خالص (ب) یو خالص

سامانه، حرکت سوای را با معادله ۱ و حرکت یو را با معادله ۲ انجام می‌دهد.

$$y = y_0 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \quad (۱)$$

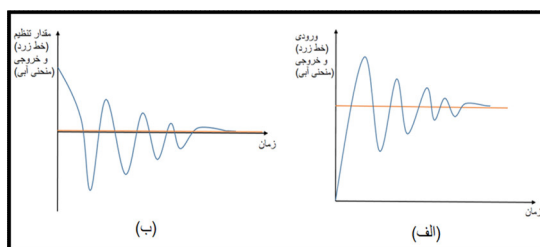
$$\psi = \psi_0 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (۲)$$

حرکت کوپل زمانی حاصل می‌شود که  $\omega_1 = \omega_2$  باشد [11]. بنابراین در باب تعقیب در مطالعه حاضر، می‌توان فرکانس یو را ورودی و فرکانس سوای را خروجی مسأله فرض نمود. کنترلر نهایی باید بتواند در هر لحظه فرکانس سوای را با فرکانس یو کوپل کرده و در صورت ورود عوامل مزاحم به سیستم، آنها را دمپ نماید. حلقه یک سیستم کنترلی را می‌توان به شکل زیر نمایش داد:



شکل ۵- حلقه یک سیستم کنترلی

ورودی در مقوله تعقیب را می‌توان با تابع پله و ورودی در بحث اغتشاش را می‌توان با تابع ضربه شبیه‌سازی نمود. کنترلر با طراحی صحیح می‌تواند تعقیب مطلوب و تنظیم مناسب ایجاد نماید [12]. در شکل‌های زیر شکل اول تعقیب مناسب فرکانس یو توسط سوای (با فرض ورودی تابع پله) را نشان می‌دهد و شکل بعدی دمپ دامنه حرکات اضافی یو در ورود اغتشاشات (با فرض ورودی ضربه) که معادل تنظیم حرکات مزاحم روی صفر می‌باشد را نمایش می‌دهد.



شکل ۶- (الف) تعقیب (ب) تنظیم

هیدرودینامیکی (شامل ضرایب جرم افزوده و دمپینگ به ترتیب متاثر از اندیس های شتاب و سرعت) [16]. فرضیات ساده کننده معادلات عبارتند از: انطباق محورهای مختصات محلی بر محورهای اصلی اینرسی، خنثی شدن نیروی تراست با نیروی مقاومت در راستای طولی، در نظر گرفتن نیروها و گشتاورها بصورت تابعی از پارامترهای سرعت و شتاب و خطی سازی آنها به کمک بسط تیلور، صرفنظر از ضرایب جرم افزوده متقاطع (ضرایب کریولیس با اندیس های دوتایی ناهمسان) به دلیل مقادیر بسیار ناچیز آنها، و صفر در نظر گرفتن ضرایب متاثر از تقارن بدنه [17,18,19,20]. از آنجا که کنترل حرکت زیگزاگ مدنظر است، معادلات سوای و یاو پس از ساده سازی به شکل زیر در می آیند:

$$\text{Sway: } (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (mx_G - Y_r)\dot{r} + \left(\frac{Y_{\delta r}}{U_0} - Y_v\right)v + (mU_0 - Y_r)r = 0 \quad (6)$$

$$\text{Yaw: } (mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (Iz - N_r)\dot{r} + \left(\frac{N_{\delta r}}{U_0} - N_v\right)v + (mx_GU_0 - N_r)r = \quad (7)$$

بازنویسی معادلات حرکت زیرسطحی بصورت زیر را انجام می دهیم:

$$\text{Sway: } a_1\dot{v} + a_0v = -b_1\dot{r} - b_0r \quad (8)$$

$$\text{yaw: } c_1\dot{v} + c_0v = -d_1\dot{r} - d_0r \quad (9)$$

جدول ۲- مقادیر ضرایب معادلات بازنویسی شده

d1	d0	c1	c0	b1	b0	a1	a0
-4.7 Kg m <sup>2</sup>	-5.8 $\frac{Kgm^2}{s}$	1.2 Kg m	3 $\frac{Kgm}{s}$	-2.5 Kg m	-6 $\frac{Kgm}{s}$	1Kg	2 $\frac{Kg}{s}$

تابع تبدیل منتج از معادله سوای

$$G_2(s) = \frac{Y(s)}{\psi(s)} = \frac{-d_1s^2 - d_0s}{c_1s^2 + c_0s} \quad (11)$$

در بحث تعقیب و تنظیم، لوپ های کنترلی در شکل زیر نمایش داده شدند:

دستگاه مختصات چسبیده به جسم بیان می شوند [13]. با معرفی نمادهای اصلی معادلات صفحه XY [14] جدول زیر به بیان اصلی ترین معادلات بکار رفته در حرکت زیرسطحی می پردازیم:

جدول ۱- معرفی موقعیت ها، سرعت ها، شتاب ها، نیروها و گشتاورها در صفحه XY

نام حرکت	موقعیت و زوایای اوپلر	سرعت های خطی و دورانی	شتاب های خطی و دورانی	نیروها و گشتاورها
سرج (Surge)	x	u	$\ddot{x}$	X
سوای (Sway)	y	v	$\ddot{y}$	Y
یاو (Yaw)	$\psi$	r	$\ddot{\psi}$	N

با نوشتن معادلات نیوتون اوپلر و و تانسورهای انتقالی بین محورهای مختصات متصل به زمین و محورهای مختصات متصل به بدنه [15] روابط در صفحه XY عبارتند از:

$$m[\dot{u} - vr - x_G r^2 - y_G \dot{r}] = X \quad (3)$$

$$m[\dot{v} + ur - y_G r^2 + x_G \dot{r}] = Y \quad (4)$$

$$I_z \dot{r} + m[x_G(\dot{v} + ur) - y_G(\dot{u} - vr)] = N \quad (5)$$

نیروها و گشتاورهایی که به زیرسطحی وارد می شوند عبارتند از: وزن و هیدرواستاتیک، مقاومت و تراست، نیروهای سیستم کنترلی و نیروهای ناشی از ضرایب

با لاپلاس گیری از معادلات سوای و یاو به ترتیب توابع تبدیل مدار باز  $G_1(s)$  و  $G_2(s)$  بدست می آیند:

تابع تبدیل منتج از معادله سوای

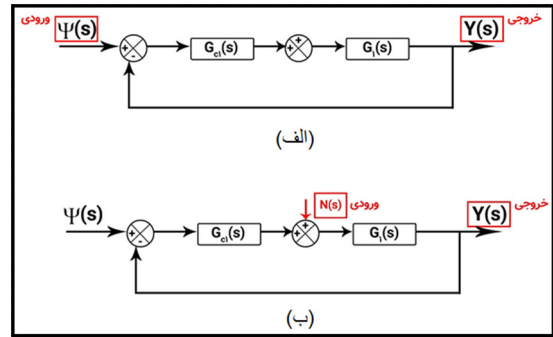
$$G_1(s) = \frac{Y(s)}{\psi(s)} = \frac{-b_1s^2 - b_0s}{a_1s^2 + a_0s} \quad (10)$$

با توجه به مشترک بودن مخرج توابع تبدیل بالا، بنابراین معادله مشخصه تعقیب و تنظیم را می‌توان یکسان در نظر گرفت. بنابراین می‌توان معادله مشخصه را به شکل زیر نوشت:

$$1 + G_c(s)G(s) = 0 \quad (15)$$

تابع تبدیل کنترلی متشکل از فرم‌های تناسبی ( $k_p$ )، مشتقی ( $k_D s$ ) یا انتگرالی ( $\frac{k_I}{s}$ ) می‌تواند باشد.

با تشکیل جدول راوت و اعمال شرط پایداری (ستون اول جدول راوت همواره بزرگتر از صفر) داریم:



شکل ۸- الف) لوپ کنترلی تعقیب (ب) لوپ کنترلی تنظیم

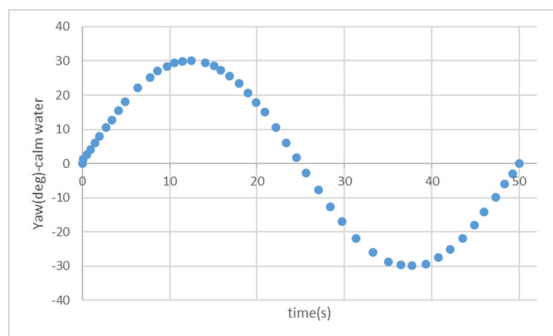
$$\frac{\text{خروجی}}{\text{ورودی}} = \frac{\text{حاصلضرب المان‌های بین ورودی و خروجی}}{1 - \sum (\text{حاصلضرب المان‌های روی هر حلقه بسته})} \quad (12)$$

$$\frac{\text{خروجی}}{\text{ورودی}} = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (13) \quad \text{تعقیب}$$

$$\frac{\text{خروجی}}{\text{ورودی}} = \frac{G(s)}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (14) \quad \text{تنظیم}$$

جدول ۳- تعیین محدوده ضرایب PID به کمک معیار راوت

محدوده پایداری ضرایب کنترلر PID			
$k_I$	$k_D$	$k_p$	
$k_I > 0$	$0 < k_D < 0.16$	$0 < k_p < 0.33$	معادله سوای
$k_I > 0$	$0 < k_D < 0.2$	$0 < k_p < 0.25$	معادله یاو
$k_I > 0$	$0 < k_D < 0.16$	$0 < k_p < 0.25$	محدوده اشتراکی

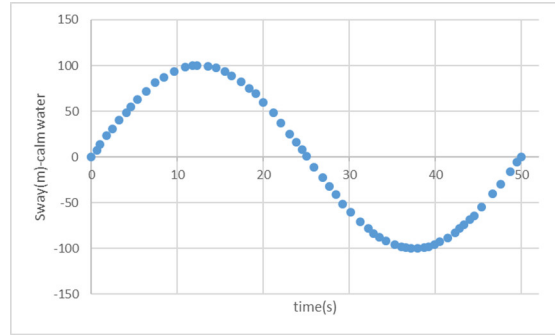


شکل ۹ - نمودار حرکت نوسانی یاو با فرکانس ۰.۰۲ هرتز در آب آرام

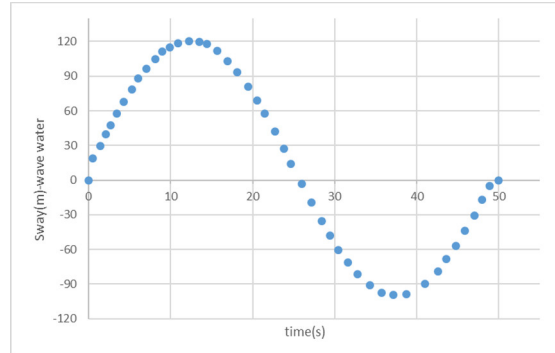
#### ۴- نتایج

نتایج شامل دو قسمت می‌باشد. قسمت اول نمودارهای مربوط به مقادیر حدی ضرایب PID که در آنها فراجش و زمان فراجش در تضاد با یکدیگر عمل می‌کنند، یعنی یا فراجش در محدوده مجاز و زمان فراجش زیاد است و یا بالعکس (یعنی زمان فراجش معقول است و فراجش خارج از رنج می‌باشد. رنج مجاز بر اساس خواسته‌های عملیاتی تعریف می‌گردد. در شکل ۹ نمودار نوسانی تغییرات دامنه یاو بر حسب زمان (و به عنوان ورودی) در آب آرام و در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نمودارهای تغییرات دامنه حرکت سوای در آب آرام و موج نمایش داده شده است.

از آنجا که ضریب انتگرال گیر بزرگتر مساوی صر تعریف شده و انتهای دیگر کران آن باز است باید محدوده را با سعی و خطا مقید تر کنیم تا بتوانیم مقادیر دقیقی را در نهایت به آن تخصیص دهیم. برای این کار سه محدوده برای  $K_I$  در نظر گرفته شد که در جدول زیر نمایش داده شده است. برای هر یک از این محدوده ها رفتار سیستم نسبت به مقادیر این ضریب نیز ذکر شده است.



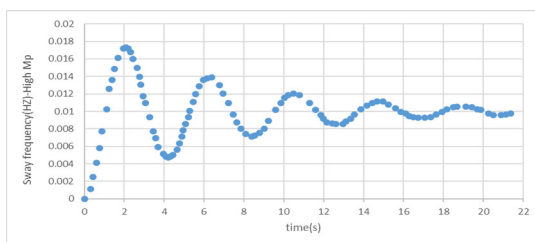
شکل ۱۰- نمودار حرکت نوسانی سوای با فرکانس ۰.۰۲ هرتز در آب آرام



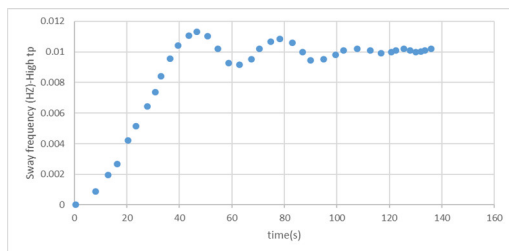
شکل ۱۱- نمودار حرکت نوسانی سوای با فرکانس ۰.۰۲ هرتز در آب موج با فورس ۴

جدول ۴ - محدوده‌های ضریب انتگرال‌گیر و رفتار سیستم

محدوده $k_I$	مقدار متوسط بازه	رفتار سیستم
$0 < k_I < 0.4$	$k_I = 0.2$	دمپ شونده با زمان فراجاهش زیاد
$0.4 < k_I < 0.9$	$k_I = 0.65$	دمپ شونده با فراجاهش زیاد
$0.9 < k_I$	--	همگرا به مقداری غیر از مطلوب مسئله



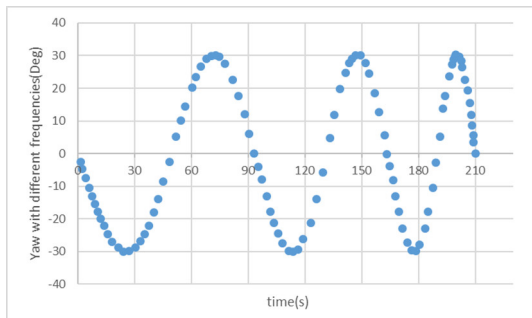
شکل ۱۲- تعقیب فرکانس یاب ( $f=0.01\text{Hz}$ ) توسط فرکانس سوای همراه با فراجاهش بالا با ضرایب  $K_p=0.15$  و  $K_d=0.08$  و  $K_i=0.65$



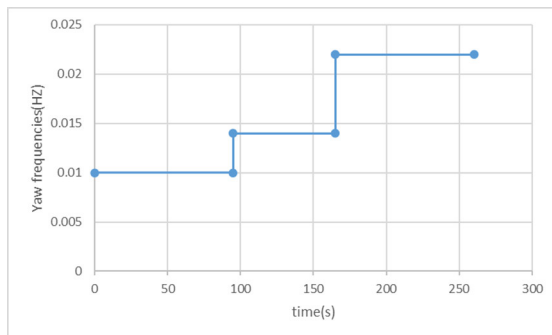
شکل ۱۳- تعقیب فرکانس یاب ( $f=0.01\text{Hz}$ ) توسط فرکانس سوای همراه با زمان فراجاهش بالا با ضرایب  $K_p=0.15$  و  $K_d=0.08$  و  $K_i=0.2$

نمودارهای شکل ۱۲ و ۱۳ بر اساس مقادیر متوسط بازه های ضرایب PID رسم شده‌اند. در جدول ۴ مقدار ۰.۴ برای ضریب انتگرال گیر می‌تواند یک مصالحه مناسب بین زمان فراجاهش و خود فراجاهش مهیا سازد. نمودار شکل ۱ بر اساس این مقدار مرزی رسم شده است. ضرایب قید شده در این شکل، ایضا سطح زیر نمودار منحنی تعقیبی فرکانس سوای بر حسب زمان و سطح زیر نمودار قدر مطلق دامنه سوای اضافی ناشی از اغتشاشات بر حسب زمان را حداقل می نمایند. نمودار های نمایش داده شده در شکل های ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷ بر اساس همین ضرایب بهینه رسم شده اند.

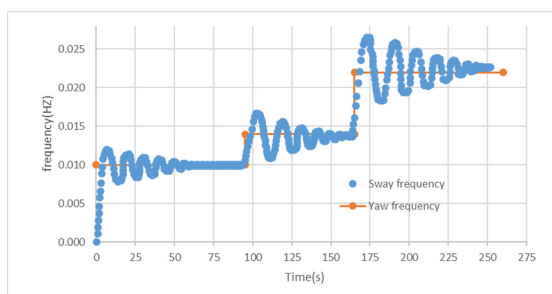
جهت بررسی استقلال ضرایب از فرکانس، سه فرکانس یاو بصورت متوالی تولید و نحوه عملکرد کنترلر مورد ارزیابی قرار گرفت. دامنه و فرکانس های یاو در شکل های ۱۸ و ۱۹ و نمودار تعقیب فرکانس یاو توسط فرکانس سوای در شکل ۲۰ نمایش داده شده است.



شکل ۱۸- نمودار یاو (بر حسب درجه) در سه فرکانس ۰.۰۱، ۰.۰۱۴ و ۰.۰۲۲ هرتز



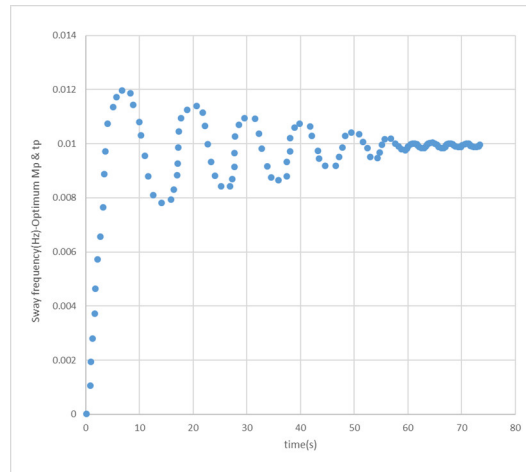
شکل ۱۹- نمودار پلهای فرکانس یاو (دنبال شونده)



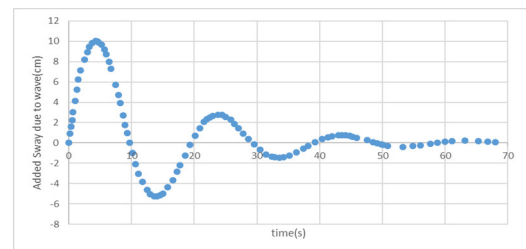
شکل ۲۰- نمودار تعقیب فرکانس یاو توسط فرکانس سوای

### ۵- جمع بندی

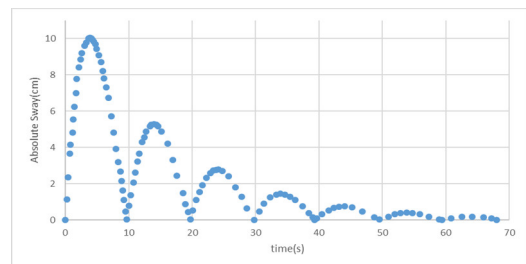
در بررسی معیار پایداری ادوات مکترونیک و تعیین کران های ضرایب PID، شرط لازم جهت برقراری پایداری را می توان معیار راوث دانست اما این معیار شرط کافی نیست. در برخی موارد مانند پژوهش حاضر، آنقدر کران یکی از ضرایب باز است که طراح را در انتخاب مقدار دقیق ضریب دچار سردرگمی فراوان می کند. در این موارد باید معیار های دیگر را نیز در انتخاب ضرایب دخیل



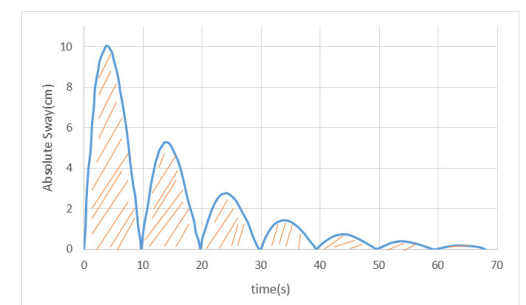
شکل ۱۴- تعقیب فرکانس یاو ( $f=0.01\text{Hz}$ ) توسط فرکانس سوای همراه با مقادیر بهینه فراجش و زمان فراجش با ضرایب  $Ki=0.4$  و  $Kd=0.08$  و  $Kp=0.15$



شکل ۱۵- تنظیم دامنه اضافه سوای ناشی از امواج (اغتاش) روی مقدار صفر با ضرایب  $Ki=0.4$  و  $Kd=0.08$  و  $Kp=0.15$



شکل ۱۶- نمودار قدمطلق دامنه اضافه سوای ناشی از امواج (اغتاش) با حداقل سطح زیر نمودار با ضرایب  $Kp=0.15$  و  $Ki=0.4$  و  $Kd=0.08$



شکل ۱۷- سطح زیر نمودار قدمطلق دامنه اضافه سوای ناشی از امواج (اغتاش) با ضرایب  $Kp=0.15$  و  $Kd=0.08$  و  $Ki=0.4$

نمود. از جمله مواردی که بسیار حائز اهمیت می باشد معیار محدوده مناسب فراجش و زمان فراجش می باشد. عمدتاً این دو پارامتر با یکدیگر در تضاد هستند. طراح زمانی که بتواند بین این دو یک مصالحه برقرار نماید به مطلوب مساله دست پیدا خواهد کرد. این امر زمانی

محقق می شود که بتوان سطح زیر نمودار پاسخ زمانی را کمینه نمود. در این حالت پاسخ اپتیمم در مقوله کنترل حاصل خواهد شد.

#### ۶- نمادها

نماد	معرفی نماد	نماد	معرفی نماد
$y$	موقعیت عرضی	$x_G$	موقعیت طولی مرکز ثقل از مبدا مختصات
$y_0$	دامنه موقعیت عرضی	$y_G$	موقعیت عرضی مرکز ثقل از مبدا مختصات
$\omega$	سرعت زاویه ای	$I_z$	ممان اینرسی جرمی حول محور Z
$\varphi$	فاز حرکت	$Y_{\dot{v}}$	مقاومت عرضی بدنه در برابر شتاب گیری عرضی
$\psi$	موقعیت دورانی حول محور (موقعیت حرکت یاو) Z	$Y_{\dot{r}}$	مقاومت عرضی بدنه در برابر شتاب گیری زاویه ای
$\psi_0$	دامنه حرکت یاو	$N_{\dot{v}}$	مقاومت دورانی بدنه در برابر شتاب گیری عرضی
m	جرم	$N_{\dot{r}}$	مقاومت دورانی بدنه در برابر شتاب گیری زاویه ای
$U_0$	سرعت	$Y_v$	مقاومت عرضی در برابر سرعت گیری عرضی
$Y_{\delta_r}$	ضریب نیروی عرضی سکان	$Y_r$	مقاومت عرضی در برابر سرعت گیری دورانی
$N_{\delta_r}$	ضریب گشتاور سکان	$N_v$	مقاومت دورانی در برابر سرعت گیری عرضی
G	تابع تبدیل مدار باز	$N_r$	مقاومت دورانی در برابر سرعت گیری زاویه ای
s	متغیر فضای لاپلاس	$k_p$	ضریب کنترلی تناسبی
$G_c$	تابع تبدیل کنترلر	$k_I$	ضریب کنترلی انتگرال گیر
Mp	فراجش	$k_D$	ضریب کنترلی مشتق گیر
tp	زمان فراجش		

[12] Du, Yan, et al. "An Autonomous Control System for AUV Acoustic Target Tracking." *International Conference on Autonomous Unmanned Systems*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024.

[13] Remmas, Mohamed Walid. *Contributions to the Modeling and Control of Fin-Actuated Autonomous Underwater Vehicles*. Diss. Université de Montpellier; Tallinna Tehnikaülikool, 2023.

[14] Aiassa, Anastasia Costanza. *Motion Control of an Autonomous Underwater Vehicle for Maritime Surveillance*. Diss. Politecnico di Torino, 2025.

[15] Hermawan, Yuda Apri, Muhammad Ikhsan Suryadarma, and Totok Yulianto. "Design Configuration of Horizontal Motion Control System for Unmanned Underwater Vehicle." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 1461. No. 1. IOP Publishing, 2025.

[16] Lin, Lunyang, et al. "Hydrodynamics Model Identification and Model-Based Control Application of a New Type of AUV." *Journal of Marine Science and Engineering* 13.2 (2025): 310.

[17] Fan, Gang, et al. "Optimized Hydrodynamic Design for Autonomous Underwater Vehicles." *Machines* 13.3 (2025): 194.

[18] Mohanty, Prases K., Vishnu Chaudhary, and Rahul Prajapati. "Review on path planning methods for autonomous underwater vehicle." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 239.1 (2025): 3-37.

[19] Hammad, Mohanad M., Ahmed K. Elshenawy, and M. I. El Singaby. "Position control and stabilization of fully actuated AUV using PID controller." *Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference*. Cham: Springer International Publishing, 2016.

[20] Nazir, Kinza, Yong-Woon Kim, and Yung-Cheol Byun. "Predictive PID Control for Automated Guided Vehicles Using Genetic Algorithm and Machine Learning." *IEEE Access* (2025).

[1] MacLin, Gage, et al. "Modeling, simulation and maneuvering control of a generic submarine." *Control Engineering Practice* 144 (2024): 105792.

[2] Sha, Zeyu, et al. "A Portable Autonomous Underwater Vehicle with Multi-Thruster Propulsion: Design, Development, and Vision-Based Tracking Control." *IEEE Robotics and Automation Letters* (2025).

[3] Bingul, Zafer, and Kursad Gul. "Intelligent-PID with PD feedforward trajectory tracking control of an autonomous underwater vehicle." *Machines* 11.2 (2023): 300.

[4] Wang, Yuxuan, et al. "An adaptive PID controller for path following of autonomous underwater vehicle based on Soft Actor-Critic." *Ocean Engineering* 307 (2024): 118171. \_2024.

[5] Xiong, Yong, et al. "Motion control and path optimization of intelligent AUV using fuzzy adaptive PID and improved genetic algorithm." *Mathematical biosciences and engineering* 20.5 (2023): 9208-9245.

[6] Sangalang, Ralph Gerard B., et al. "Design of a control architecture for an underwater remotely operated vehicle (ROV) used for search and rescue operations." *Kybernetika* 58.2 (2022): 237-253.

[7] Ren, Fushen, and Qing Hu. "ROV sliding mode controller design and simulation." *Processes* 11.8 (2023): 2359.

[8] Rachmawan, I. Putu Fadya, Dian Tri Utami, and Muhammad Ahza Hafizh Fahrezi. "Submarine Depth Control Design using Proportional Integral Derivative (PID) and Pole Placement Methods."

[9] Liu, Xin, et al. "Model predictive control for autonomous marine vehicles: a review." *Ships and Offshore Structures* (2025): 1-21.

[10] Zhilenkov, Anton. "The study of the process of the development of marine robotics." *Vibroengineering Procedia* 8 (2016): 17-21.

[11] He, Long, Mengting Xie, and Ya Zhang. "A Review of Path Following, Trajectory Tracking, and Formation Control for Autonomous Underwater Vehicles." *Drones* 9.4 (2025): 286.