طراحی سامانه هوشمند تعقیب مسیر برای شناورهای جابه جایی با در نظر گرفتن دینامیک غیرخطی

علی حسنوند[۱]، محمد سعید سیف[۲]

[۱] دکتری مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی شریف، Ali.hasanvand@mech.sharif.edu

[۲] استاد تمام، عضو هیئت علمی مهندسی دریا دانشگاه صنعتی شریف، seif@sharif.edu

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۲۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۲۱

کلمات کلیدی:
مدلسازی دینامیکی
کنترل سرعت
تعقیب مسیر
کنترل خطی و غیرخطی
هوشمندسازی

چکیده

امروزه محققین به دنبال ارائه راهکارهایی برای هوشمندسازی و حذف نیروی انسانی برای کاهش میزان خطا و هزینه های سفرهای دریایی هستند. هدف از این مطالعه طراحی سیستم هوشمند برای یک مدل شناور نفتکش، به منظور تعقیب موقعیت ها و حالت متناسب است. باتوجه به ماهیت غیرخطی دینامیک شناورهای جابه جایی، در این پژوهش به بررسی رفتار سیستم در حالت غیرخطی با در نظر گرفتن کنترلر پرداخته شده است. از روش کنترل PID و مود لغزشی (SMC) برای کنترل عملگرهای شناور استفاده شده است. برای بررسی عملکرد کنترلر طراحی شده، ماموریت‌های مختلفی ازجمله کنترل سرعت و زوایای حرکت، تعقیب مسیر، تعقیب نقاط تعریف شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در حالت تعقیب مسیر چنانچه سرعت شناور قابل توجه نباشد، میتوان عملکرد متناسبی از سیستم هوشمند انتظار داشت. کنترل مود لغزشی که کنترلی غیر خطی است در کنترل زاویه سکان و مسیر عملکرد بهتری با نوسانات مطلوبی از خود نشان میدهد. اما کنترل خطی PID در زمینه کنترل سرعت پیشروی، عملکرد بهتری از خود نشان میدهد اما در کنترل جهت‌گیری شناور عملکرد ناپایدارتری نسبت به کنترل مود لغزشی دارد.

Designing the way point tracking intelligent system for displacement vessels with considering nonlinear dynamics

Ali Hasanvand[1], Mohammad Saeed seif[2]

[1]Ph.D of naval architecture, Sharif University of technology, Ali.hasanvand@mech.sharif.edu

[2]Mechanical Engineering Department, Sharif University of technology, seif@sharif.edu

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 12 Nov. 2022
Accepted: 11 May. 2023

Keywords:
Hydrodynamic modeling
Velocity Control
Trajectory tracking
Linear and nonlinear controller
Intelligence

ABSTRACT

Today, researchers are looking for ways to intelligentize and eliminate human wrong to reduce the amount of errors and costs of sea voyages. The purpose of this study is to design an intelligent system for the displacement vessel model of a tanker in order to track trajectory and appropriate state. Since the dynamics of vessel is nonlinear, in this research, the behavior of the system in nonlinear mode is investigated by considering the controller. PID control method and sliding mode control (SMC) have been used to control actuators, which have the ability to control vessel movements in different directions and modes. To check the performance of the designed controller, various missions such as controlling speed and heading angle, trajectory tracking have been investigated. The obtained results show that each controller has ability of speed and heading angle control with acceptable accuracy and slight difference. In the trajectory tracking mode, if movement speed is not significant, we can expect a proportional performance from the intelligent system. In sliding mode control, which is a non-linear control, it shows better performance with favorable fluctuations

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.12.6]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.155]

in controlling the rudder angle and tracking. However PID, it performs better in controlling propeller rotating, but it performs more unstable in controlling direction.

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 زیرآبی، بازرسی و جمع آوری اطلاعات زیست محیطی و تحقیقاتی، نصب، تعمیر و نگهداری سازه های ساحلی و دریایی، مستلزم بکارگیری تکنولوژی خاص و جدیدی برای پاسخ گویی به نیازهای روزافزون پیش آمده می باشد.

سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی یک تکنولوژی با سرعت پیشرفت و گسترش بالا است، که به علت افزایش تقاضا در صنایع اکتشاف نفت و گاز در دهه‌ی ۱۹۶۰ و اوایل ۱۹۷۰ به وجود آمد. افزایش استفاده از این سیستم در صنایع دریایی به قدری زیاد بوده است که هم اکنون بیش از ۱۸۰۰شناور عملیاتی در سطح جهان از این فناوری در صنایع اکتشاف و بهره برداری از میدان‌های نفت و گاز، فعالیت‌های پژوهشی و زیست‌شناسی اقیانوس‌ها، حمل‌ونقل و ارائه خدمات به صنایع فراساحل و صنعت گردشگری بهره می‌گیرند [۱].

عملکرد اصلی یک سیستم کنترل موقعیت دینامیکی این است که بتواند شناور را در یک موقعیت و جهت‌گیری مشخص حفظ کند، هرچند که ممکن است سایر مأموریت‌ها مانند حفظ مسیر حرکت و شرایط آب و هوایی خاص نیز مدنظر باشند، اما هدف اساسی کنترل موقعیت و جهت‌گیری است[۱].

سیستم کنترل شناورها بسیار توسعه‌یافته تراز شناورها می‌باشند. عواملی که باعث این توسعه‌یافتگی و پیچیدگی می‌شوند را می‌توان به موارد زیر تقسیم کرد[۲]و[۳]:

- سیستم تثبیت موقعیت شناورها با استفاده از کنترل سه حرکت سرج، سوی و یاو، موقعیت و جهت‌گیری شناور را حفظ می‌کند.
- موقعیت یابی سیستم شناورها بر اساس سیستم موقعیت یابی جهانی GPS صورت میگیرد که در این مسئله با استفاده از مد دینامیکی محاسبه می گردد.
- عدم دسترسی به ربات در حال عملیات در صورت ازکارافتادگی تجهیزات. چنانچه هر یک از اجزا سیستم کنترل در ربات دچار خرابی و ازکارافتادگی شوند ، ربات تا حدود زیادی قابلیت مانور و انجام مأموریت خود را از دست می‌دهد. به همین دلیل سیستم کنترل مسیر باید در برابر آسیب‌های احتمالی مقاوم باشد.

باوجود اختلافات ذکرشده سیستم‌های مورداستفاده در هر دو متحرک تا حد بسیار زیادی مشابه به هم می‌باشند[۴].

نامعینی های فراوانی در مساله کنترل کشتی وجود دارد. یکی از [۵] روش های مقابله با این نامعینی ها استفاده از کنترل تطبیقی میباشد [۶]. برای مثال در مقاله [۷] یک کنترل کننده تعقیب مسیر تطبیقی برای کشتی با مدل غیرخطی و دارای نامعینی های پارامتری متغیر با زمان پیشرفت داده شده است. روش‌های متنوعی از دیدگاه کنترلی همچون کنترل بهینه [۱۹-۲۲] جهت بهبود سیگنال کنترلی مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی تحقیقات ارائه شده نشان میدهد که در زمینه طراحی کنترل کننده بهینه برای اتوپایلوت [۸] کشتی کار فراوانی انجام نگرفته است. ولی از بین مقالات ارائه شده پژوهش [۹] روابط گسترده ای در زمینه کنترل شناورها ارائه داده است. این مقاله با استفاده از تئوری تخمین بازگشتی راه حلی برای یافتن ورودی کنترلی بهینه برای سیستم های غیرخطی ارائه داده است.

سیستم هدایت شناورهای خودران نیاز به داشتن یک ناظر [۱۱-۱۳] جهت تعریف هدف برای سامانه کنترلی دارد. این بخش که بعنوان هدایت نامیده می شود روش های متنوعی در پژوهش‌های گذشته به آن پرداخته شده است [۱۴-۱۸].

به استثنای شناورهای بدون سرنشین fully-actuated[۲۵-۲۳] بسیاری از شناورهای هوشمند دارای دو تراستر اصلی [۲۶-۲۸] یا همراه با یک تراستر و یک سکان [۲۹و۳۰] طراحی و ساخته میشوند که امکان حرکت در سه درجه آزادی را فراهم میکند.

با این توصیف بسیاری از شناورهای هوشمند و خودران در ابعادهای کوچک انجام شده است و پژوهش های کمی به شناورهای نفتکش پرداخته اند. شناورهای نفتکش با دینامیک پیچیده و غیر خطی که دارند می‌توانند با طراحی سامانه هوشمند متناسب، به شناورهای هوشمند تبدیل شوند. کنترل خطی و غیرخطی با وجود دینامیک غیرخطی این شناورها چالش متناسبی است که به آن پرداخته شده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.12.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.155]

است. بررسی اثر نوع کنترلر بر عملکرد شناورهای جابه جایی موضوع مهمی است که میتواند هزینه سفر را به صورت چشمگیری کاهش دهد.

۲ – مدلسازی دینامیکی

بررسی حرکات متحرک‌های دریایی شامل مطالعه استاتیکی و دینامیکی آنهاست. استاتیک بررسی پایداری وسیله در حالت سکون یا حرکت با سرعت ثابت است و دینامیک مربوط به حرکت شتابدار آن می‌باشد. معمولاً مطالعات دینامیکی را به دو بخش تقسیم میکنند: سینماتیک، که فقط جنبه هندسی حرکت را بررسی میکند، و سینتیک که به تحلیل نیروهای به وجود آورنده حرکت میپردازد. برای متحرک های دریایی ۶ مؤلفه حرکت با عناوین: حرکت در جهت x (surge)، حرکت در جهت y (sway)، حرکت در جهت z (heave)، دوران حول محور x (roll)، دوران حول محور y (pitch)، دوران حول محور z (yaw) تعریف می‌شود.

شکل ۱ علائم استاندارد در متحرک‌های زیرسطحی.

درجه آزادی	نام حرکت	ممان ها و نیروها	سرعت های زاویه ای و خطی	موقعیت و زوایای اویلر
۱	Surge	X	u	x
۲	Sway	Y	v	y
۳	Heave	Z	w	z
۴	Roll	K	p	ϕ
۵	Pitch	M	q	θ
۶	yaw	N	r	ψ

۳ – سینماتیک

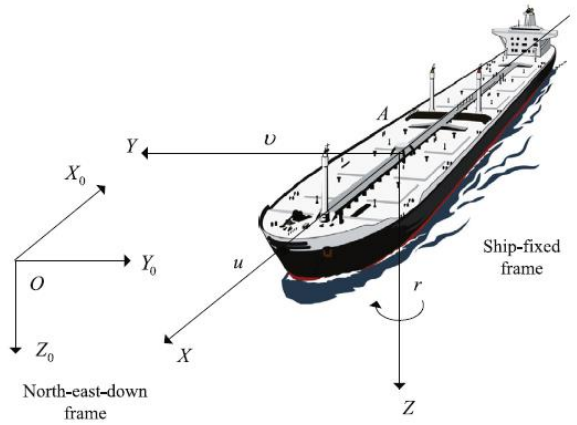
هنگام تحلیل حرکت ۶ درجه آزادی متحرک‌های دریایی همانند شکل۱ بهتر است که از ۲ محور مختصات مختلف استفاده شود. محور مختصات متحرک به مرکز ثقل وسیله متصل است و محور مرجع متصل به بدنه[1] نامیده می شود. مبدأ محور مختصات متصل به بدنه معمولاً در مرکز جرم وسیله انتخاب می‌شود. در دستگاه مختصات شناور، محورها منطبق بر محورهای اصلی اینرسی بوده و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

X_0: محور طولی (جهت از پاشنه به سمت دماغه)

Y_0: محور عرضی (جهت به سمت استاربورد[2])

Z_0: محورعمودی (جهت از بالا به پایین)

[1] Body-fixed reference frame



شکل ۱ شناور و دستگاه مختصات های تعریف شده

همانطور که در جدول (۱) نشان داده شده است، علامت‌گذاری کمیت‌های مختلف بر طبق علامت گذاری SNAME(1950) صورت می‌گیرد. برای مدلسازی و کنترل وسیله نیاز به تعیین موقعیت شناور در مختصات متصل به زمین می‌باشد تا بتوان برای تصمیم گیری و اعمال گام بعدی بخش کنترل تصمیم گیری نمود. با توجه به این امر، حرکت کلی شناورها در ۶ درجه آزادی توسط بردارهای زیر نشان داده می‌شود:

$$\begin{aligned} &\eta=[\eta_1^T,\eta_2^T]^T; \quad \eta_1=[x,y,z]^T; \quad \eta_2=[\phi,\theta,\psi]^T; \\ &\nu=[\nu_1^T,\nu_2^T]^T; \quad \nu_1=[u,v,w]^T; \quad \nu_2=[p,q,r]^T; \\ &\tau=[\tau_1^T,\tau_2^T]^T; \quad \tau_1=[X,Y,Z]^T; \quad \tau_2=[K,M,N]^T; \end{aligned} \tag{۱}$$

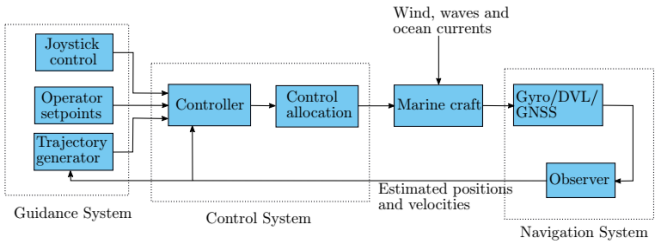
η بردار چرخش و موقعیت نسبت به مختصات متصل زمین، ν بردار سرعت خطی و زاویه‌ای نسبت به مرجع متصل به بدنه و τ نشان‌دهنده نیروها و ممان‌های وارده به شناور نسبت به مرجع متصل به بدنه است.

۴ – سیستم هدایت و کنترل

بر اساس آنچه در معرفی و موارد استفاده از کنترل مسیر حرکت شناورها بیان شد، این سیستم ها در ماموریت‌های مختلف وظایف متفاوتی را بر عهده دارند. عملکرد مناسب و بهینه در این مأموریت ها نیازمند داشتن اطلاعات مناسب در هرلحظه است. این اطلاعات شامل موقعیت لحظه‌ای، مسیر مطلوب حرکت، شرایط عملکردی و... است. این اطلاعات توسط بخش هدایت، ناوبری و کنترل مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و تمهیدات لازم به‌منظور ادامه مأموریت در نظر گرفته می‌شود. نمایش کلی این بخش در متحرک‌های دریایی را به‌صورت شکل (۲) نمایش داده می‌شود[۴]. همان‌طور که مشخص است این بخش دارای سه زیرسیستم است.

[2] Starboard (سمت راست متحرک)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.12.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.155]



شکل ۲ طرحواره سیستم هدایت، کنترل و ناوبری برای متحرک‌های دریایی[۱۸]

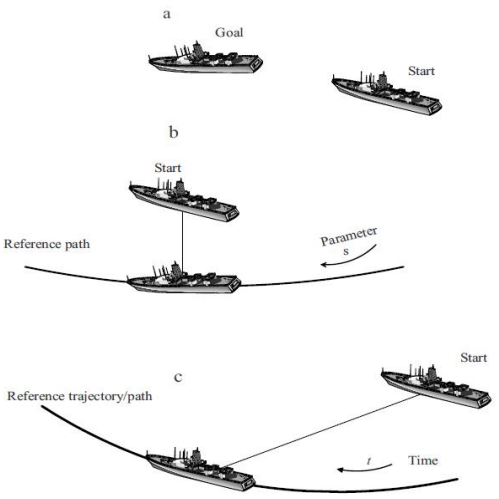
۴-۱- سیستم هدایت

سیستم هدایت وظیفه تعیین مسیر حرکت شناور را بر عهده دارد. این مسیر می‌تواند حرکت از یک نقطه‌به‌نقطه[۳]دیگر، دنبال کردن یک مسیر مشخص[۴]و یا حرکت با سرعت متغیر در یک مسیر متغیر با زمان[۵]باشد.

در متحرک های در یایی به‌منظور انجام مأمور یت، حا لت های مختلفی به‌منظور تعیین شرایط متحرک برای رسیدن به شرایط مطلوب در نظر گرفته می‌شود. این روش‌ها را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی نمود[۱۸, ۱۴]:

- حر کت نقطه به‌نقطه: متحرک با ید از یک نقطه به‌نقطه دیگری برسد. در این حالت مسیر حرکت با تعداد نقاطی که بیانگر وضعیت متحرک در آن نقطه است، مأموریت انجام می‌شود.
- دنبال کردن م سیر: در این حالت م سیر حرکت و و ضعیت متحرک در هرلحظه مشخص است.
- ردیابی مسیر: متحرک باید به یک مسیر مرجع برسد و آن را تعقیب نماید (م سیر هند سی با قوانین زمانی م شخص). منظور از ردیابی مسیر جایی ا ست که مسیر مرجع توسط یک سیستم مرجع تولید می‌شود. تفاوت این مورد با مورد قبلی قانونی است که زمان‌بر طی کردن مسیر حرکت حاکم است.

وظایف بالا برای یک شناور در شکل ۳ نشان داده‌شده است.



شکل ۳ حالت‌های تعیین مسیر در متحرک‌های دریایی[۱۸]

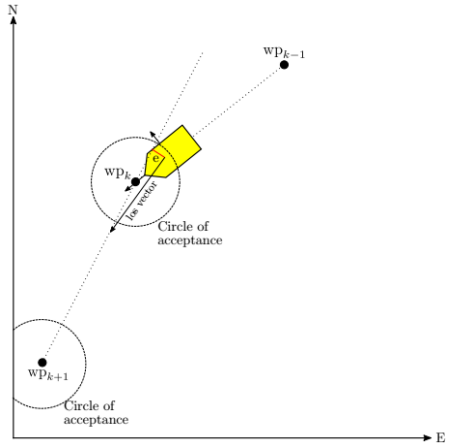
۴-۱-۱- حرکت نقطه به نقطه

چنانچه مسیر حرکت در طول مأموریت مشخص باشد، می‌توان مسیر حرکت را با تعریف نقاطی که بر آن منطبق باشند تعریف نمود. هریک از این نقاط دارای اطلاعات مربوط به موقعیت در آن بخش از م سیر ا ست. این اطلاعات در د ستگاه مخت صات کارتزین بوده و به‌صورت زیر برای تعداد n نقطه تعریف می‌شوند[۱۸]:

$$\text{WayPoints} = \{(x_0, y_0, z_0), (x_1, y_1, z_1), \ldots, (x_n, y_n, z_n)\} \quad (۲)$$

همچنین می‌توان به‌منظور بهبود عملکرد و یا دستیابی به اهداف خاصی از اطلاعات دیگری نیز استفاده نمود:

لازم است که در هر مأموریت با توجه موارد ذکرشده و دقت لازم برای حرکت در طول مسیر، شرایط را برای صحت رسیدن و گذر از یک نقطه مشخص در نظر گرفت. در غیر این صورت چنانچه نتوان با دقت لازم به این نقطه رسید، ممکن است باعث نوسان و چرخش حول یک نقطه شود.



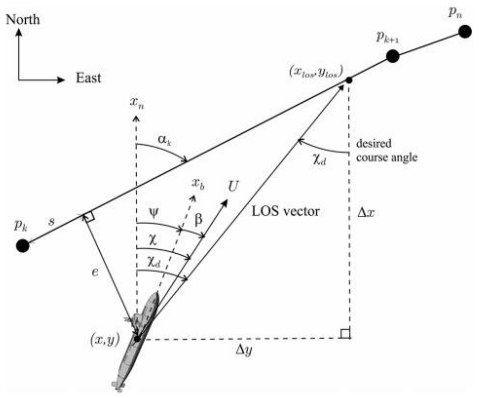
شکل ۴ نمونه‌ای از حرکت نقطه به نقطه و شعاع موردقبول برای گذر از یک نقطه

[۳]Waypoint
[۴] Path Following
[۵]Trajectory tracking

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.12.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.155]

۲-۱-۴- هدایت بر اساس خط دید

تعریف هدایت بر اساس خط دید در کاربردهای دریایی متفاوت از کاربردهای هوایی است. در کاربردهای هوایی هدایت بر اساس خط دید، شاملی خطی است که از یک نقطه مرجع (هواپیما، موشک و...) آغازشده و باید از یک هدف (هواپیما، موشک و...)عبور کند. اما در کاربردهای دریایی بردار خط دید، شامل خط عبوری از نقاطی است که بر یک خط گذرنده از دونقطه مشخص مماس باشد[۱۸]. در شکل ۵ تعاریف مربوط به هدایت خط دید برای حرکت از یک نقطه به نقطه دیگر نشان داده‌شده است.



شکل ۵ تعاریف مربوط به هدایت بر اساس خط دید در متحرک‌های دریایی[۱۸]

با توجه به شکل ۵ می‌توان رابطه زیر را تعریف نمود:

$$\tan\left(\chi_d(t)\right) = \frac{\Delta y(t)}{\Delta x(t)} = \frac{y_{los} - y(t)}{x_{los} - x(t)} \qquad (۳)$$

همچنین زاویه مطلوب حرکت به‌صورت زیر است:

$$\chi_d(t) = a\tan 2(y_{los} - y(t), x_{los} - x(t)) \qquad (۴)$$

همان‌طور که مشخص است، برای تعیین زاویه مطلوب حرکت باید مختصات نقطه $p_{los}^n = [x_{los}, y_{los}]$ تعیین شود. بر این اساس با توجه به شکل ۵ می‌توان دو رابطه زیر را برای به دست آوردن مختصات این نقطه حل نمود:

$$\left[x_{los} - x(t)\right]^2 + \left[y_{los} - y(t)\right]^2 = R^2 \qquad (۵)$$

که در این رابطه R>0 دایره‌ای است به مرکزیت نقطه‌ای که بیانگر مختصات شناور در هرلحظه است و به‌گونه‌ای است که خط واصل بین دونقطه از مسیر حرکت را قطع می‌کند.

$$\begin{aligned}\tan(\alpha_k) &= \frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k} \\ &= \frac{y_{los} - y_k}{x_{los} - x_k} = cons\end{aligned} \qquad (۶)$$

که رابطه (۵) نشان‌دهنده رابطه فیثاغورث و (۶) بیانگر شیب‌خط بین دونقطه از مسیر حرکت است. با تعریف $\Delta x = x_{k+1} - x_k$ و $\Delta y = y_{k+1} - y_k$، این معادلات در هرلحظه با توجه به دو حالت زیر حل می‌شوند:

۱- اگر $|\Delta x| > 0$ باشد از رابطه (۶) می‌توان نوشت:

$$y_{los} = \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)\left(x_{los} - x(t)\right) + y_k \qquad (۷)$$

برای سادگی این رابطه به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$d = \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right), \qquad e = x_k, \qquad f = y_k \qquad (۸)$$

با بسط رابطه(۵):

$$x_{los}^2 - 2xx_{los} + x^2 + y_{los}^2 - 2yy_{los} + y^2 = R^2 \qquad (۹)$$

که بر اساس رابطه (۷) :

$$\begin{aligned} y_{los}^2 = \left[\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)\left(x_{los} - x(t)\right) + y_k\right]^2 &= \left[dx_{los} + (f - de)\right]^2 \\ &= \left(dx_{los} + g\right)^2 \\ &= d^2 x_{los}^2 + 2dx_{los} + g^2 \end{aligned} \qquad (۱۰)$$

که در این رابطه

$$g = f - de = y_k - \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)x_k \qquad (۱۱)$$

همچنین می‌توان رابطه (۱۲) را در نظر گرفت:

$$2yy_{los} = 2y\left(dx_{los} + g\right) = 2dydx_{los} + 2gy \qquad (۱۲)$$

با جایگذاری روابط (۱۰) و (۱۲) در رابطه (۱۱) رابطه (۱۳) نتیجه می‌شود:

$$(1 + d^2)x_{los}^2 + 2(dg - dy - x)x_{los} + (x^2 + y^2 + g^2 - 2gy - R^2)^2 = 0 \qquad (۱۳)$$

که رابطه (۱۳) یک معادله درجه دوم استاندارد قابل‌حل است. این معادله را تعریف ضرایب زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} a &= 1 + d^2 \\ b &= 2(dg - dy - x) \\ c &= x^2 + y^2 + g^2 - 2gy - R^2 \end{aligned} \qquad (۱۴)$$

حل رابطه (۱۴) به‌صورت زیر است:

$$x_{los} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \qquad (۱۵)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.12.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.155]

در حالتی که $\Delta x > 0$ باشد:

$$x_{los} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \qquad (۱۶)$$

در حالتی که $\Delta x < 0$ باشد:

$$x_{los} = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \qquad (۱۷)$$

و از رابطه می‌توان y_{los} را محاسبه نمود.

۲- اگر $\Delta x = 0$ باشد، تنها رابطه (۵) قابل‌قبول است. درنتیجه:

$$y_{los} = y \pm \sqrt{r^2 - (x_{los} - x)^2} \qquad (۱۸)$$

در حالتی که $\Delta y > 0$ باشد:

$$y_{los} = y + \sqrt{r^2 - (x_{los} - x)^2} \qquad (۱۹)$$

در حالتی که $\Delta x < 0$ باشد:

$$y_{los} = y - \sqrt{r^2 - (x_{los} - x)^2} \qquad (۲۰)$$

و $x_{los} = x_k = x_{k+1}$ است. درصورتی‌که $\Delta x = 0$ و $\Delta y = 0$ باشد نیز هیچ اقدامی انجام نمی‌گیرد.

۲-۴- سیستم ناوبری

سیستم ناوبری شامل مجموعه‌ای از تجهیزات و الگوریتم‌های مختلف است که به‌منظور تعیین وضعیت یک متحرک شامل موقعیت، شتاب، سرعت، ارتفاع از بستر و... مورداستفاده قرار می‌گیرد. هرچند از این سیستم در حالت هدایت سطحی و کمک به کاهش خطا در ناوبری به سایر تجهیزات، مورداستفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش بدلیل ماهیت عددی بودن پژوهش و مدلسازی رفتار شناور برای سیستم ناوبری از خروجی مدل دینامیکی طراحی شده برای شناور مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۴- سیستم کنترل

هدف سیستم کنترل، اعمال فرمانی است که با استفاده از آن سیستم به هدف کنترلی مطلوب برسد. همان‌طور که ذکر شد این هدف توسط سیستم هدایت مشخص شده و سیستم کنترل به توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تجهیزات ناوبری سعی در قرار دادن سیستم در وضعیت مطلوب می‌کند.

مرسوم‌ترین سیستم کنترلی توسعه داده‌شده، سیستم‌های مبتنی بر کنترل‌های کلاسیک است که معمولاً از دو شیوه کنترل انتگرالی-تناسبی(PI)، کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) و تناسبی-مشتقی (PD) استفاده می‌شود. نوع دیگری که در این پژوهش استفاده شده است، کنترل مود لغزشی است که با تعریف سطح لغزش و طراحی ورودی کنترلر سعی در کاهش خطا دارد.

۵- قیود

اگر مقادیر طراحی کنترلر r_w صفر و یا نزدیک به صفر انتخاب شوند، حل بهینه برای ΔU باعث ایجاد مقادیر بالای کنترلی می‌شود که ممکن است در واقعیت عملگرها نتوانند چنین فرمان کنترلی را ایجاد کنند. در واقعیت عملکرد عملگرها با دو محدودیت حداکثر نرخ تغییرات و حداکثر فرمان کنترلی قابل‌اجرا مواجه هستند. قیود عملگرها را به‌صورت زیر می‌توان نمایش داد[۱۲]:

برای حداکثر نرخ تغییرات عملگر :

$$\Delta u^{\min} \le \Delta u(k_i) \le \Delta u^{\max} \qquad (۲۱)$$

و برای حداکثر اندازه فرمان کنترلی :

$$u^{\min} \le u(k_i) \le u^{\max} \qquad (۲۲)$$

قیود اعمالی بر Δu به‌منظور تعیین حداکثر نرخ تغییراتی است که ورودی‌های سیستم (عملگرها) می‌توانند ایجاد کنند. به‌عنوان مثال در پروانه حداکثر نرخ تغییرات در ورودی کنترلی که همان دور شفت است را می‌توان حداکثر 20 دور بر ثانیه تغییر داد. قیود اندازه فرمان کنترلی حداکثر اندازه‌ای است که عملگرها می‌توانند آن را ایجاد کنند. همچنین برای سکان این مقدار در بازه 35± محدود شده است. برای سیستم‌های دارای چند عملگر این قیود می‌تواند تعمیم داده شوند. برای حداکثر نرخ تغییرات در عملگرها:

$$\begin{aligned} &\Delta u_1^{\min} \le \Delta u_1(k_i) \le \Delta u_1^{\max}, \\ &\Delta u_2^{\min} \le \Delta u_2(k_i) \le \Delta u_2^{\max}, \\ &\quad\vdots \\ &\Delta u_m^{\min} \le \Delta u_m(k_i) \le \Delta u_m^{\max} \end{aligned} \qquad (۲۳)$$

و

$$\begin{aligned} &u_1^{\min} \le u_1(k_i) \le u_1^{\max}, \\ &u_2^{\min} \le u_2(k_i) \le u_2^{\max}, \\ &\quad\vdots \\ &u_m^{\min} \le u_m(k_i) \le u_m^{\max}, \end{aligned} \qquad (۲۴)$$

۶ – شبیه سازی و نتایج

در کاربردهای کنترلی طراحی کنترلر برای سیستم‌های غیرخطی دارای پیچیدگی بیشتری نسبت به سیستم‌های خطی است. بر این اساس عموما در سیستم‌های غیرخطی با توجه به فرضیات و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.12.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.155]

ساده‌سازی‌های ممکن سیستم حول نقطه کاری خود، خطی‌سازی شـــده و کنترلر متناســـب با آن طراحی می‌شـــود. به دلیل اینکه سیستم واقعی ماهیتی غیرخطی دارد، ممکن است کنترلر نتواند به صورت مناسب سیستم را در شرایط مطلوب قرار دهد و یا اینکه تلاش کنترلی به میزان زیادی افزایش یابد. همچنین امکان نوسان ســـیســـتم حول نقطه مطلوب نیز وجود دارد. در این پژوهش از کنترلر خطی PID مورد استفاده قرار گرفته است.

۶-۱- کنترل سرعت شناور

برای کنترل سرعت شناور به عنوان مدهای کنترلی، نیاز است تا کنترلی برای دور پروانه طراحی گردد. بهره های کنترلی طراحی شده در جدول ۲ آورده شده است.

$$\tau = k_p e_\theta(t) + k_i \int_0^t e_\theta(t)\, dt + k_d \frac{d}{dt} e_\theta(t) \qquad (۲۵)$$

$$e_\theta(t) = \theta_d(t) - \theta(t) \qquad (۲۶)$$

و برای مود لغزشی:

$$S_\theta = \dot{e} + \lambda e_\theta \qquad (۲۷)$$

$$sat(S_\theta/\varepsilon) = \begin{cases} \frac{S_\theta}{\varepsilon} si|e_\theta| \le \varepsilon \\ sat(S_\theta/\varepsilon) sie_\theta > \varepsilon \end{cases} \qquad (۲۸)$$

$$\tau = \mu sat(S_\theta\ /\ \varepsilon) \qquad (۲۹)$$

جدول ۲ بهره های کنترلر دور پروانه [۱۷]

ردیف	نام بهره		مقدار
1	K_p	$m_{11} \times \omega_n^2$	250
2	K_I	$K_P \times \omega_n / 10$	2.5
3	K_D	$2m_{11} \times \omega_n$	50

پس از پیاده ســـازی کنترلر ســـرعت (خودرانش) مقدار دور پروانه مورد نیاز جهت رسیدن به سرعت ۰/۷۶ متر بر ثانیه محاسبه گردد که این مقدار برابر ۱۸/۶۸ دور برثانیه محاسبه شده است.

۶-۲- کنترل یاو شناور

برای کنترل مســـیر و جهت شـــناور به عنوان مد های کنترلی، نیاز است تا کنترلی برای قرار گیری در موقعیت و مسیر مدنظر طراحی گردد. کنترلر طراحی شده در حالت های متفاوت نیز تست شده است تا عملکرد شناور را با کنترلر تست شود. بهره های کنترلی طراحی شده در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۳ بهره های کنترلی کنترلر زاویه ی یاو [۱۷]

ردیف	نام بهره		مقدار
1	K_p	$m_{66} \times \omega_n^2$	35
2	K_I	$K_P \times \omega_n / 10$	0.5
3	K_D	$2m_{66} \times \omega_n$	35

برای شبیه سازی و تخمین ضرایب کنترل کننده استفاده از مدل استاندارد و فضای حالت امری ضروری است. فرمت فضای حالت و مدل خطی با استفاده از ترم های خطی دینامیک شناور به شکل معادله (۳۰) استخراج می‌شود.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m+m_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m+m_y & x_G m \\ 0 & 0 & -x_G m & I_{zG}+J_Z \end{bmatrix}}_{M} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix}}_{\dot{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -R_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_v & Y_R - m - m_x \\ 0 & 0 & N_v & N_R - x_G m \end{bmatrix}}_{D} \underbrace{\begin{bmatrix} \psi \\ u \\ v \\ r \end{bmatrix}}_{x} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_T' \rho n_0 D^4 & 0 \\ 0 & 0.5\rho A_f C_L' U^2 \\ 0 & 0.5\rho A_f C_L' U^2 x_R \end{bmatrix}}_{E} \underbrace{\begin{bmatrix} n \\ \delta \end{bmatrix}}_{u} \qquad (۳۱)$$

که فرمت استاندارد فضای حالت به شکل (۳۲) استخراج میگردد.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ A &= D/M \\ B &= E/M \end{aligned} \qquad (۳۲)$$

۶-۳- مشخصات شناور

برای مدلسازی و طراحی سیستم کنترل مسیر شناور، مدل شناور نفتکش VLCC2 انتخاب شده است. مشخصات شناور در جدول زیر ارائه شده است. برای این دسته از شناورها سیستم رانش پروانه ای بوده و در بخش بعدی عملگرهای شناور شبیه سازی شده‌اند. این عملگرها شـامل یک سـکان اسـت. ورودی این بخش سـرعت ســـرج و فرامین کنترلی ایجادشـــده در بخش کنترل می‌باشـــند. خروجی‌ها نیز دور پروانه و زاویه قرارگیری سکان است.

جدول ۵ مشخصات مدل شناور مدنظر [۱۷]

model	Full scale	parameter

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.12.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.155]

2.902	320	Lpp (m)	1
0.527	58	B (m)	2
0.189	20.8	D (m)	3
0.235	312.600	$\nabla\ (m^3)$	4
0.102	11.2	$x_G\ (m)$	5
0.81	0.81	Cb	6
0.09	9.86	$D_p\ (m)$	7
0.144	15.8	$H_R\ (m)$	8
0.00928	112.5	$A_R\ (m^2)$	9
1/110	1	scale	10

۴-۶- شبیه سازی دینامیکی

در این بخش معادلات حرکت شناور مدل‌سازی شده‌اند. این معادلات به توجه به مطالب بیان شده مدل سازی دینامیکی شامل حرکات ۳ درجه آزادی می باشد.

ضرایب محاسبه شده در مقاله [۱۷] به صورت آزمایشگاهی محاسبه گردیده است. برای مدلسازی دینامیکی با استفاده از مدل پیمانه‌ای که در پژوهش [۱۷] ارائه شده است مدل غیرخطی سیستم تکمیل شده است. اعتبار سنجی و صحت سنجی مدلسازی در پژوهش نامبرده شده ارائه شده است.

۴-۶-۱- ضرایب هیدرودینامیکی

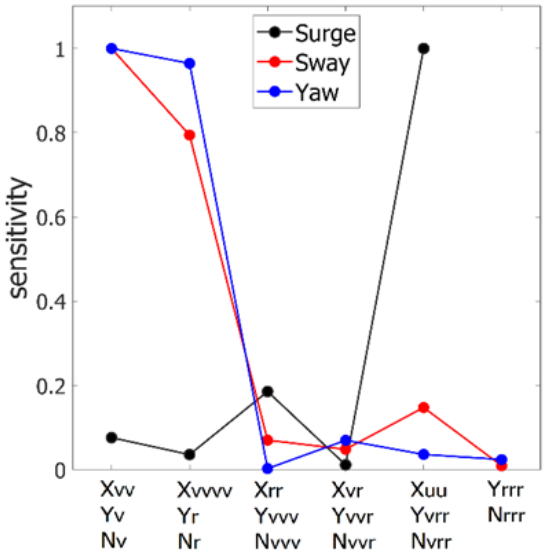
برای مدلسازی دینامیکی از روش MMG استفاده شده است. برای این منظور از نتایج پژوهش [۱۷] استفاده شده است که ضرایب آن در مقالات ارائه شده است. ضرایب هیدرودینامیکی شناور در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴ ضرایب هیدرودینامیکی کشتی VLCC2 [۱۷]

	parameter	value		parameter	value
1	$\acute{R}_0$	0.022	2	Y'_v	-0.315
3	X'_{vv}	-0.04	4	$Y'_R - m' - m'_x$	-0.233
5	$X'_{vr} + m' + m'_y$	0.518	6	Y'_{vvv}	-1.607
7	$X'_{rr} + x'_G m'$	0.021	8	Y'_{vvr}	0.379
9	X'_{vvvv}	0.771	10	Y'_{vrr}	-0.391
11	N'_v	-0.137	12	Y'_{rrr}	0.008
13	$N'_R - x'_G m'$	-0.059	14	N'_{vvv}	-0.03
15	N'_{vvr}	-0.294	16	N'_{vrr}	0.055
17	N'_{rrr}	-0.013	18	X'_{vr}	0.002
19	X'_{rr}	0.011	20	m'_y	0.223
21	m'_x	0.022	22	J'_Z	0.011

ضرایب خطی مرتبط به مدل دینامیکی دارای تاثیر بیشتری برعملکرد سیستم دارند. مشتقات با درجه بالاتر تاثیر کمتری از خود نشان خواهند داد چرا که میزان سرعت‌های شناور مقادیری کمتر از یک را تجربه میکنند. در شکل ۶ حساسیت سنجی ضرایب هیدرودینامیکی نسبت به ورودی متغییر صورت گرفته است. معادله حساسیت سنجی در رابطه (۳۳) اضافه شده است.

$$sensitivity = \frac{\partial Y}{\partial x_i}\frac{x_i}{Y} \qquad (۳۳)$$



شکل ۶ حساسیت سنجی ضرایب هیدرودینامیکی

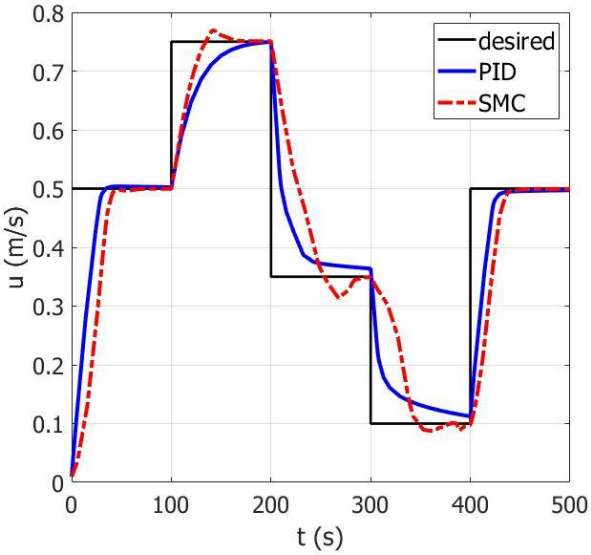
۴-۶-۵- کنترل سرعت

در این نوع شناورها در هنگام کاهش شدید سرعت مطلوب، کنترلر عملکرد مناسبی ندارد که علت آن عدم تولید نیروی منفی پروانه (عملگر کنترلی) به عنوان کاهش سرعت پیشروی است.

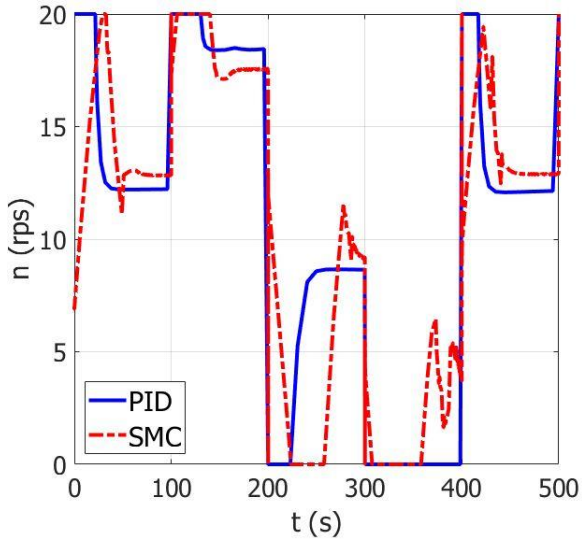
کنترل سرعت حرکت در انجام مأموریت نقش مهمی را ایفا می‌کند. نظر به اینکه در طراحی شناور یک سرعت مشخص مبنای طراحی قرار می‌گیرد، لازم است که مقدار سرعت تا حد امکان در این نقطه قرار بگیرد. اما در مواقعی ازجمله، جلوگیری از برخورد با موانع موجود، توقف در یک نقطه مشخص کنترل مناسبی بر سرعت وجود داشته باشد.

کنترل مود لغزشی بخاطر ماهیت غیرخطی و تطبیق با تغییر دینامیک قابلیت تطبیق بهتری دارد. اما در این کنترل بدلیل نوسانات بیشتر نسبت به کنترلر خطی ممکن است سبب آسیب به عملگرها گردد. به طور کلی در حین کاهش سرعت مود لغزشی بهتر عمل میکند در صورتی که کنترلر خطی نوسانات کمتر و بهتری نسبت به غیرخطی دارد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.12.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.155]



شکل ۷ پاسخ دینامیکی به کنترلر طراحی شده برای تثبیت سرعت شناور



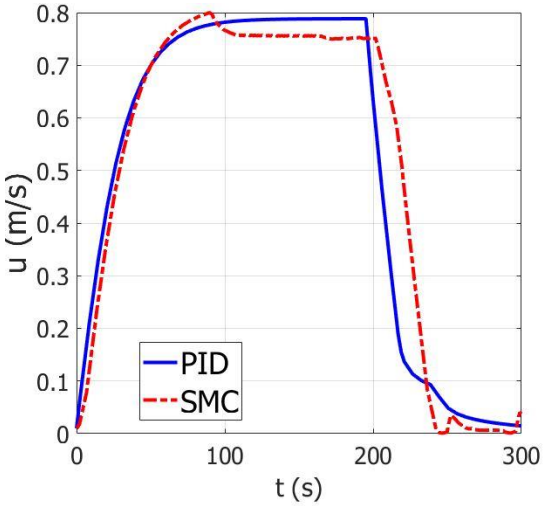
شکل ۸ فرامین کنترلی جهت کنترل سرعت

همانطور که در نتایج این بخش مشخص است، سرعت تغییر سرعت و قرار گیری در موقعیت برای کنترلر مود لغزشی بهتر است اما در طرف مقابل کنترل خطی طراحی شده دارای عملکرد و فرامین با نوسانات و اغتشاشات کمتری است که میتواند آسیب کمتری به عملگرها وارد کند.

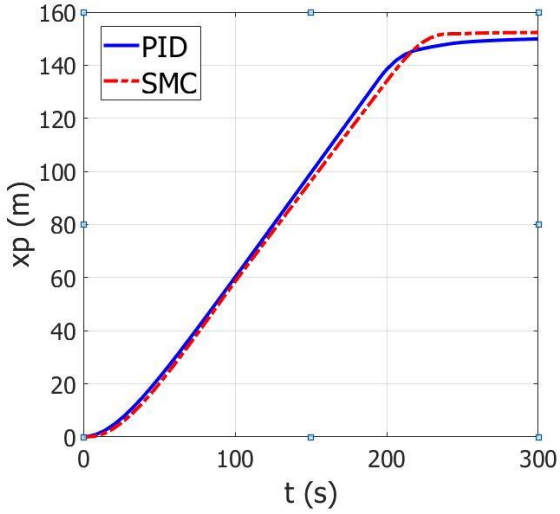
پس میتوان در سیستم هایی که کاهش سرعت و تغییرات آن دارای اهمیت بیشتری است، از مودلغزشی و درحالت ایمن تر از PID بهره برد.

۶-۶- حرکت در صفحه افقی

در این قسمت پاسخ سیستم در صفحه افقی به ورودی پله مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت موقعیت (x=150 , y=0)



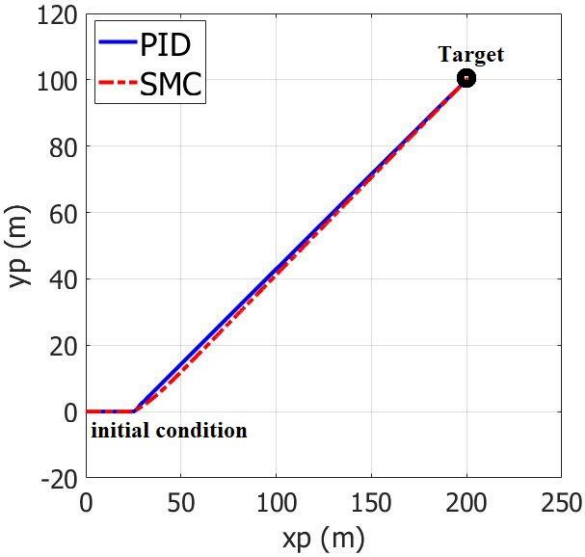
شکل ۹ عملکرد کنترلرها به کنترل سرعت



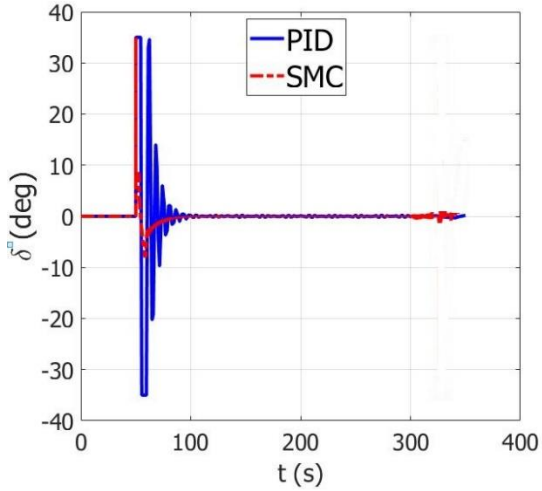
شکل ۱۰ پاسخ دینامیکی در کنترل موقعیت x

همانطور که در نتایج شکل های (۱۰-۱۲) مشخص است، سرعت ر سیدن به زاویه‌ی یاو مطلوب برای کنترلر خطی بهتر ا ست اما در کنترلر غیرخطی سرعت کمتر اما دارای فرارفت کمتری است که میتواند قابل توجه باشد. در کنترل مود لغزشی فرامین ارسال شده دارای وضعیت بهتری نسبت به کنترل PID دارد. چرا که دینامیک غیرخطی این شناورها سبب شده است تا کنترلر خطی در تثبیت موقعیت و رسیدن به حد مطلوب نوساناتی را تجربه کند اما در مود لغزشی به دلیل ماهیت متفاوت با مدل غیرخطی شناور بهتر تطبیق یافته است.

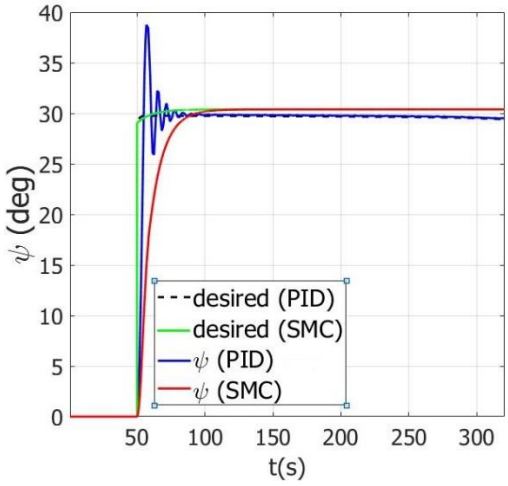
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.12.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.155]



شکل ۱۱ مسیر حرکت شناور با کنترلرهای مدنظر



شکل۱۲ فرامین کنترلی برای کنترل جهت



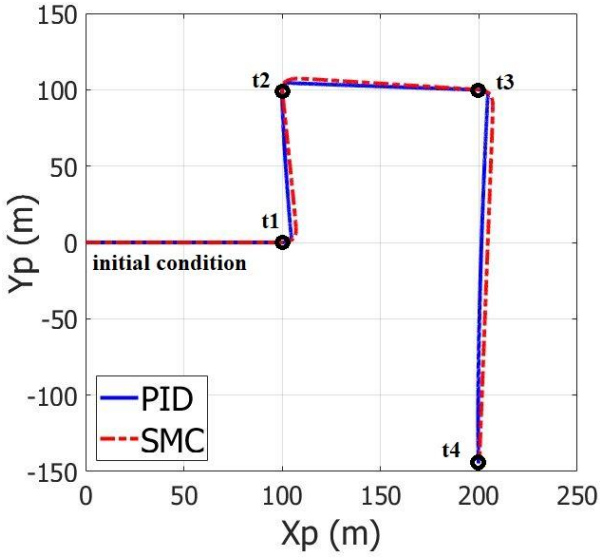
شکل ۱۳ عملکرد کنترل زاویه یاو

در این قسمت پاسخ سیستم در صفحه افقی به ورودی پله موردبررسی قرار گرفته است با تفاوت از این نظر که تغییرات در راستای y نیز درنظر گرفته شده است. در این حالت موقعیت (x=200 , y=100) برای سیستم در نظر گرفته شده است تا سیستم بعد از رسیدن به نقطه‌ی مطلوب بتواند در سرعت صفر قرار گیرد. نتایج خروجی در شکل های زیر ارائه شده است.

۷-۶- حرکت نقطه به نقطه

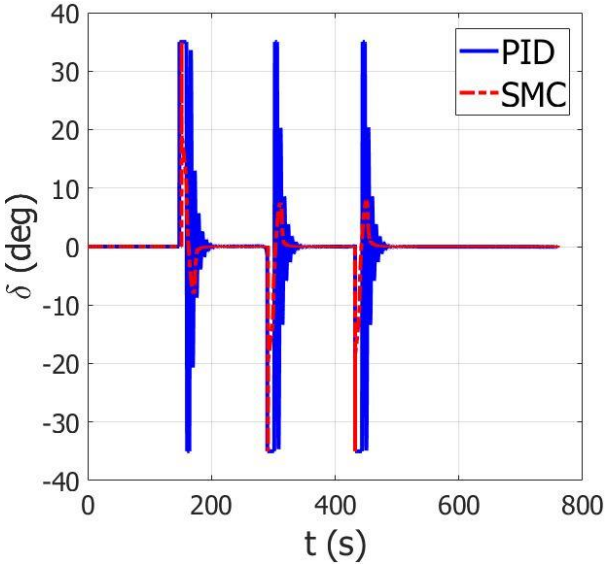
در این قسمت پاسخ سیستم در صفحه افقی به ورودی پله موردبررسی قرار گرفته است. در این حالت موقعیت کنترلی تعریف شده در چند نقطه ی متفاوت می باشد که شناور باید نقاط مد نظر را رد نموده و در نقطه ی انتهایی در حالت سکون قرار گیرد. و باید به گونه ای باشد که سیستم کنترلی طراحی شده تا شناور را بعد از رسیدن به نقطه ی مطلوب بتواند در سرعت صفر قرار دهد. نقاط تعریف شده به صورت زیر است. نتایج خروجی در شکل های زیر ارائه شده است.

T=1[x1=100, y1=0]
T2=[x2=100, y2=100]
T3=[x3=200, y3=100]
T4=[x4=200, y4=-150]

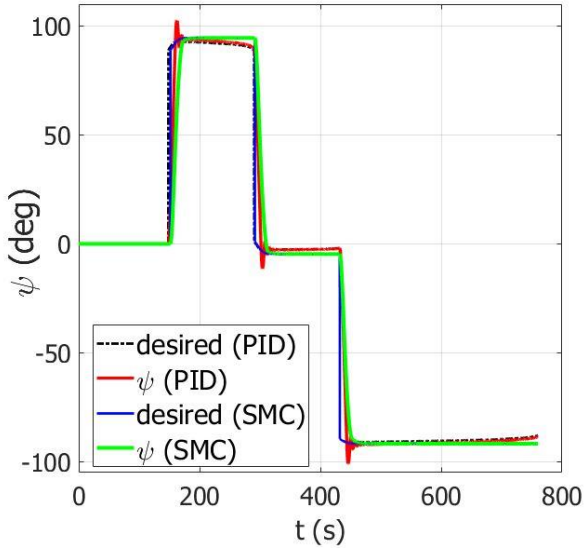


شکل ۱۴ موقعیت شناور نسب به مود کنترلی تعریف شده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.12.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.155]



شکل ۱۵ فرامین کنترلی برای سکان نسب به مود کنترلی



شکل ۱۶ عملکرد کنترلرها در تثبیت زاویه‌ی یاو

به مشابه نتایجات قبلی، کنترل مود لغزشی سرعت کمتری در رسیدن به زاویه یاو مطلوب دارند اما نوسانات بیشتری در فرامین آن ها دیده میشود که ممکن است به عملگرهای سکان در دراز مدت آسیب وارد نماید.

نتایج حاصل از پیاده سازی می تواند کمک شایانی برای پیاده سازی سیستم هوشمند تعقیب مسیر و موقعیت مشخص برای شناورهای جابه جایی باشد. نتایج حاصل شده نشان میدهند که در سیستم‌هایی که دینامیک نسبتا کندی دارند و سرعت خیلی بالا نمیباشد، کنترلرهای خطی نیز میتوانند پاسخ مطلوبی داشته باشند. نرخ تغییرات زاویه یاو شناور نیز از این قائله مستثنی نیست به مشابه سرعت شناور، در کنترل زاویه یاو، کنترلر های خطی جواب متناسب و مطلوبی را برای حفظ مسیرو تثبیت موقعیت شناور داشته باشد.

۷- نتیجه گیری

هدایت و ناوبری شناورهای جابه جایی بدلیل داشتن خدمه جهت هدایت آن دربرگیرنده‌ی هزینه های زیادی برای مالکان آنها می‌باشد. این امر سبب خطاهای انسانی در حین عملیات را شامل و باعث صدمه به شناور می شود و هزینه‌ها و میزان سوخت مصرفی را افزایش می‌دهد. بر این اساس تا حد امکان جوانب ایمنی را در فرآیند طراحی و مأموریت آن‌ها باید در نظر گرفت.

بخش هوشمند سازی شناورها شامل سیستم هدایت، ناوبری و کنترل، سنسور و الگوریتم های جلوگیری از برخورد با موانع، سیستم عیب‌یابی و تشخیص خطا و سیستم بازیابی اضطراری است، که به مراتب هرکدام از اهمیت خاصی برخوردار است.

هدف از پژوهش حاضر طراحی سیستم کنترلی برای یک مدل نفتکش بوده است که بنابر تعاریف موجود برای سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی بتواند وضعیت را در هرلحظه کنترل کنند. بر این اساس لازم است که کشتی با داشتن یک پروانه و سکان بتواند در شرایط مختلفی همچون حفظ یک موقعیت خاص، دنبال کردن یک مسیر مشخص، حرکت نقطه به نقطه عملکرد مناسبی ارائه دهد.

دو نوع کنترلر PID و SMC برای شناور مورد نظر طراحی گردیده است. نتایج حاصل نشان دهنده‌ی عملکرد این دو نوع کنترل کننده برای شرایط مختلف است. کنترلر خطی برای کنترل سرعت دارای عملکرد ملایم تر و یکنواخت تری بوده است که می‌تواند در دراز مدت آسیب کمتری به سیستم‌های انتقال قدرت برساند. در طرف مقابل کنترلر غیرخطی طراحی شده با سرعت بیشتری به نقطه مطلوب سرعت میرسد اما اغتشاش و نوسانات آن به حالت کنترل خطی بیشتر است.

بجز مورد کنترل سرعت، در کنترل موقعیت و جهت گیری قضیه برعکس می باشد. در کنترلر خطی PID سرعت و عملکرد تغییر جهت بالاتر بوده اما بدلیل ماهیت غیرخطی مدل دینامیکی دارای فرارفت و نوسانات حول مقدار مطلوب می‌باشد. در طرف مقابل بدلیل انطباق بهتر کنترلر غیرخطی SMC با مدل شناور میزان فرارفت کمتر بوده و فرامین کنترلی نیز دارای اغتشاشات و نوسان کمتری است.

۸- مراجع

[1] Yuh, J. , Marani, G. , & Blidberg, D. R. (2011). Applications of marine robotic vehicles. Intelligent Service Robotics, 4 (4), 221–231.

[2] Abril, J. , Salom, J. , & Calvo, O. (1997). Fuzzy control of a sailboat. International Journal of Approximate Reasoning, 16 (3), 359–375 .

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.12.6]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.155]

[3] Almeida, J., Silvestre, C., & Pascoal, A. (2010). Cooperative control of multiple surface vessels in the presence of ocean currents and parametric model uncertainty. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 20 (14), 1549–1565.

[4] Annamalai, A., & Motwani, A. (2013). A comparison between LQG and MPC autopi- lots for inclusion in a navigation, guidance and control system. MIDAS technical report: MIDAS.SMSE.2013.TR.00. MIDAS.

[5] Chen, M., Ge, S. S. , How, B. V. E. , & Choo, Y. S. (2013). Robust adaptive position moor- ing control for marine vessels. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 21 (2), 395–409.

[6] Fossen, T. I., & Strand, J. P. (1999). Passive nonlinear observer design for ships us- ing lyapunov methods: Full-scale experiments with a supply vessel. Automatica, 35 (1), 3–16.

[7] Gal, O. (2011a). Automatic obstacle detection for USVs navigation using vision sen- sors. In Robotic sailing (pp. 127–140). Berlin, Heidelberg: Springer.

[8] He, W., Ge, S. S., How, B. V. E., & Choo, Y. S. (2014). Dynamics and control of me- chanical systems in offshore engineering. London: Springer.

[9] Johansen, T. A. (2013). Fuel optimal thrust allocation in dynamic positioning. Control Applications in Marine Systems, 9 (1), 43–48.

[10] Martins, A., Ferreira, H., Almeida, C. , Silva, H. , Almeida, J. M. , & Silva, E. (2007a). ROAZ and ROAZ II autonomous surface vehicle design and implementation. In Proceedings of international lifesaving congress.

[11] Pascoal, A., Silvestre, C., & Oliveira, P. (2006). Vehicle and mission control of single and multiple autonomous marine robots. IEE Control Engineering Series, 69, 353.

[12] Pastore, T., & Djapic, V. (2010). Improving autonomy and control of autonomous sur- face vehicles in port protection and mine countermeasure scenarios. Journal of Field Robotics, 27 (6), 903–914.

[13] Yu, Z., Bao, X., & Nonami, K. (2008). Course keeping control of an autonomous boat using low cost sensors. Journal of System Design and Dynamics, 2 (1), 389–400.

[14] Sperry, E. 1922. Directional Stability of Automatically Steered Bodies. Journal of the American Society of Naval Engineers, Vol. 42, No. 2.

[15] Lee, S.D., Yu, C.H., Hsiu, K.Y., Hsieh, Y.F., Tzeng, C.Y. and Kehr, Y.Z. 2010. Design and experiment of a small boat track-keeping autopilot. Ocean Engineering, Vol. 37, pp. 208–217.

[16] Roberts, G.N., et al. 1997. Robust Control Methodology applied to the design of a combined steering/stabiliser system for warships. IEE Proceedings of Control Theory Application, Vol. 144, No. 2, pp. 128-136.

[17] Yasukawa, H. and Yoshimura, Y., 2015. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. Journal of Marine Science and Technology, 20(1), pp.37-52.

[18] Kørte, S.Ø., Guidance & control strategies for uuvs. 2011, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.

[19] Li, Z., & Sun, J. (2012). Disturbance compensating model predictive control with ap- plication to ship heading control. *IEEE Transactions on Control Systems Technol- ogy, 20* (1), 257–265.

[20] Guerreiro, B. J., Silvestre, C., Cunha, R., & Pascoal, A. (2013). Trajectorytracking non- linear model predictive control for autonomous surface craft. In *Proceedings of IEEE European control conference* (pp. 3006–3011).

[21] Annamalai, A. S. K., Sutton, R., Yang, C., Culverhouse, P., & Sharma, S. (2014a). Inno- vative adaptive autopilot design for uninhabited surface vehicles. In *Proceedings of IET Irish signals & systems conference and China–Ireland*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.12.6]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.155]

international confer- ence on information and communications technologies (pp. 158–163).

[22] Sharma, S. K., & Sutton, R. (2013). A genetic algorithm based nonlinear guidance and control system for an uninhabited surface vehicle. *Journal of Marine Engineering and Technology, 12* (2), 29–40.

[23] Feemster, M. G., & Esposito, J. M. (2011). Comprehensive framework for tracking control and thrust allocation for a highly overactuated autonomous surface ves- sel. *Journal of Field Robotics, 28* (1), 80–100.

[24] Svec, P., Thakur, A., Raboin, E. , Shah, B. C. , & Gupta, S. K. (2014b). Target follow- ing with motion prediction for unmanned surface vehicle operating in cluttered environments. *Autonomous Robots, 36* (4), 383–405.

[25] Wondergem, M., Lefeber, E., Pettersen, K. Y., & Nijmeijer, H. (2011). Output feed- back tracking of ships. *IEEE Transactions on Control Systems Technology, 19* (2), 4 42–4 48.

[26] Ashrafiuon, H., Muske, K. R., McNinch, L. C., & Soltan, R. A. (2008). Sliding-mode tracking control of surface vessels. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55 (11), 4004–4012.

[27] Majohr, J., & Buch, T. (2006). Modelling, simulation and control of an autonomous surface marine vehicle for surveying applications measuring dolphin MESSIN. *IEE Control Engineering Series, 69,* 329–352.

[28] Sharma, S. K., & Sutton, R. (2012). Modelling the yaw dynamics of an uninhabited surface vehicle for navigation and control systems design. Journal of Marine En- gineering and Technology, 11 (3), 9–20.

[29] Breivik, M., Hovstein, V. E., & Fossen, T. I. (2008). Straight-line target tracking for unmanned surface vehicles. Modeling, Identification and Control, 29 (4), 131–149.

[30] Sonnenburg, C. R., & Woolsey, C. A. (2013). Modeling, identification, and control of an unmanned surface vehicle. *Journal of Field Robotics, 30* (3), 371–398.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.12.6]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.155]